

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ SİSTEMLERİ KARARLILIĞI VE GÜÇ SİSTEMİ DENGELEYİCİSİ
UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdulvehhab AĞIN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

KASIM 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ SİSTEMLERİ KARARLILIĞI VE GÜÇ SİSTEMİ Dengeleyicisi
UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Abdulvehhab AĞIN
(504121002)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN

KASIM 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504121002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Abdulvehhab AĞIN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Enerji Sistemleri Kararlılığı ve Güç Sistemi Dengeleyicisi Uygulamaları**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN**
Yıldız Teknik Üniversitesi

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

Teslim Tarihi : **24 Eylül 2013**
Savunma Tarihi : **27 Kasım 2013**

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince yardımlarını benden esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN'e, her türlü teknik destek ve imkânı sağlayan Bis Enerji Elektrik Üretim A.Ş. Genel Müdürü Sn. F. Fırat ALPARSLAN'a, mesleki bilgi ve tecrübelerinden her zaman yararlandığım babam Şaban AĞIN'a, öğrenim hayatım boyunca her zaman yanımda olan çok sevdiğim anneme, anneanneme ve kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2013

Abdulvehhab Ağın

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNİN TANITILMASI	5
2.1 Enerji Sistemlerinin Ana Yapısı.....	5
2.2 Enerji Sistemlerinin Kontrolü	6
2.2.1 Enerji sistemlerinin işletilmesi.....	8
2.2.2 Sistem kararlılığının sağlanması ve işletme kriterleri	10
2.2.2.1 Normal işletme şartları	11
2.2.2.2 Kritik işletme şartları.....	12
2.2.2.3 Arıza şartları.....	12
3. ENERJİ SİSTEMLERİ KARARLILIĞININ TANITIMI	15
3.1 Temel Kavramlar ve Tanımlar	15
3.2 Rotor Açısı Kararlılığı.....	15
3.2.1 Küçük işaret kararlılığı.....	19
3.2.1.1 Üniteler arası salınım	20
3.2.1.2 Bölgesel salınım	21
3.2.1.3 Bölgeler arası salınım.....	21
3.2.2 Geçici hal kararlılığı.....	21
3.3 Gerilim Kararlılığı.....	22
4. UYARTMA SİSTEMLERİNİN KARARLILIĞA ETKİLERİ.....	23
5. GÜÇ SİSTEMİ Dengeyicisi	27
5.1 Tek Girişli Güç Sistemi Dengeleyicisi.....	29
6. GÜÇ SİSTEMİ VE SENKRON GENERATÖR MODELİ	31
6.1 Transfer Fonksiyonlardan Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi	31
6.2 Güç Sistemi Modeli.....	33
6.3 Senkron Generatör Modeli	34
6.4 Devir Sayısı Regülatörü ve Türbin Sistemi.....	36
6.5 Otomatik Gerilim Regülatörü.....	38
6.6 Güç Sistemi Dengeleyicisi Modeli.....	39
6.7 Sürekli Hal Değerleri	41
6.8 Küçük İşaret Modeli.....	43
7. OPTİMİZASYON	49
7.1 Amaç ve Uygunluk Fonksiyonu.....	49
7.2 Sınırlamalar	50
7.3 Optimizasyon Metotları.....	51

7.3.1 Klasik teknikler	51
7.3.2 Modern sezgisel algoritmalar	51
7.3.2.1 Genetik algoritma:.....	51
Kodlama yöntemleri.....	52
Parametreler:	52
Algoritmanın çalışma şekli.....	52
7.3.2.2 Parçacık sürüsü optimizasyon algoritması	55
Algoritmanın çalışma şekli:	55
7.3.2.3 Yapay arı kolonisi algoritması	57
Yapay arı kolonisinde yapılan kabuller.....	57
Algoritmanın çalışma şekli:	58
7.3.2.4 Karınca kolonisi algoritması	60
Karınca kolonisi algoritmasında yapılan kabuller.....	61
Algoritmanın çalışma şekli.....	61
8. BENZETİM ÇALIŞMASI.....	65
8.1 Hata Değerinin Hesabı	65
8.2 Benzetim Sonuçları	66
8.2.1 Küçük işaret kararlılığı için optimizasyon	67
8.2.2 Geçici hal kararlılığı için optimizasyon	69
8.2.3 Küçük işaret ve geçici hal kararlılığı için optimizasyon	72
8.3 Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi	77
9. SONUÇ	79
KAYNAKLAR.....	81
EKLER.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	117

KISALTMALAR

BYTM	: Bölgesel Yük Tevzi Merkezi
GA	: Genetik Algoritma
GSD	: Güç Sistemi Dengeleyicisi
ENTSO-E	: European Network of Transmission System Operators For Electricity
IATE	: Hatanın Mutlak Değerinin Zamana Bağlı İntegrali
KKA	: Karınca Kolonisi Algoritması
MYTM	: Milli Yük Tevzi Merkezi
OGR	: Otomatik Gerilim Regülatörü
PSO	: Parçacık Sürüşü Optimizasyonu
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş
YAK	: Yapay Arı Kolonisi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 6.1 : Otomatik gerilim regülatöründe kullanılan parametreler	39
Çizelge 6.2 : Güç sistemi dengeleyicisi parametre aralıkları.....	40
Çizelge 8.1 : GA’da kullanılacak parametreler	65
Çizelge 8.2 : PSO’da kullanılacak parametreler	65
Çizelge 8.3 : YAK’ta kullanılacak parametreler	65
Çizelge 8.4 : KKA’da kullanılacak parametreler.....	65
Çizelge 8.5 : Optimizasyondan elde edilen en iyi parametreler.	67
Çizelge 8.6 : Algoritmaların performansları.....	68
Çizelge 8.7 : Optimizasyondan elde edilen en iyi parametreler.	69
Çizelge 8.8 : Algoritmaların performansları.....	70
Çizelge 8.9 : Optimizasyondan elde edilen en iyi parametreler.	73
Çizelge 8.10 : Algoritmaların performansları.....	74
Çizelge 8.11 : Küçük işaret kararlılığında YAK, KKA ait oturma süresi ve maksimum genlikleri.	76
Çizelge 8.12 : Küçük işaret kararlılığında GA, PSO ait oturma süresi ve maksimum genlikleri.	76
Çizelge 8.13 : Geçici hal kararlılığında YAK, KKA ait oturma süresi ve maksimum genlikleri.	76
Çizelge 8.14 : Geçici hal kararlılığında GA, PSO ait oturma süresi ve maksimum genlikleri.	77

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Elektrik enerji sistemlerinin ana yapısı.....	6
Şekil 2.2	: Elektrik enerji sistemlerinin kontrolü	7
Şekil 2.3	: Frekans kontrolü uygulama hiyerarşisi.....	9
Şekil 3.1	: Güç sistemi kararlılık problemlerinin sınıflandırılması.....	16
Şekil 3.2	: Senkron generatöre ait manyeto motor kuvvetleri ve rotor açısı.....	16
Şekil 3.3	: Mekanik ve elektriki momentlerin mile uygulanması	17
Şekil 3.4	: Sonsuz baraya bağlı senkron generatör	17
Şekil 3.5	: Sonsuz baraya bağlı generatör fazör diyagramı.....	18
Şekil 3.6	: Sabit uyarma gerilimi ile sistemdeki küçük bozulmalara, sistemin doğal tepkisi	20
Şekil 3.7	: Uyarma kontrolü ile sistemdeki küçük bozulmalara, sistemin doğal tepkisi	20
Şekil 3.8	: Generatör üniteleri arasındaki salınımlar.....	21
Şekil 3.9	: Bölgesel salınım.....	21
Şekil 3.10	: Bölgeler arası salınım	21
Şekil 3.11	: Lastik bant benzerliği.....	22
Şekil 4.1	: Sistem.....	23
Şekil 4.2	: Uyarım sisteminin rotor açısı kararlılığına etkisi	23
Şekil 5.1	: Küçük bozukluklarda rotor açısı ve hız değişimleri	28
Şekil 5.2	: Tek girişli güç sistemi dengeleyicisi.....	29
Şekil 6.1	: Z(s) transfer fonksiyonuna ait blok diyagram.....	32
Şekil 6.2	: T(s) transfer fonksiyonuna ait blok diyagram.....	33
Şekil 6.3	: Tek makina-sonsuz bara güç sistemi modeli	33
Şekil 6.4	: Sisteme ait güç sistemi modeli.....	34
Şekil 6.5	: Devir sayısı regülatörü blok diyagramı	36
Şekil 6.6	: Türbin sistemi blok diyagramı	37
Şekil 6.7	: ST1 otomatik gerilim regülatörü blok diyagramı	38
Şekil 6.8	: Güç sistemi dengeleyicisi blok diyagramı	40
Şekil 6.9	: Sisteme ait fazör diyagram	42
Şekil 6.10	: d ve q eksenine ait devre şeması	43
Şekil 6.11	: Moment - rotor açısı blok diyagramı	46
Şekil 6.12	: Rotor sargısı denkleminde ait blok diyagram	46
Şekil 6.13	: Uyarım sistemine ait blok diyagram	47
Şekil 6.14	: Heffron-Phillips küçük işaret modeli.....	48
Şekil 7.1	: Optimizasyonun temel aşamaları.....	49
Şekil 7.2	: GA akış diyagramı	54
Şekil 7.3	: PSO akış diyagramı	57
Şekil 7.4	: YAK akış diyagramı	60
Şekil 7.5	: KKA Akış diyagramı	63
Şekil 8.1	: Öğrenme grafiği	67
Şekil 8.2	: Küçük işaret kararlılığı	68

Şekil 8.3 : Geçici hal kararlılığı.....	69
Şekil 8.4 : Öğrenme grafiği	70
Şekil 8.5 : Geçici hal kararlılığı.....	71
Şekil 8.6 : Küçük işaret kararlılığı.....	71
Şekil 8.7 : Öğrenme grafiği	74
Şekil 8.8 : Küçük işaret kararlılığı.....	75
Şekil 8.9 : Geçici hal kararlılığı	75
Şekil D.1 : $w_1 = 1, w_2 = 1, P=0.85, Q=0.53$ endüktif yük durumunda küçük işaret kararlılığı	109
Şekil D.2 : $w_1 = 1, w_2 = 1, P=0.85, Q=0.53$ endüktif yük durumunda geçici hal kararlılığı	109
Şekil D.3 : $w_1 = 10, w_2 = 1, P=0.85, Q=0.53$ endüktif yük durumunda küçük işaret kararlılığı	110
Şekil D.4 : $w_1 = 10, w_2 = 1, P=0.85, Q=0.53$ endüktif yük durumunda geçici hal kararlılığı	110
Şekil D.5 : $w_1 = 25, w_2 = 1, P=0.85, Q=0.53$ endüktif yük durumunda küçük işaret kararlılığı	111
Şekil D.6 : $w_1 = 25, w_2 = 1, P=0.85, Q=0.53$ endüktif yük durumunda geçici hal kararlılığı	111
Şekil E.1 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.6, Q=0.4$ orta endüktif yük durumunda küçük işaret kararlılığı (ek yük=0.02pu).....	113
Şekil E.2 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.6, Q= - 0.4$ orta kapasitif yük durumunda küçük işaret kararlılığı (ek yük=0.02 pu).....	113
Şekil E.3 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.4, Q= 0.2$ hafif endüktif yük durumunda küçük işaret kararlılığı (ek yük=0.03 pu).....	114
Şekil E.4 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.4, Q= - 0.2$ hafif kapasitif yük durumunda küçük işaret kararlılığı (ek yük=0.03 pu).....	114
Şekil E.5 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.6, Q=0.4$ orta endüktif yük durumunda geçici hal kararlılığı	115
Şekil E.6 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.6, Q= - 0.4$ orta kapasitif yük durumunda geçici hal kararlılığı	115
Şekil E.7 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.4, Q= 0.2$ hafif endüktif yük durumunda geçici hal kararlılığı	116
Şekil E.8 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.4, Q= - 0.2$ hafif kapasitif yük durumunda geçici hal kararlılığı	116

ENERJİ SİSTEMLERİ KARARLILIĞI VE GÜÇ SİSTEMİ Dengeleyicisi UYGULAMALARI

ÖZET

Elektrik enerji sistemleri kararlılığı, normal işletme koşullarında çalışan enterkonnekte sistemde iletim hatalarındaki geçici veya kalıcı arızalar, şalt teçhizatı arızaları, üretim ünitelerinin devreden çıkması, beklenmedik ek yüklerin gelmesi, üretim-tüketim dengesinin bozulması, sistem arızalarına bağlı olarak yük atılması, sistemin tümünü etkileyecek olup, arızalar sonrası geçici olaylar sönümlendikten sonra, tekrar normal işletme koşullarına dönebilme yeteneği olup, farklı sınıflandırmalar olmakla beraber literatürde genelde geçici hal kararlılığı ve küçük işaret kararlılığı olarak sınıflandırılmaktadır.

1950'lerden itibaren elektrik santrallerinin generatör ünitelerindeki hız regülatörleri ile kesintisiz ve hızlı ayar yapan otomatik gerilim regülatörleri, enerji sistemleri kararlılığını sağlamış olmakla beraber, santral sayısının artması, ülkeler arası enterkoneksiyon bağlantıları, santrallerdeki türbin, generatör ve donanımlarındaki teknik özellik farklılıkları, güç sistemi kararlılığını bozan olumsuz etkiler göstermiş, enterkonnekte sistemlerde oluşan düşük genlikli ve 0,5 Hz. den daha küçük frekanslı güç salınımları, uzun periyodlar ile devam ettiğinden, bazı hallerde enterkonnekte sistemde enerji iletimini sınırlayacak boyutlara ulaşmıştır.

Güç sistemi dengeleyicileri gerilim regülatörleri ile birlikte kullanılarak, generatörlerin uyarma akımlarının değişimi ve uygulama zamanları modüle edilerek, olumlu senkronizasyon ve sönümleme momentleri üretilmiş, rotorlarındaki elektromekanik salınımlar ile statorlarındaki aktif güç salınımlarının sönümlenmesine, sistemdeki frekans ve gerilim değişimleri belirli sınırlar içinde tutularak, sistemin kararlı çalışabilme güvenilirliği arttırılmıştır.

Tez çalışmasında, Bis Enerji Elektrik Üretim A.Ş. Termik Santrali'nde işletmede olan 11,5 kV, 36 MVA gücünde, 11 no.lu Buhar Türbini Generatör ünitesinin küçük işaret kararlılığı ve geçici hal kararlılığı, bağlı olduğu TEİAŞ 154kV barasının sonuz güçlü olduğu varsayımı altında incelenmiştir. Küçük yük değişimlerinin senkron generatör üzerindeki etkisi güç sisteminin lineerleştirilmiş bir modeli olan Heffron-Phillips modeliyle; arızaların senkron generatör üzerindeki etkisi ise durum denklemleri yardımıyla çözülmüştür. Genetik Algoritma, Yapay Arı Kolonisi, Karınca Kolonisi Algoritması ve Parçacık Sürüş Optimizasyonu algoritmalarıyla; güç sisteminin hem küçük işaret kararlılığını, hem de geçici hal kararlılığını arttıracak güç sistemi dengeleyicisi parametreleri "Çok Amaçlı Optimizasyon Probleminin, Tek Amaçlı Optimizasyon Problemine İndirgenmesi" yöntemiyle belirlenmiştir. Algoritmaların performansları, optimizasyonların sonunda elde edilen hata değerlerin (ITAE) ortalaması ve standart sapması üzerinden değerlendirilmiş, bu yöntem için en başarılı optimizasyon algoritmasının Genetik Algoritma olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

POWER SYSTEM STABILITY AND POWER SYSTEM STABILIZER APPLICATIONS

SUMMARY

In the interconnected system that operates under normal operating conditions, since the temporary or permanent faults in the transmission lines, switchgear equipment faults, shut down of generation units, unexpected additional loads, destabilization of generation-consumption equilibrium, load shedding depending on system failures will affect the system integrity; electric power systems stability is a capability of returning to the normal operating conditions after damping of temporary faults and there are different classifications in the literature, it is generally classified as transient stability and small-signal stability.

Since 1950s, speed governors that are in the generator units of electric power-plants and incessant and fast acting automatic voltage regulators provide power systems stability as well as the increasing number of power plants, transnational interconnections, technical specification differences in the turbine, generator and equipments of the plants have showed adverse effects which break up the power system stability since the power oscillations, which occur the interconnected systems and which have low-magnitudes and frequencies lower than 0,5 Hz proceed in long periods, have reached the values that will limit the power transmission in the interconnected system in some cases.

Positive synchronization and damping torques are produced by being used together with voltage regulators and power system stabilizer by modulating excitation time and exchange of the excitation currents of the generators; stable operating reliability of the system is enhanced by keeping the frequency, voltage changes within limits and damping of active power oscillations in the stators and electromagnetic oscillations in the rotors.

In this study, transient state stability and small-signal stability of the Steam Turbine Generator unit no 11 that is 11,5 kV, 36 MVA, which operates in the Thermal Power Plant of Bis Enerji Elektik Üretim A.Ş., is investigated under the assumption that its connected TEİAŞ 154kV as an infinitive bus. Effects of small load perturbation on synchronous generator have been investigated by a linearized model, Heffron-Phillips model, of the power system; effects of faults on synchronous generator have been solved by the state equations. Power system stabilizer's optimal parameters that will enhance both transient stability and small-signal stability are determined by the "Reduction of Multi-Objective Optimization Problem to the Single-Objective Optimization Problem" method using Genetic Algorithm, Artificial Bee Colony, Ant Colony Algorithm and Particle Swarm Optimization algorithms. Algorithms' performances are evaluated through The Integral of Time multiply Absolute Error (ITAE) average and standard deviation obtained at the end of the optimizations; and it is concluded that Genetic Algorithm is the most successful optimization algorithm for this method.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi santrallerde generatörler tarafından üretilmekte, iletim sistemlerine verilerek şehirler, bölgeler ve ülkeler arasında iletilmekte, tüketim bölgelerindeki indirici transformatörler ile de gerilim düşürülerek, dağıtım sistemleri beslenmektedir.

Üretilen, iletilen ve dağıtılarak tüketime sunulan elektrik enerjisinin kalitesi güvenilir, kesintisiz, gerilim ve frekansın belirli sınırlar içinde tutulmasına bağlı olup bu işlevler,

- Santrallerde otomatik gerilim regülatörleri, hız (frekans) regülatörleri, senkron kondenserler,
- İletim sistemlerinde statik VAr kompensatörleri, seri kapasitörler, şönt reaktörler, gerilim regülasyonu yapan kademe şalterli transformatörler, vb.
- Dağıtım sistemlerinde otomatik veya el ile (manuel) gerilim regülasyonu yapan transformatörler, harmonik filtreli VAr kompensatörleri, şönt kapasitörler

ile yapılmaktadır [1].

Türkiye’de enterkonnekte sistem TEİAŞ Milli Yük Tevzi Merkezi (MYTM) ve Bölgesel Yük Tevzi Merkezi (BYTM)’lerince, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition- Danışmalı Kontrol ve Veri Toplama Sistemi) ile izlenmekte, toplanan veriler Otomatik Üretim Kontrolü programında değerlendirilmekte, ekonomi, sistem kısıtlılıkları ve kayıplar da dikkate alınarak üretim-tüketim dengesi temin edilmektedir. Yine sistemin işletilmesi, gözlenmesi, uyarı ve acil durum hallerinde ilk tedbirlerin alınması, arızaları müteakip sistemden çıkmış olan üretim ünitelerinin devreye aldırılması, enerji nakil hatlarının sisteme bağlanması talimatlarının verilmesi, üretim - tüketim dengesinin tekrar sağlanması ve sistemin normal işletme haline döndürülmesi TEİAŞ MYTM ve BYTM’leri tarafından yapılmaktadır [1].

Enerji sistemlerinin kararlı çalışabilmesinin esasını, 24 saat boyunca günün ihtiyaçlarına bağlı olarak üretim-tüketim dengesinin karşılanması oluşturur. Gün içinde üretim ve tüketim dengesini olumsuz etkileyecek sistemdeki teçhizat arızaları, üretim ünitelerinin devreden çıkması, beklenmedik ek yüklerin gelmesi veya sistem arızalarına bağlı olarak yük atılması (mevsim koşullarındaki ani değişiklikler, fırtına, buzlanma, yıldırım vb. atmosferik olaylar) sistemin bütünlüğünü etkileyecek olup, kararlı çalışma hali kaybolacak, sistemde ani veya yavaş-yavaş gerilim ve frekans değişimleri oluşacaktır.

Enerji sistemi kararlı halinin sürdürülmesi ve bölgesel oturmaların önlenmesi için, anlık talep kontrolü, primer frekans kontrolü, sekonder frekans kontrolü ve tersiyer frekans kontrolü gibi çeşitli kontrol sistemleri kurulmuştur [2].

Enerji sistemi kararlılığı, normal işletme koşullarında çalışan enterkonnekte sistemin bir arıza sonrası, geçici olaylar sönmüldikten sonra, tekrar normal işletme koşullarına dönebilme yeteneği olup, farklı sınıflandırmalar olmakla beraber literatürde genelde geçici hal kararlılığı (*transient stability*), küçük işaret kararlılığı (*small-signal stability*) olarak sınıflandırılmaktadır [3].

Santrallerdeki türbin, generatör ve donanımlarındaki teknik özellik farklılıkları, güç sistemi kararlılığını bozan olumsuz etkiler göstermekte olup, şebekede oluşan düşük genlikli ve frekanslı güç salınımları, uzun periyodlar ile devam ettiğinden, bazı hallerde enterkonnekte sistemde enerji iletimini sınırlayacak boyutlara ulaşmıştır [4].

Güç Sistemi Dengeleyicileri gerilim regülatörleri ile birlikte kullanılmasıyla, generatörlerin uyarma gerilimlerinin değişimi ve uygulama zamanları modüle edilmiştir. Üretilen olumlu senkronizasyon ve sönmüleme momentleri sayesinde sistemdeki frekans ve gerilim değişimleri belirli sınırlar içinde tutularak sistemin kararlı çalışabilme güvenilirliği artırılmıştır.

Tez kapsamında, Bursa Sanayi TM. 154 kV A barasına, 11,5/34,5 kV yükseltici transformatör, 1.75 km uzunluğunda 3x(2x300 mm² Cu) XLPE kablo ve yine 33,6/154 kV yükseltici güç transformatörü üzerinden bağlı, 36 MVA gücündeki senkron generatörün küçük işaret kararlılığı ve geçici hal kararlılığı analizi yapılacaktır. Küçük işaret analizi, güç sisteminin doğrusal olmayan modelinin sürekli çalışma noktasında lineerleştirilmesi ile elde edilen Heffron-Phillips modeli yardımıyla; geçici hal kararlılığının analizi ise durum denklemleri yardımıyla

yapılacaktır. Bozucu etkisiyle oluşan rotor hızı salınımlarının genliğini azaltacak ve en kısa sürede sönümleyecek Güç Sistemi Dengeleyicisi optimal parametreleri; *Genetik Algoritma*, *Parçacık Sürüşü Optimizasyonu* ve *Yapay Arı Kolonisi Algoritma*'sı kullanılarak elde edilecektir. Algoritmaların performansları, optimizasyonların sonunda elde edilen hata değerlerin ortalaması ve standart sapması üzerinden belirlenecektir.

2. ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNİN TANITILMASI

Elektrik enerji sistemleri,

- Üretim sistemleri,
- İletim sistemleri,
 - Üst iletim sistemleri (Extra high voltage),
 - Alt iletim sistemleri (High voltage),
- Dağıtım sistemleri (Medium voltage),

olarak üç ana gruptan oluşmaktadır.

2.1 Enerji Sistemlerinin Ana Yapısı

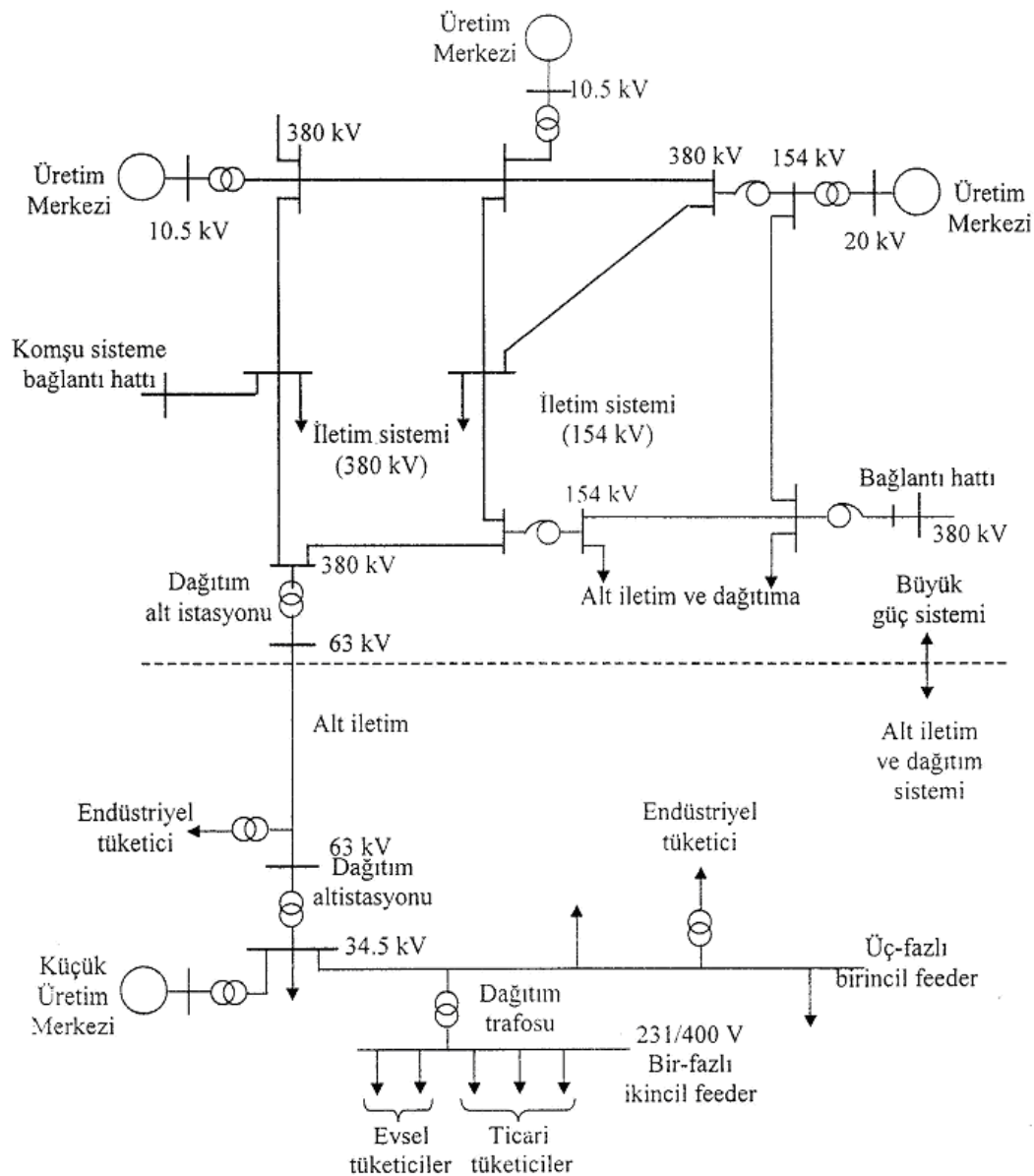
Elektrik enerjisi santrallerdeki generatörler tarafından üretilmekte, üretilen elektrik enerjisinin gerilimi generatör yükseltici trafolar ile yükseltilerek, alt veya üst iletim sistemlerine verilerek şehirler, bölgeler ve ülkeler arasında iletilmekte, tüketim bölgelerindeki indirici transformatörler ile de gerilim düşürülerek, dağıtım sistemleri beslenmektedir.

Genelde generatör çıkış gerilimleri 12-36 kV, alt iletim sistemi 72,5-145-170 kV, üst iletim sistemi 245-420-525-765 kV olarak standardize edilmiştir [5].

Türkiye’deki Elektrik Santrallerinde generatör çıkış gerilimleri 10,5-11,5-13,8-15-15,8-20,4 kV olarak değişkenlik arz etmekte, alt iletim sistemleri 63-154 kV, üst iletim sistemleri ise 380 kV olarak kullanılmaktadır. Dağıtım sistemlerinde geçmiş yıllarda 10,5-15,8-30-31,5-34,5 kV gerilim seviyelerine rastlanmakla beraber, TEİAŞ son on beş yıldır dağıtım sistemleri orta gerilim seviyesini 33,6 kV olarak standardize etmeğe başlamış ve de Elektrik Teçhizatı Şartnamelerinde gerekli değişiklikler yapıldığından önemli mesafeler alınmıştır [6].

Önümüzdeki yıllarda alt iletim sisteminde eski tesislerde halen kullanılan 63 kV gerilim seviyesinin de terk edilerek, sadece 154 kV gerilim kademesinin kullanılması, üst iletim sistemlerinde ise 380 kV gerilim kademesinin kullanımına

devam edilmesi, dağıtım sistemlerinde ise 33,6 kV gerilim seviyesinin yaygın olarak kullanılması ve standardize edilmesi planlanmıştır [6]. Şekil 2.1’de Elektrik enerji sistemlerinin ana ekipmanları görülmektedir.



Şekil 2.1 : Elektrik enerji sistemlerinin ana yapısı [7].

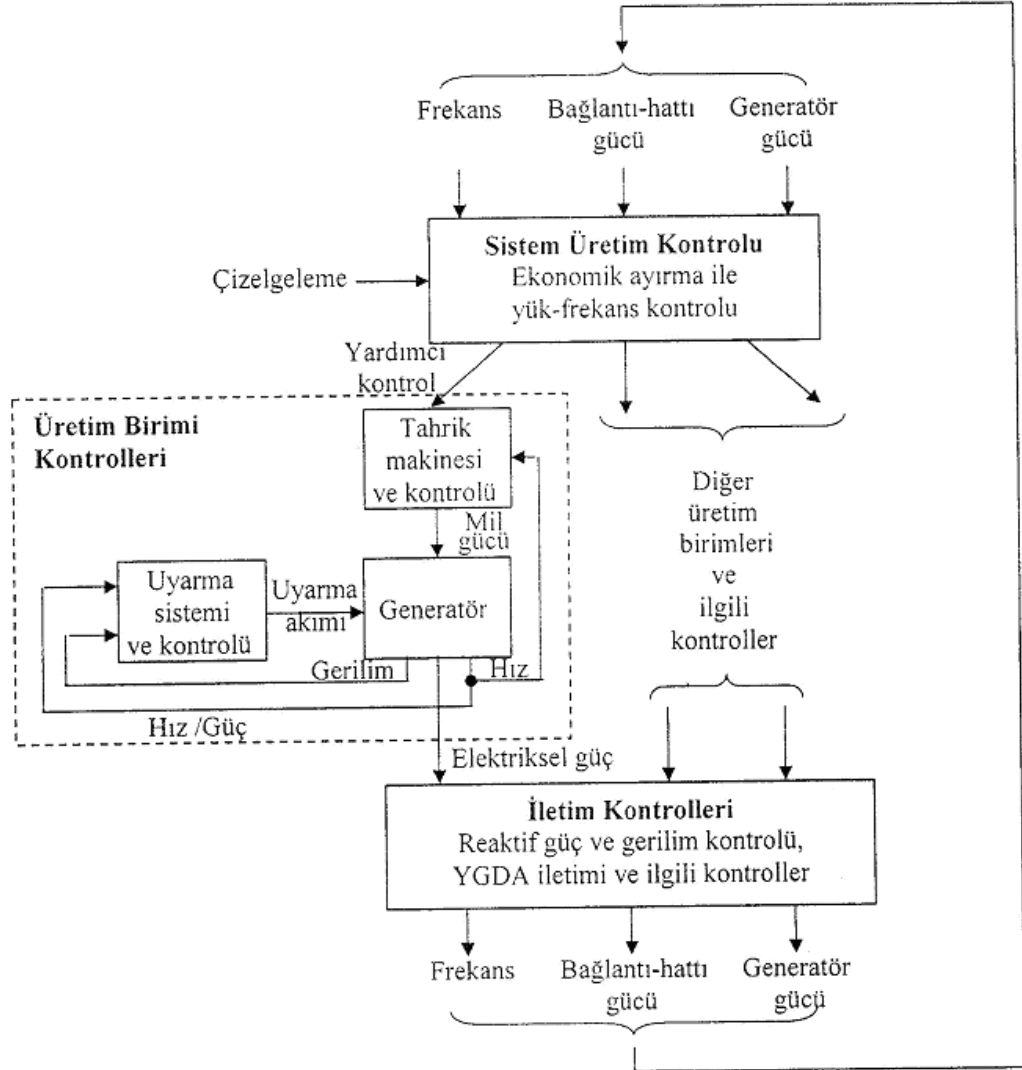
2.2 Enerji Sistemlerinin Kontrolü

Elektrik enerji sistemlerinden beklenen, mevsim koşulları ve arıza şartlarına bağlı olarak değişen yük talebinin santrallerde üretilmesi, yüksek güvenilirlikle iletilmesi, dağıtılması, kesintisiz olarak da tüketicilerin kullanımına sunulmasıdır.

Üretilen, iletilen ve dağıtılarak tüketime sunulan elektrik enerjisinin kalitesi,

- Güvenilir ve kesintisiz olmasına,
- Gerilim ve frekansın standart ve yönetmenliklerin belirlediği sınırlar içinde tutulmasına,

bağlı olup bu işlevleri sağlayan modern elektrik enerji sistemlerinin kontrol mekanizmaları Şekil 2.2’ de gösterilmiştir [7].



Şekil 2.2 : Elektrik enerji sistemlerinin kontrolü [7].

Şekil 2.2 ‘de enerji sistemleri ve onların alt sistemlerinin kontrolleri gösterilmektedir. İşletmedeki üretim, iletim, dağıtım alt sistemlerinin kontrolünün esası, öncelikle yerel olarak kendi kontrol ekipmanları ile otomatik veya el ile (manuel) kontrol edilmesidir.

Üretim ünitelerindeki türbinlerde hız regülatörleri ile

- Hız kontrolü (frekans),
- Yük kontrolü (MW),
- Termik ünitelerde yanma, sıcaklık, basınç, akışkan (buhar) kontrolü,
- Hidrolik ünitelerde akışkan (su) kontrolü,
- Vibrasyon kontrolü, vb.

yapılmaktadır.

Üretim ünitelerindeki generatörlerde gerilim regülatörleri ile,

- Gerilim kontrolü,
- MVar veya güç faktörü kontrolü

yapılmaktadır.

İletim sistemlerinde gerilim ve enerji nakli kontrolünde, statik VAr kompensatörleri, senkron kondenseler, seri kapasitörler, şönt reaktörler, gerilim regülasyonu yapan kademe şalterli transformatörler, faz kaydırıcı transformatörler ve yüksek gerilim doğru akım enerji nakli kontrolörleri kullanılmaktadır. Kullanılan bu ekipmanlar normal işletme koşullarında ve arıza hallerinde iletim sisteminin dinamik performansını olumlu yönde etkilemekte ve sistemin güvenilirliğini artırmaktadır.

Dağıtım sistemleri kontrolünde de otomatik veya el ile (manuel) gerilim regülasyonu yapan transformatörler, harmonik filtreli VAr kompensatörleri, şönt kapasitörler kullanılmaktadır.

2.2.1 Enerji sistemlerinin işletilmesi

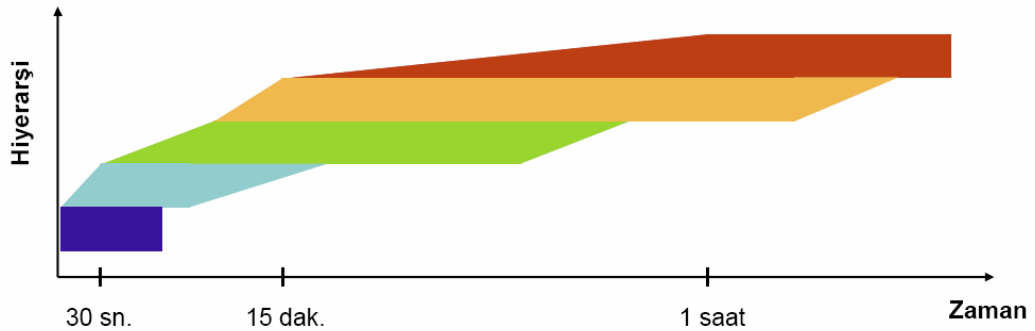
Türkiye’de enterkonnekte sistemi TEİAŞ MYTM ve BYTM’lerince izlenmekte, toplanan veriler otomatik üretim kontrolü programında değerlendirilmekte, ekonomi, sistem kısıtları ve kayıplar da dikkate alınarak üretim-tüketim dengesi temin edilmektedir. Yine sistemin işletilmesi, gözlenmesi, uyarı ve acil durum hallerinde ilk tedbirlerin alınması, arızaları müteakip sistemden çıkmış olan üretim ünitelerinin devreye aldırılması, enerji nakil hatlarının sisteme bağlanması talimatlarının verilmesi, üretim- tüketim dengesinin tekrar sağlanması ve sistemin normal işletme haline döndürülmesi TEİAŞ MYTM ve BYTM’leri tarafından yapılmaktadır.

Enerji sistemlerinin kararlı çalışabilmesinin esasını, 24 saat boyunca günün ihtiyaçlarına bağlı olarak üretim- tüketim dengesinin karşılanması oluşturur. Gün

içinde üretim ve tüketim dengesini olumsuz etkileyecek sistemdeki teçhizat arızaları, üretim ünitelerinin devreden çıkması, beklenmedik ek yüklerin gelmesi veya sistem arızalarına bağlı olarak yük atılması (Mevsim koşullarındaki ani değişiklikler, fırtına, buzlanma, yıldırım vb. atmosferik olaylar) sistemin bütünlüğünü etkileyecek olup, kararlı çalışma hali kaybolacak, sistemde ani veya yavaş-yavaş gerilim ve frekans değişimleri gözükcektir.

Üretim ve TEİAŞ iletim sistemleri N-1 kısıtlılık halinde çalışmaktadır [4]. Sistemdeki bir üretim bloğunun ve bir iletim hattının devreden çıkması ile sistem normal işletme halinde kalmakla beraber, mevsim koşullarındaki ani değişiklikler, fırtına, buzlanma, yıldırım vb. atmosferik olaylar nedeni ile iletim sistemdeki teçhizat arızaları, çok sayıda üretim ünitelerinin devreden çıkması, beklenmedik ek yüklerin gelmesi veya iletim sistem arızalarına bağlı olarak yük kaybı ile N-1 kısıtlılık halinin dışına çıkıldığında, üretim ve tüketim dengesi bozularak, sistemin bütünlüğü etkilenmekte olup, kararlı çalışma hali kaybolmakta, sistemde ani veya yavaş-yavaş gerilim ve frekans değişimleri oluşmaktadır.

Sistem frekansının 49 Hz. üstü seviyelerde tutulabilmesi ve ani frekans düşmelerinin önlenmesi için frekans kontrolüne yönelik uygulama esasları, Şekil 2.3'te gösterilmektedir [2].



Şekil 2.3 : Frekans kontrolü uygulama hiyerarşisi [2].

- Anlık talep kontrolü: Sistem frekansı ani olarak 49 Hz. ve altına düştüğünde sistem oturmalarının önlenmesi için tüketim tesisleri fider kesicileri, 4 kademedeki 49-48,8-48,6-48,4 Hz. de düşük frekans röleleri ile gecikmesiz açtırılır [8].
- Primer frekans kontrolü: Sistem frekansının yavaş-yavaş düşmesi veya yükselmesi durumunda, ünite aktif çıkış gücü hız regülatörü ile otomatik

artırılır veya azaltılır. Üretim santrallerinde primer frekans kontrol rezerv miktarı % 1'i olarak belirlenir. Sistemdeki ± 5 -10 mHz frekans değişimlerinde, hidrolik santraller 4 sn. diğer santraller 2 sn. gecikme ile tepki verir. Sistem frekansındaki ± 200 mHz değişimlerde, 15 sn. içinde rezerv miktarının % 50'si, 30 sn. içinde tamamı karşılanır. Üniteler karşıladıkları primer frekans rezervini 15 dk. müddetle sürdürürler [8].

- Sekonder frekans kontrolü: TEİAŞ Milli Yük Tevzi Merkezindeki otomatik üretim kontrolü sisteminden gönderilen sinyaller ile, üretim ünitelerinin aktif çıkış gücü artırılır veya azaltılır. Maksimum tepki süresi 30 sn. olup, sekonder frekans kontrol rezervinin tamamı 15 dk. içinde karşılanır. Rezervuarlı hidrolik üniteler saniyede nominal gücün %1,5-2,5'i, termik üniteler ise yakıt tipine bağlı olarak dakikada nominal gücün % 1-6'sı arasında yüklenebilir. Sekonder frekans kontrol rezerv miktarı, primer frekans kontrol rezerv miktarından az olmamak üzere, gün öncesinde arıza, bakım, mervsim koşulları vb. bağlı olarak belirlenir. Sekonder frekans kontrolü ile öncelikle, primer frekans kontrol rezervinin serbest bırakılması hedeflenir [8].
- Tersiyer frekans kontrolü: Sistem frekansı sapmalarının düzeltilmesine ve sistem kararlılığının sağlanmasına katkıda bulunmak için, devredeki ünitelerden alınabilen ek üretim kapasitesi ve/veya devrede olmayıp kısa sürede devreye alınabilen üniteler ve/veya tüketim talebinin düşürülmesi ile yedek oluşturulur. Tersiyer frekans kontrolüne katılacak üniteler 15 dakikada istenilen yedek rezervi karşılamalıdır. Tersiyer frekans kontrolü ile sekonder frekans kontrol rezervinin serbest bırakılması esastır [8].
- Bekleme yedekleri: Devre harici bir üretim tesisinin TEİAŞ MYTM talimatı doğrultusunda, üretim sistemi işletmecisi tarafından belirlenen sürede devreye girmesiyle sağlanan rezervlerdir [8].

2.2.2 Sistem kararlılığının sağlanması ve işletme kriterleri

Sistem kararlılığının sağlanması ile ilgili olarak üretim, iletim, dağıtım sistemlerinin planlanması, tasarımı, tesisi ve devreye alınması EPDK'nın denetiminde T.C Enerji Bakanlığı ve TEİAŞ'ın ortaklaşa çalışmaları ile TEİAŞ Şebeke Yönetmeliği kapsamında yürütülür ve işletilir.

Elektrik güç sistemlerinin kararlılığı, sistemdeki geçici arızaların giderilmesi ve geçici şartlarının sönümlenmesini takiben, gerilim ve frekansın doğal veya güç sistemi dengeleyicileri normal işletme sınırları içinde tutulması, üretim-tüketim dengesinin tekrar sağlanmasıdır.

Sistemdeki bir veya daha fazla ekipmanın hasarlanması, devre dışı kalması hallerinde ise sırası ile primer, sekonder, tersiyer frekans kontrolü ve bekleme yedeklerinin devreye alınması ile sistem kararlılığının temin edilmesi, ani frekans düşmelerine bağlı olarak sistem kararlılığının temin edilememesi hallerinde ise, Enterkonnekte Sistemin bölgesel veya tamamen oturmaması için, düşük frekans röleleri ile kademeli olarak yük atılmasıdır.

2.2.2.1 Normal işletme şartları

TEİAŞ İletim sisteminin nominal gerilimleri 380 kV, 154 kV ve 66 kV'dur. Normal işletme koşullarında; 380 kV'luk iletim sistemi 340 kV ile 420 kV, 154 kV'luk iletim sistemi ise 140 kV ile 170 kV arasında çalıştırılır. 66 kV ve altındaki iletim sistemi için gerilim değişimi $\pm \% 10$ 'dur [8].

Sistemdeki arızalı generatör, iletim hattı, transformatör ve bara arızaları koruma röleleri ile minimum gecikme zamanında temizlenir. Sistem frekansı $49.8 \text{ Hz} \leq f \leq 50.2 \text{ Hz}$ aralığındadır. Sırası ile primer, sekonder frekans kontrol yedekleri otomatik olarak kendiliğinden devreye girer. $49.5 \text{ Hz} \leq f \leq 50.5 \text{ Hz}$ aralığı kabul edilebilir işletme koşullarıdır [8].

Sistemdeki iletim hatlarındaki geçici faz toprak arızaları ve çok fazlı arızalar 0,1-0,3 ile 0,5 sn. içinde temizlenir. Santral baralarına bağlı olan kritik havai iletim hatlarındaki arızalar, her iki ucundaki mesafe koruma röleleri (21 Distance relay) arasında sinyal bilgisi iletişimi yapılarak (PLC: Power line carrier) 380 kV havai iletim hatlarında mesafe koruma rölesinin çalışması, sinyal bilgisi iletişimi, kesici açma zamanı dahil azami 120 milisaniye, 154 kV havai iletim hatlarında ise yine röle çalışması, sinyal bilgisi iletişimi, kesici açma zamanı dahil azami 140 milisaniyede temizlenir [8].

154 kV havai iletim hatları arıza arkının sönme süresi olan 10-15 periyot, 380 kV hatlar ise 20-50 periyotluk gecikme ile otomatik tekrar kapama röleleri tarafından (79 Automatic reclosing relay) kesicileri kapatılarak, enterkonnekte sisteme bağlanır [9]. Arızanın tek fazlı olarak açılıp, otomatik olarak tekrar kapanması halinde, iletim

hattından aktarılan gücün % 70-80'inin sağlam kalan iki fazdan aktarılmaya devam etmesi, sistem kararlılığına çok önemli fayda sağlar. İletim hatlarında arıza temizlenme sürelerinin kısa olması ve hatların otomatik tekrar kapayıcılar ile (recloser) mümkün olan en kısa sürede kapatılması, sistem kararlılığını iyileştirmektedir.

Otomatik tekrar kapayıcı ekipmanları devre harici olan hatlar ise, arızalar kalıcı değil ise Yük Tevzi Müdürlükleri talimatıyla el ile (manuel) tekrar sisteme bağlanır.

380 kV ve 154 kV yer altı kablolarında ise, pilot iletken diferansiyel koruma rölesi (*87L Pilot wire differential relay*) kullanılarak arızalar gecikmesiz azami 100 ms.de arızanın tek faz veya çok fazlı olmasına bakılmaksızın, üç fazlı olarak temizlenir. Otomatik tekrar kapama yapılmaz [8]. Kablo izolasyon testleri yapılarak, arızanın giderilmesini müteakip (kablo başlığı, kablo eki vb. arızalar) Yük Tevzi Müdürlükleri talimatıyla el ile (manuel) tekrar sisteme bağlanır.

Enterkonnekte sistemde hatlardaki arızaların minimum sürede giderilmesi ve arızaların geçici olması halinde otomatik tekrar kapama röleleri ile tekrar devreye alınması, enerji sistemlerinin güvenilirliğini ve kararlılığını artırmaktadır.

2.2.2.2 Kritik işletme şartları

İletim sistemdeki hatların ve transformatörlerin bir kısmı arıza ve aşırı yüklenme nedeni ile enterkonnekte sistemden kopmuş, enerjisiz kalmıştır. Üretim-Tüketim dengesi bozulmuştur. Sistem frekansı $49 < f < 49.5 \text{ Hz}$ ve $50.5 \text{ Hz} < f \leq 51.5 \text{ Hz}$ kritik işletme aralığındadır [8].

Tersiyer frekans kontrolü ve bekleme yedekleri el ile (manuel) devreye alınmıştır. Üretim-tüketim dengesi temin edilmeğe çalışılmıştır. Gerilim normal işletme sınırları dışına çıkmıştır [8].

2.2.2.3 Arıza şartları

Üretim-tüketim dengesi tamamen bozulmuştur. Sistem frekansı ani olarak 49 Hz. ve altına düşmüştür. Sistem oturmalarının önlenmesi için tüketim tesisleri fider kesicileri, 4 kademedeki 49 - 48,8 - 48,6 - 48,4 Hz.de düşük frekans röleleri ile gecikmesiz açtırılmıştır [8].

Sistemdeki salınım nedeni ile frekans $f < 47.5 \text{ Hz}$ veya $f > 51.5 \text{ Hz}$ aralığındadır [8]. Sistemde bölgesel oturmalar olmuştur.

Merkezi ve bölgesel yük tevzi merkezleri tarafından, arıza nedeni ile sistemden çıkmış olan üretim üniteleri, enerji nakil hatları ve dağıtım sistemleri el ile (manuel) devreye aldırılmış, üretim-iletim-tüketim dengesi tekrar temin edilmiş, sistemin tekrar normal işletme haline döndürülmüştür.

3. ENERJİ SİSTEMLERİ KARARLILIĞININ TANITIMI

Bu bölümde enerji sistemleri kararlılık problemlerinin genel tanıtımı, sınıflandırılması, fiziksel kavramlar ve ilgili terimlerin tanımı yapılacaktır. Enerji sistemlerinde kararlılık problemlerinin oluşumu, analiz yöntemlerinin gelişimi ve çözüm yöntemleri incelenecek, kararlılık problemlerinin fiziksel yorumları basit bir düşünce mantığı ile açıklanacaktır.

3.1 Temel Kavramlar ve Tanımlar

Güç sistemi kararlılığı, normal işletme koşullarında çalışan enterkonnekte sistemin, bozucu bir etki sonrası, tekrar normal işletme koşullarına dönebilme yeteneğidir [3].

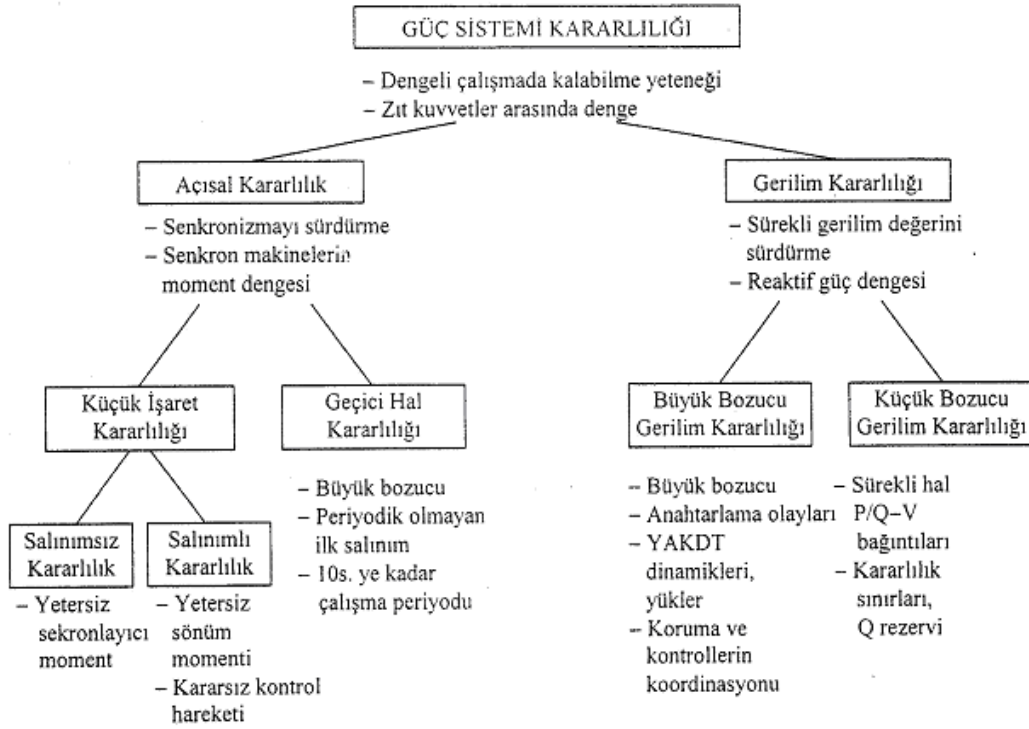
Sistem işletmesinin güvenilirliği, büyük ölçüde bütün senkron makinaların senkronizmada kalması veya senkron çalışabilme koşullarının sürdürülmesine bağlıdır. Güç sisteminin kararlı çalışabilmesi için türbinin ürettiği mekanik güç ile generatörün ürettiği elektriki güç değerleri arasında denge sağlanmalıdır. Bu ilişkiye üretim-tüketim dengesi de denilmektedir.

Güç sisteminde yük değişimi veya arızayı müteakip, üretim-tüketim dengesi bozulur; frekans ve gerilim değerleri değişir. Sistemdeki kontrol ekipmanları yardımıyla, sistem kararlı hale dönebilir veya bir veya çok sayıda senkron makine senkronizmadan çıkarak, normal işletme koşullarına dönülmesi mümkün olmayabilir [10].

Güç sistemi kararlılık problemlerinin sınıflandırılması, Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

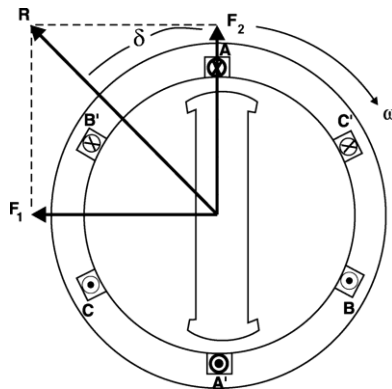
3.2 Rotor Açısı Kararlılığı

Rotor açısı kararlılığı, senkron makinaların herhangi bozucu etki sonrasında senkronizmada kalma yeteneği olarak tanımlanabilir [3].



Şekil 3.1 : Güç sistemi kararlılık problemlerinin sınıflandırılması [7].

Enterkonekte güç sistemlerine bağlı senkron makinaların statorlarında, sistemle tamamen aynı yönde ve aynı elektriksel hızda bir döner alan oluşur. Rotorlardaki sargılarının doğru akımla uyarılması ile oluşan elektriksel döner alanlar ise, stator döner alanı ile aynı yönde ve aynı hızla, stator döner alanlarını takip etmelidir [10]. Döner alanları oluşturan; stator ait manyetomotor kuvveti F_1 , rotora ait manyetomotor kuvveti F_2 ile bileşke kuvvet R arasındaki δ rotor açısı ilişkisi, Şekil 3.2’te gösterilmiştir.

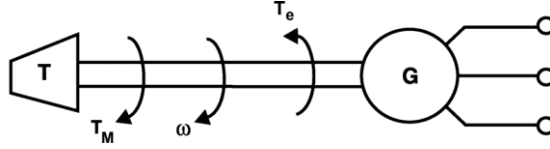


Şekil 3.2 : Senkron generatöre ait manyeto motor kuvvetleri ve rotor açısı [11].

Kararlı hal çalışmasında, elektriki güç çıkışı mekanik güç girişi ile dengelenmiştir. Türbin mili tarafından, generatör miline aktarılan mekanik güç, bir moment ve dönüş hızı oluşturur [12]:

$$P_M = T_M \omega \quad (3.1)$$

Türbinin oluşturduğu mekanik moment yönü, elektriki alan dönüş yönü ile aynı yöndedir. Generatör tarafından miline uygulanan moment yönü ise, elektriki alan yönüne zıt olup, momentler ve yönleri Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Mekanik ve elektriki momentlerin miline uygulanması [11].

Şekilde

T_M Mekanik moment,

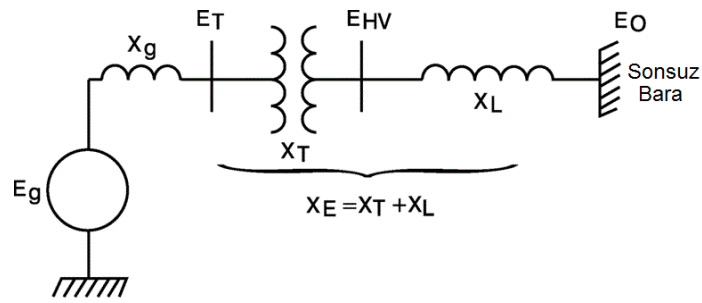
ω : Açısal hızı,

T_e : Elektriki momentini

temsil etmektedir.

Sistemdeki bir arıza veya ani bir yük değişikliği neticesinde, generatörün elektriki çıkış gücü değişir. Generatörün elektriki çıkış gücü hızlı değiştiği halde, türbinin mekanik çıkış gücü daha yavaş değişmektedir. Güç dengesinin geçici olarak bozulması miline uygulanan momentlerin değişmesine sebep olduğundan, dengesizliğin yönüne bağlı olarak rotor hızlanır veya yavaşlar.

Şekil 3.4'de iletim sistemi üzerinden, sonsuz baraya bağlı bir generatör gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Sonsuz baraya bağlı senkron generatör [11].

Burada,

E_T : Generatör çıkış gerilimini,

X_g : Generatör reaktansını,

E_g : Generatör iç gerilimini,

E_{HV} : Generatör yükseltici trafosunun yüksek gerilim tarafındaki gerilimi,

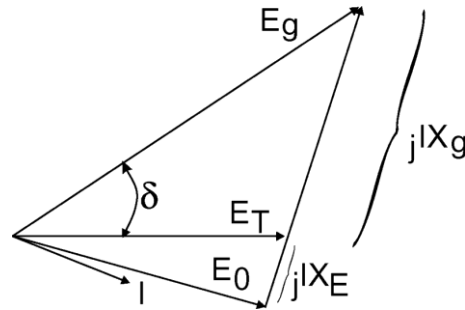
E_O : Sistem gerilimi,

X_E : Harici toplam reaktansını temsil etmektedir.

Generatörün E_T çıkış gerilim, X_T reaktansı ile temsil edilen generatör yükseltici trafosu üzerinden, sistem gerilimine yükseltilir. Generatör yükseltici trafosunun, yüksek gerilim tarafı, X_L reaktansı ile temsil edilen iletim hattı ile sonsuz baraya bağlanır. Kararlı hal çalışmasında generatör çıkış gücü (3.2) denklemi ile belirlenir [12].

$$P_e = \frac{E_g E_T}{X_g} \sin \delta \quad (3.2)$$

Burada δ generatör çıkış gerilimi ile makinanın iç gerilimi arasındaki rotor açısıdır. Transfer edilen gücün artmasına bağlı olarak, δ rotor açısı büyür. Sistemde oluşan bir arıza, transfer edilen elektriki güç akışında değişikliğe sebep olur. Sonuçta δ rotor açısı da değişir. Bu durum Şekil 3.5'te grafik olarak görülmektedir.



Şekil 3.5 : Sonsuz baraya bağlı generatör fazör diyagramı [11].

Sistemde oluşan bir kısa devre arızasında, arıza akımının artması ile generatör çıkış geriliminin düşmesi ve sistem arızasının endüktif yük özelliği göstermesi nedeni ile generatörün güç çıkışı (MW) azalır. Generatörün rotor açısının büyümesi, senkron çalışma sınırlarının dışına çıkması, senkronizasyon şartlarının kaybolması ile senkronizasyon koruma rölesi (78 Out of step relay) çalışır, generatörü enterkonnekte sistemden ayırır ve üretim kaybına sebep olur.

Arızadan daha az etkilenen enterkonnekte sistemdeki diğer generatörlerin hız regülatörleri, kontrol ettikleri generatörlerin üretimlerini artırarak, üretim kaybını karşılamaya ve sistemin tekrar kararlı hale gelmesini sağlamaya çalışır. Sistem

kararlı hale getirilemez ise düşük frekans rölelerinin çalışması ile sistemden kademeli olarak yük atılmağa başlanır [8].

Rotor açısı kararlılığı, küçük işaret kararlılığı ve geçici hal kararlılığı olarak iki başlık altında incelenebilir.

3.2.1 Küçük işaret kararlılığı

Küçük işaret kararlılığı, sistemdeki küçük bozulmalarda senkron generatörün senkronizmayı koruyabilme yeteneği olarak tanımlanır [3]. Sistemdeki üretim ve yükteki küçük değişiklikler, bu türden bozulmaları sürekli oluşturmakta, yeterince sönümleme momenti olmadığında ise, rotor açısı salınımlarının genliği büyümektedir [7]. Enterkonnekte sisteme bağlı yüksek kazançlı otomatik gerilim regülatörleri ile donatılmış generatörler, oluşan bu rotor açısı salınımlarının sönümlemesinde yetersiz kalabilir [11].

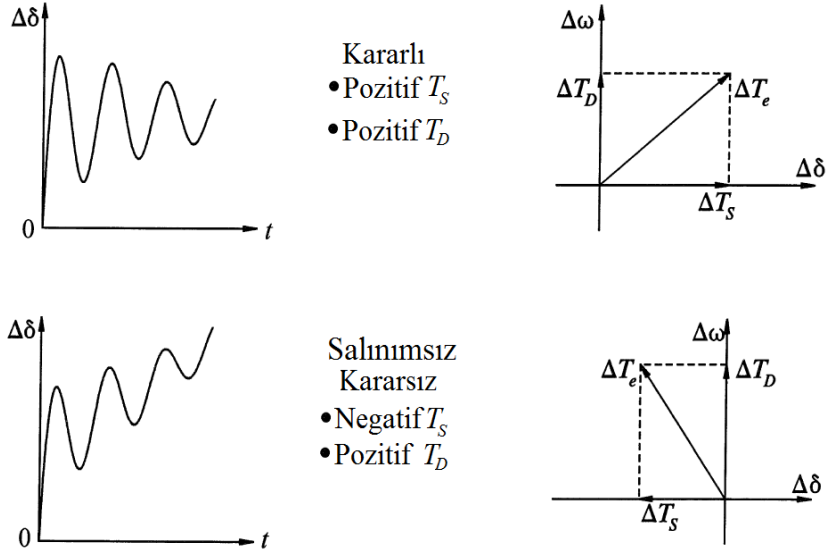
Yüksek performanslı uyarma sistemleri ile sönümleme momentinin azaltılmasının etkilerini daha iyi anlamak için, aşağıda (3.3) no.lu denklemdeki,

$$\Delta T_e = K_s \Delta \delta + K_D \Delta \omega \quad (3.3)$$

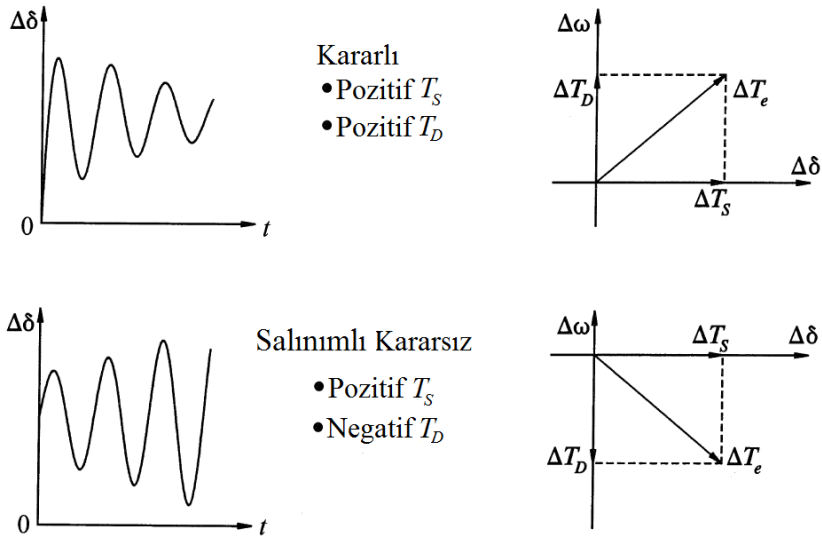
ΔT_e elektriki moment değişimini, senkronizm momenti değişimi ve sönümleme momenti değişimi olarak iki bileşene ayırılım [7].

1. Uyarma akımı artırıldığında, rotor ve stator akıları arasındaki senkronizm momenti büyüdüğünden, δ rotor açısı küçülür ve senkronizmadan çıkma riski azalır. Yeterli senkronizasyon momenti sağlanamaz ise rotor açısındaki sürekli artma, küçük işaret kararlılığını bozar.
2. Uyarma akımı uygulamasının öne alınması veya geciktirilmesi ile de sönümleme momenti değiştirilir. Otomatik gerilim regülatörlerinin çalışmasındaki gecikmelerden veya yetersizliğinden, sönümleme momenti eksikliği ile rotor salınımlarının genliği artar ve küçük işaret kararlılığı kaybolur.

Sistemdeki küçük bozulmalara, sistemin doğal tepkisi Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Enterkonnekte sisteme bağlı generatörlerde, işletme tecrübeleri üç tip küçük işaret salınımları olduğunu göstermektedir [11].



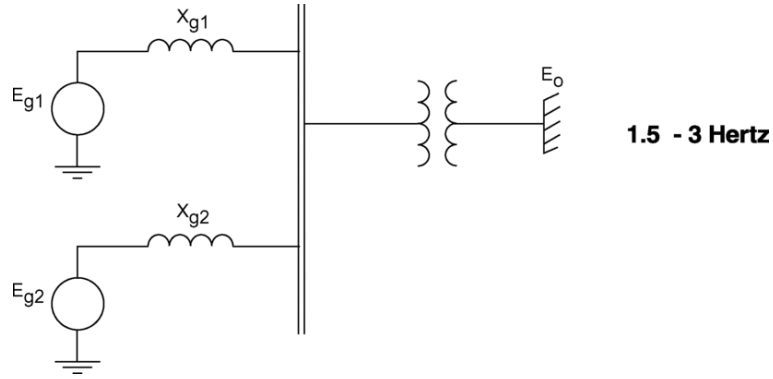
Şekil 3.6 : Sabit uyarma gerilimi ile sistemdeki küçük bozulmalara, sistemin doğal tepkisi [7].



Şekil 3.7 : Uyarma kontrolü ile sistemdeki küçük bozulmalara, sistemin doğal tepkisi [7].

3.2.1.1 Üniteler arası salınım

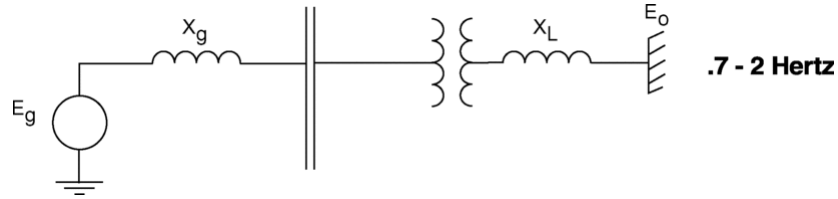
İki veya daha fazla senkron generatör aynı santralda bağlı veya şebekedeki diğer bir santralin yakınındadır (Şekil 3.8). Senkron generatörlerde ve şebekedeki salınımların frekansı 1,5-3 Hz arasında değişmektedir [11].



Şekil 3.8 : Generator üniteleri arasındaki salınımlar [11].

3.2.1.2 Bölgesel salınım

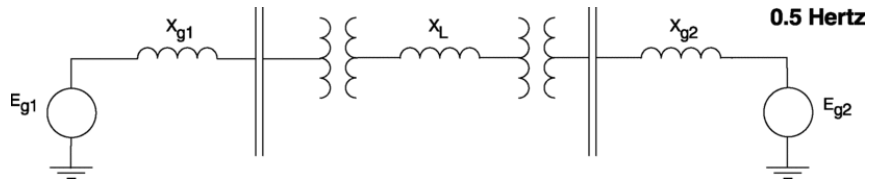
Bir santraldeki bir veya daha fazla senkron generatörün kendi aralarında, nispeten daha güçlü bir santral veya yük merkezine karşı salınımlarıdır (Şekil 3.9). Bu salınımların frekansı 0,7-2 Hz. arasında değişmektedir. Büyük tüketimi olan yüksek reaktanslı iletim sistemlerinde bu salınımlar, bazı problemlere sebep olmaktadır [11].



Şekil 3.9 : Bölgesel salınım [11].

3.2.1.3 Bölgeler arası salınım

Enterkonnekte sisteme bağlı bir veya daha fazla senkron generatörün kendi aralarında enterkonnekte sisteme karşı ya da enterkonnekte sistemin kendi aralarındaki salınımlardır (Şekil 3.10). Enterkonnekte sistemler güçlü olduğundan salınımların frekansı 0,5 Hz. den daha küçüktür [11].



Şekil 3.10 : Bölgeler arası salınım [11].

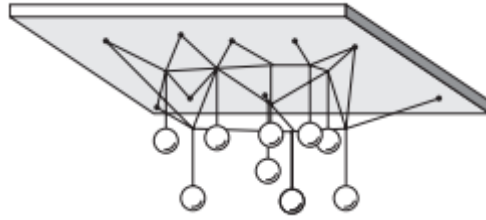
3.2.2 Geçici hal kararlılığı

Geçici hal kararlılığı, güç sisteminin büyük bir bozucu etkiye maruz kalmasından sonra, senkron generatörün senkronizmayı koruyabilme yeteneği olarak tanımlanır [3]. Bu bozucu etkilere enerji iletim hatlarındaki kısa devreler, büyük yük değişimleri

örnek olarak verilebilir. Geçici hal kararlılığı analizinde bozucu etkiden sonraki 3-5 saniyelik süre incelenir. Sistemin karmaşıklığına göre bu süre 10-20 sn çıkarılabilir [3].

Enterkonnekte sistemdeki generatörler arıza hallerinde, Şekil 3.11’de gösterildiği gibi enterkonnekte sisteme lastik bantlar ile bağlı ağırlıklar gibi davranır.

Türbin-generatörlerin döner ataletleri ağırlıklar ile iletim hatlarının empedansları lastik bantlar ile temsil edilmektedir. Lastik bantlar ile bağlanmış ağırlıklardan birkaç tanesi çekilip, bırakılır ise bir salınım başlar. Sadece tek bir ağırlık ile denge bozulmuş olsa bile, bütün ağırlıkların salınımı başlamış olur. Sönümlenme özelliklerine bağlı olarak nihayetinde sistem tekrar dengeye gelir. Salınımların sıklığı ağırlıkların kütlelerine ve lastik bantların esnekliğine bağlıdır. Bunun gibi sistemdeki geçici arızalarda elektriki momentteki değişimlerin, mekanik moment ile dengelenememesi sonucu, generatör/şebekede salınımlar beklenebilir [3].



Şekil 3.11 : Lastik bant benzerliği [12].

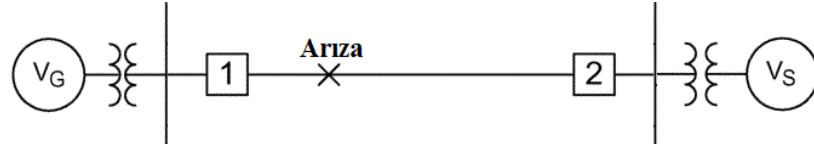
3.3 Gerilim Kararlılığı

Gerilim kararlılığı normal işletme süresince veya bir arıza sonrası enterkonnekte sistemdeki baralarda gerilimlerin kabul edilebilir değerlerde kalabilme yeteneğidir. Sistemdeki reaktif güç ihtiyacının mahallinde yerel olarak karşılanması esas olup, bu ihtiyacın santrallerde generatörler tarafından üretilmesi, iletim hatlarında taşınması ve tüketim merkezlerine ulaştırılması, iletim hatlarındaki yük açısını artıracağından, gerilim kararsızlığına sebep olur [3].

Enterkonnekte sistemdeki bir baraya giren reaktif güç bara gerilimini artırır ise o bara için gerilim kararlı, baraya giren reaktif güç bara gerilimini azaltır ise, o bara için gerilim kararsızdır. Diğer bir deyişle V-Q duyarlılığı her bara için pozitif ise sistem gerilim olarak kararlı, V-Q duyarlılığı en azından bir bara için negatif ise sistem gerilim kararsızdır [7].

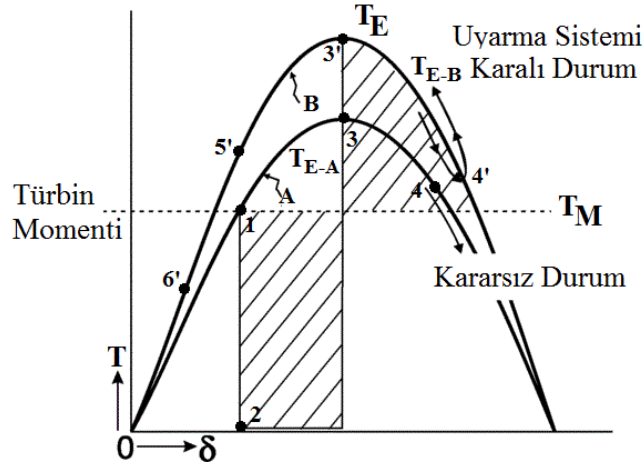
4. UYARTMA SİSTEMLERİNİN KARARLILIĞA ETKİLERİ

Bu bölümde senkron generatörün geçici hal davranışı eşit alanlar ilkesiyle incelenerek, uyarma sistemin kararlılık üzerinde etkisi açıklanacaktır. Şekil 4.1’ de senkron generatörün tek bir iletim hattı üzerinden sonsuz baraya bağlı olduğu gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Sistem [11].

İletim hattı belli bir süre üç fazlı kısa devreye maruz kaldıktan sonra arıza temizlenip hat devreye tekrar alınmıştır.



Şekil 4.2 : Uyarma sisteminin rotor açısı kararlılığına etkisi [11].

Güç sistemi kararlılığının sürdürülmesi, arızaların temizlenme hızına, uyarma sisteminin tepki hızına ve kabiliyetine bağlıdır. Şekil 4.2’ de uyarma sisteminin olmadığı durum A, uyarma sisteminin bulunduğu durum B eğrisinde, moment/rotor açısı arasındaki ilişki gösterilmiştir [11]. Sistemin davranışı (4.1) ve (4.2) deki salınım denklemleri yardımıyla daha iyi ifade edilebilir.

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (4.1)$$

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (4.2)$$

(4.1) denklemin her iki tarafının zamana göre türevinin alınmasıyla (4.3) denklemi elde edilir. Elde edile bu denklem (4.2) ile birleştirildiğinde (4.4) denklemi elde edilir.

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (4.3)$$

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d\Delta\omega}{dt} = T_m - T_e \quad (4.4)$$

Burada,

δ : Rotor açısını [rad]

ω_0 : Rotorun açısal hızının baz değerini [rad/sn]

T_m : Mekanik momenti [pu]

T_e : Elektriki momenti [pu]

H : Eylemsizlik sabitini [MW.sn/MVA]

ifade etmektedir.

Denklemler incelendiğinde mekanik moment, elektriki momentten büyük olduğunda rotor hızlanır, buna bağlı olarak rotor açısı değişir. Tam tersi durumda ise, mekanik moment elektriki momentten az olduğunda, rotor hızı yavaşlar ve buna bağlı olarak, rotor açısı değişir.

Eşit alanlar ilkesine göre; sistemdeki bir arıza nedeni ile elektriki moment, mekanik momentten az olduğu moment/rotor açısı eğrisi altında rotorun hızlandığı alan, rotorun yavaşladığı alandan büyükse, senkronizma kaybolur [12]. Şekil 4.2’de, uyarma sistemin olmadığı durumda (*A eğrisi*) senkron generatörün kararsız duruma gittiği gösterilmiştir. Uyarma sistemi yeterince hızlı ve uyarma kabiliyeti yüksek olduğunda, sistemdeki elektriki yükün, mekanik güçten az olduğu B moment/rotor açısı eğrisi altında rotorun hızlandığı alan, rotorun yavaşladığı alandan küçükse, ilk salınımı müteakip generatör tekrar kararlı çalışma haline dönecektir [11].

Sabit uyarma altında, generatör başlangıçta 1 no.lu noktada çalışmakta iken iletim hattında generatöre yakın bir yerde oluşan arıza sebebi ile generatörün ürettiği elektriki moment aniden sıfır olur (2 no.lu nokta). Sonuçta elektriki moment ile

türbinin mekanik momenti arasındaki fark sebebi ile generatör rotor hızı, sistemin senkron hızına göre artar ve rotor açısı (δ) büyür. Arıza temizlendiğinde, elektrikli güç, rotor açısına (δ) bağlı olarak yeniden belirlenir (3 no.lu nokta). Arızayı müteakip iletim hattı devre dışı kaldığından, iletim isteminin iletim gücü geçici olarak sıfır olur. Arıza temizlendikten sonra generatörün çıkış gücü, türbinin çıkış gücünden daha büyük olmaya başlar [11].

Arıza süresince rotorun kazanmış olduğu hızlandırıcı moment, arıza sonrası azalır ve rotor yavaşlar (4 no.lu nokta). Arıza sırasında rotorun kazanmış olduğu hızlanma momentinin arıza sonrası etkisi azaltılır ise, generatör ilk salınımı müteakip kararlı hale gelecek, işletme noktasına doğru geri dönecektir. Kazanılmış hızlandırma momentinin etkisi yeteri kadar azaltılamaz ise, generatör senkronizm 'den çıkıncaya kadar rotor açısı (δ) büyümeğe devam edecek ve senkronizasyon koruma rölesi (78 out of step relay) generatörü sistemden ayıracaktır [11].

Otomatik gerilim regülatörü (OGR) olması durumunda; generatör terminal gerilim değiştirilmesi ile generatörün elektrikli çıkış gücü, buna bağlı olarak elektrik momenti denklem (4.5) gereği değişmektedir. Kısa devre arızasına müteakip generatörün terminal gerilimi düşer ve OGR terminal gerilimi yükseltmeye çalışır, buna bağlı olarak elektrikli moment grafiğinin genliği artmış olur.

$$T_e = \frac{E_g E_r}{\omega_o X_g} \sin \delta \quad (4.5)$$

Şekil 4.2'de B eğrisi OGR'nin olduğu durumda yavaşlama bölgesinin arttığını buna bağlı olarak generatörün senkronizmadan çıkma ihtimalini azaltmaktadır.

Enterkonnekte sistemlerde geçici olarak oluşan salınımların önlenmesinde ve söndürülmesinde, yeni hızlı uyarma sistemlerinin kullanımı, önemli faydalar sağlamaktadır. Yeni uyarma sistemleri gerilim değişimlerinin sebep olduğu yük değişimlerini, eski uyarma sistemlerine göre on defa daha hızlı tanır ve uyarma akımını hemen ayarlayarak, küçük salınımların giderilmesini sağlar [11].

Generatörlerdeki rotor sargıları endüktanslarının zaman sabitlerinin yüksek olması, uyarma akımı değişim hızını sınırlamaktadır [11]. Uyarma akımları değiştirilme işlemlerinin yanlış zamanlarda yapılması, sistemdeki salınımlarının oluşumunu artırır. Bunu önlenmesi için uyarma sistemleri faz kompanzasyonu uygulanarak yanlış zamanlamanın önüne geçilir [13].

Gerilim regülatörü; generatörün uç geriliminin değişimine göre senkronizm ve s n ml me momentini değiştirir. Rotor açısının veya rotor hızının değerlerine göre bir s n ml me oluşturamaz. Bundan dolayı bazı sistem yapılandırmalarında olumsuz s n ml me momentleri üretme ihtimali olup, sistemde kararlı olmayan salınımlara sebebiyet verir [10]. Elektromekanik bu salınımların azaltılması ve olumlu s n ml me momenti üretilmesi için, OGR'ye rotor hızı veya rotorun açısı hakkında işlenmiş veriler referans olarak girilmelidir. Bu veriler Güç Sistemi Dengeleyicisi (GSD) yardımıyla elde edilir. GSD'ye ait detaylı bilgi Bölüm 5 te anlatılacaktır.

Oldukça uzun ve yüklü iletim hatlarının endüktanslarının seri kapasitör grupları ile kompanse edilmesinin, sistem kararlılığı güvenilirliğinin artırılmasına olumlu etki edeceği Denklem (4.5) den rahatça anlaşılmaktadır. Bu   z m yöntemi bilinmekle beraber, seri kapasitör banklarının tesisi yüksek maliyetler getirdiğinden, teknik zorunluluk olmadıkça her yerde kullanılmaz [14].

5. GÜÇ SİSTEMİ DENGEYİCİSİ

1950'lerden 1960'lara kadar elektrik santralleri generatör üniteleri otomatik, kesintisiz ve hızlı ayar yapan gerilim regülatörleri ile donatılmıştır. OGR ile donatılan santral sayısının artması, bu santrallerdeki türbin, generatör ve donanımlarındaki teknik özellik farklılıkları, güç sistemi kararlılığını bozan olumsuz etkiler göstermiş ve şebekede oluşan düşük genlikli ve frekanslı güç salınımları, uzun periyodlar ile devam etmiştir. Bazı hallerde bu durum enterkonnekte sistemde enerji iletimini sınırlayacak boyutlara ulaşmıştır.

Son bir kaç on yıldır sistem kararlılığı güvenilirliğinin artırılmasında, güç sistemi dengeleyicileri gerilim regülatörleri ile birlikte kullanılarak, generatörlerin uyarma akımlarının değişimi ve uygulama zamanları modüle edilerek, olumlu senkronizasyon ve sönümleme momentleri üretilmiş, sistemdeki frekans ve gerilim değişimleri belirli sınırlar içinde tutularak, sistemin kararlı çalışabilmesi sağlanmıştır [13].

GSD incelenirken, sistemdeki elektromekanik salınımlarının sönümlemesinde sistem empedansının ve uyarma sisteminin etkileri incelenecek, senkronizm momenti ve sönümleme momenti karşılaştırılarak, generatörlerin uyarma sargıları uyarma akımlarının değiştirilmesinin, gerekçeleri ile birlikte, değişim sırasında çıkacak sorunların giderilmesi açıklanmaya çalışılacaktır.

GSD'ler büyük güçlü generatörlerdeki elektromekanik salınımları sönümleyerek, çalışma sınırları içerisinde kararlılığı artırmak için kullanılmakta olup, GSD uygulamalarını tanımlamak için, önce genel olarak senkron generatörlerin işletme özelliklerinin incelenmesi gerekmektedir.

Sistemde ani bir yük değişikliği olduğunda generatörün hızı ve ürettiği güç, kararlı çalışma noktası etrafında değişim göstermektedir. Sistemdeki güç değişimleri sebebi ile güç dengesi bozulduğundan; rotor açısında, rotor hızında değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişikliklerde senkron generatörün davranışını, bir önceki bölümde

detaylı olarak anladığı gibi salınım denklemi belirlemektedir. Kararlı çalışma noktasındaki küçük değişikliklerde (5.1) no.lu denklem aşağıdaki şekilde yazılabilir. Burada elektriki momentteki değişim miktarı, senkronizm momenti ve sönümleme momenti olarak, iki bileşene ayrılmıştır [7].

$$\Delta T_e = K_S \Delta \delta + K_D \Delta \omega \quad (5.1)$$

Burada,

K_S = Senkronizasyon katsayısı

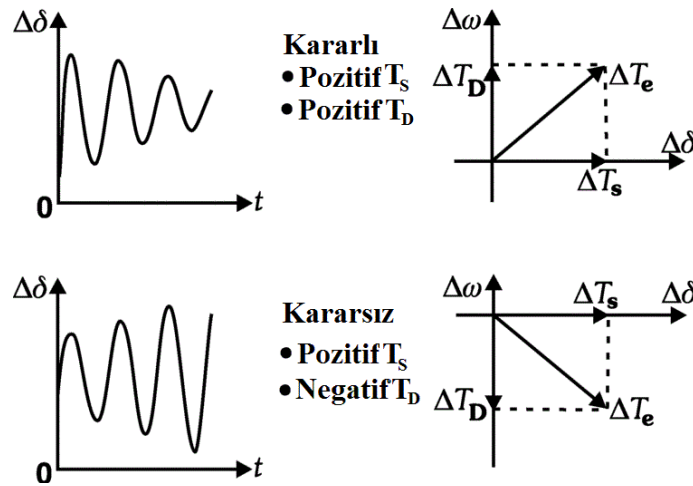
K_D = Sönümleme katsayısı

$\Delta \delta$ = Rotor açısındaki değişim miktarı

$\Delta \omega$ = Rotor hızındaki değişim miktarı, olarak ifade edilir

(5.1) no.lu denklemde, K_S ve K_D 'nin pozitif değerleri kararlı çalışma noktasında çalışan rotor hızındaki değişimleri engeller [7]. Bu şekilde rotor açısı yeniden kararlı bir çalışma noktasına getirilir ($\Delta \delta = 0$). Bütün çalışma koşullarında rotora olumlu yeterli senkronizasyon ve sönümleme momentleri uygulandığı sürece, generatör kararlı çalışmaya devam edecektir.

Küçük bozuklukları takiben rotor hızı ve elektriki güç arasındaki ilişki, Şekil 5.1'de gösterilmiştir:



Şekil 5.1 : Küçük bozukluklarda rotor açısı ve hız değişimleri [7].

Bir senkron generatörün sönümleme katsayısı, generatörün tasarımına, şebekeye bağlanırken kullanılan elektriki teçhizatın karakteristiklerine ve uyarma sistemi ayarlarına bağlıdır. Normal işletme koşullarında yeterli olan sönümleme katsayıları, iletim sistemindeki arızaya bağlı olarak, salınımları önemli oranda azaltabilir.

Gerilim regülatörü çalışmasındaki gecikme ve generatör uyarma sargıları zaman sabiti de, sönümlleme momentini azaltmaktadır. Bazı uç durumlarda sönümlleme katsayısının negatif olması ile elektromekanik salınımlar büyür ve sonunda senkronizma kaybına sebep olur [10].

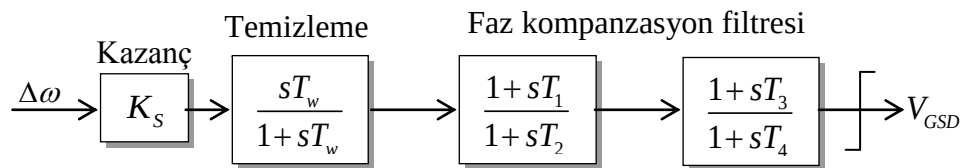
GSD nin çalışma prensibi temelde; rotor hızı değişimine bağlı olarak, OGR tarafından uyarma geriliminin modüle edilmesidir. Generatörün rotor hızı değişim sinyallerin, GSD tarafından değerlendirilmesiyle elde edilen sinyal OGR'ye giriş olarak verilir; böylece rotor hızı değişimine göre uyarma gerilimi ayarlanır. Sonuç olarak, GSD'ler sönümlleme katsayılarını yükselterek, yetersiz doğal sönümlleme koşullarında dahi generatörün kararlı çalışmasına olanak verip, elektromekanik salınımları giderir [10].

Sistemdeki büyük bir arızayı takip eden ilk mekanik salınımlar, geliştirilmiş hızlı OGR'ler ile GSD'lerin beraber kullanılmasıyla giderilir. Ani yük değişikliklerinde rotor hızlanır iken yavaşlamasını, rotor yavaşlar iken ise hızlanmasını temin edecek elektriki momentlerin üretimini sağlayarak, elektromekanik salınımların azalmasına önemli katkıda bulunurlar [15].

5.1 Tek Girişli Güç Sistemi Dengeleyicisi

Bir arıza sonucu oluşan generatör rotor hızı değişiminin doğal sönümllemesini desteklemek için gereken elektriki moment bileşeni, GSD tarafından üretilmelidir. Bunu sağlamanın yöntemlerinden biri rotor hızı, frekans veya aktif güç değişimleri ile orantılı bir sinyali gerilim regülatörü girişine uygulamaktır. Genelde giriş olarak hız sinyali kullanılmaktadır [16].

Şekil 5.2'de tek girişli güç sistemi dengeleyicisinde çıkış sinyali üretimi için kullanılan işlemler blok diyagramında gösterilmiştir. Bu model literatürde PSS1A olarak geçmektedir [16].



Şekil 5.2 : Tek girişli güç sistemi dengeleyicisi [16].

Hız tabanlı GSD’de çıkış sinyali üretimi için kullanılan işlem sırası aşağıda özetlenmiştir.

- Hız değişimi sinyali kazanç yardımıyla kuvvetlendirilir.
- Kuvvetlendirilen sinyal yüksek geçiren filtreden geçirilerek ortalama hız seviyesi elde edilir. Bu ortalama sinyal referans alınan generatör çıkış geriliminin sürekli değişimi engeller.
- Hız sensörlerinin ve uyarma sisteminin çalışmasındaki zaman gecikmesinin, sistem üzerindeki etkisini gidermek için faz kompanzasyonu yapılır.
- Nihai sinyal OGR girişine uygulanır [16].

6. GÜÇ SİSTEMİ VE SENKRON GENERATÖR MODELİ

Bu bölümde bilgisayar benzetimi çalışmasında kullanılacak güç sistemi, senkron generatör, devir sayısı regülatörü, otomatik gerilim regülatörü ve güç sistemi dengeleyicisi modeli açıklanacaktır. Bazı modellerin transfer fonksiyonlarından durum denklemleri elde edilecektir.

6.1 Transfer Fonksiyonlardan Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

Kontrol sistemlerinin analiz ve tasarımında en önemli sorun sistemlerin matematiksel olarak modellenmesidir. Transfer fonksiyonu yöntemi sadece doğrusal, zamanla değişmeyen sistemler için geçerlidir, buna karşın durum denklemleri yaklaşımı doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlere de uygulanabilir. Bu iki yaklaşımın birbirine dönüştürülmesi mümkündür. Tez kapsamında, güç sisteminin küçük işaret kararlılığı transfer fonksiyonları üzerinden, geçici hal kararlılığı ise durum denklemleri yardımıyla yapılacaktır. Bu sebepten dolayı, geçici hal kararlılığının incelenmesi için sistemdeki kontrol elemanlarının durum denklemlerinin elde edilmesi gerekmektedir. İkinci dereceden herhangi bir transfer fonksiyonu denklem (6.1) de gösterilmiştir [17].

$$\frac{Y}{U}(s) = F(s) = \frac{K(1 + a_1s + a_2s^2)}{(1 + b_1s + b_2s^2)} \quad (6.1)$$

Bu ifade (6.2) , (6.3) nolu denklemler şeklinde ifade edilir.

$$Y(s) = (1 + a_1s + a_2s^2)Z(s) \quad (6.2)$$

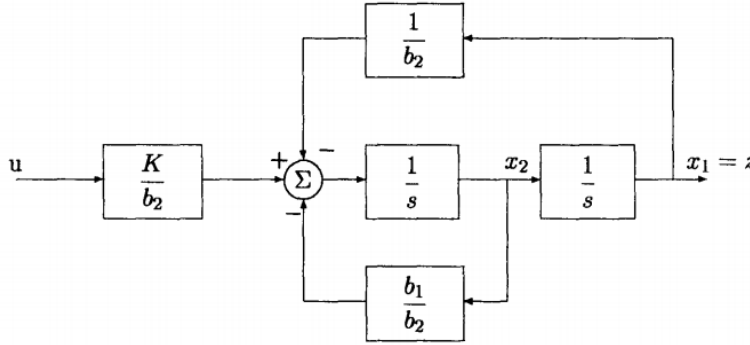
$$Z(s) = \frac{KU(s)}{1 + b_1s + b_2s^2} \quad (6.3)$$

Z transfer fonksiyonunun durum değişkenleri olan x_1 ve x_2 sırasıyla (6.4) ve (6.5) denklemleri ile tanımlanır.

$$x_1 = z \quad (6.4)$$

$$x_2 = \dot{x}_1 = \dot{z} \quad (6.5)$$

(6.3) nolu denklemdeki $Z(s)$ transfer fonksiyonun genişletilmiş hali Şekil 6.1’de ifade edilir. Dikkat edilecek nokta x_1 durum değişkeniyle x_2 durum değişkeninin arasındaki blok $1/s$ olarak ifade edilmiştir. Bu ise denklem (6.5) de ifade edilen koşulu sağlamıştır. ise toplam bloğunun değişimini ifade etmektedir.



Şekil 6.1 : $Z(s)$ transfer fonksiyonuna ait blok diyagram [17].

Yukarıdaki şekilden faydalanarak $\dot{x}_2$ ifadesi (6.7) nolu denklem şeklinde gösterilir.

$$x_2 = \dot{x}_1 \quad (6.6)$$

$$\dot{x}_2 = \left(-\frac{1}{b_2} \right) x_1 - \left(\frac{b_1}{b_2} \right) x_2 + \left(\frac{K}{b_2} \right) u \quad (6.7)$$

(6.2) denklemindeki $Z(s)$ transfer fonksiyonu yerine bunu tanımlayan z durum değişkeni yerleştirilir:

$$y = (x_1 + a_1 x_2 + a_2 \dot{x}_2) \quad (6.8)$$

(6.7) ve (6.8) denklemleri kullanılarak (6.9) deki ifade elde edilmiş olur. Böylelikle sisteme ait durum değişkenleri tanımlanmış ve sistemin vereceği cevap elde edilmiştir.

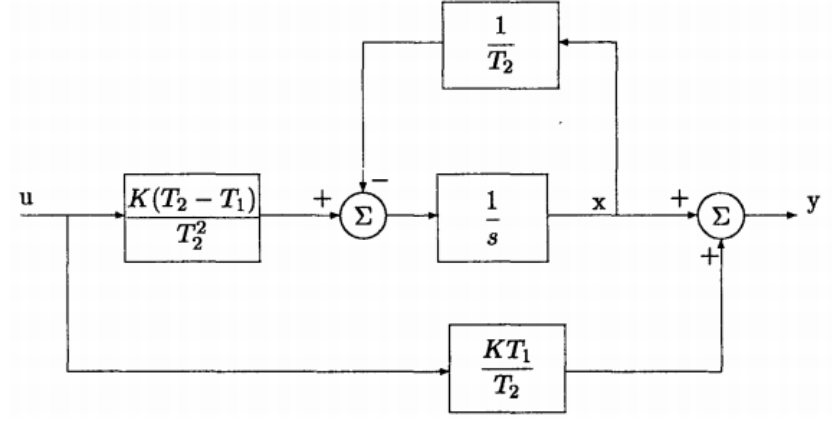
$$y = \left(1 - \frac{a_2}{b_2} \right) x_1 + \left(a_1 - \frac{a_2}{b_2} b_1 \right) x_2 + \frac{K a_2}{b_2} u \quad (6.9)$$

(6.10) nolu denklemde gösterilen birinci derece transfer fonksiyonları için sistem daha basit şekilde ifade edilir. Bu sisteme ait durum değişkeni ve cevap fonksiyonu (6.11) ve (6.12) ile ifade edilir. Sistemin blok diyagramı Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

$$T(s) = \frac{K(1+sT_1)}{(1+sT_2)} \quad (6.10)$$

$$\dot{x} = \frac{1}{T_2} \left(-x + \frac{K(T_2 - T_1)}{T_2} u \right) \quad (6.11)$$

$$y = x + \left(K \frac{T_1}{T_2} \right) u \quad (6.12)$$



Şekil 6.2 : T(s) transfer fonksiyonuna ait blok diyagram [17].

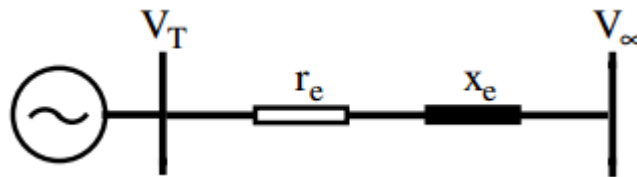
$T_1 = 0$ durumunda sistemin vereceği cevap durum değişkeni olur. (6.13) ve (6.14) durum denklemleri şeklinde aşağıdaki ifade edilir:

$$\dot{x} = \frac{1}{T_2} (-x + Ku) \quad (6.13)$$

$$y = x \quad (6.14)$$

6.2 Güç Sistemi Modeli

Oluşturulacak güç sistemi modelinin sadeliği, kararlılık analizi ile sistem dinamiklerinin davranışlarının incelenmesini kolaylaştıracaktır. Bu nedenle, senkron generatörün iletim hattı üzerinden sonsuz güçlü bir şebekeye bağlı olduğu sistem modeli tercih edilmiş ve bu model Şekil 6.3’de gösterilmiştir.



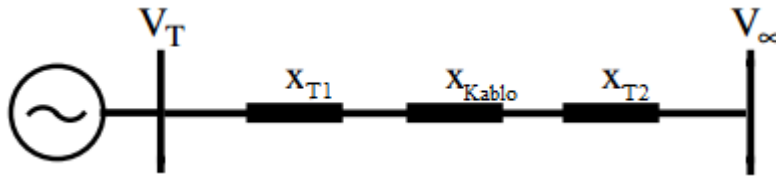
Şekil 6.3 : Tek makina-sonsuz bara güç sistemi modeli [18].

Şebeke denklemleri, modelde gösterilen baralar arasındaki iletim sistemi üzerinde meydana gelen gerilim düşümünü ifade ederler. (6.15) ve (6.16) da şebeke denklemleri ifade edilmiştir. V_T generatör terminal gerilimini, V_∞ sonsuz güçlü baranın gerilimini, r_e iletim hattının direncini, x_e ise iletim hattının reaktansını temsil etmektedir [19].

$$V_{Td} = -V_\infty \sin \delta + r_e I_d + x_e I_q \quad (6.15)$$

$$V_{Tq} = V_\infty \cos \delta + r_e I_q - x_e I_d \quad (6.16)$$

Bu çalışmada oluşturulan güç sistemi modelinde, Bis Enerji Elektrik Üretim A.Ş. deki 11,5 kV, 36 MVA gücünde, 11 no.lu Buhar Türbini Generatör ünitesi, 11,5/34,5 kV yükseltici trafo, 34,5 kV XLPE yer altı kablosu, TEİAŞ Bursa Sanayi TM. de, 33,6/154 kV Trafo K üzerinden, 154 kV A barasına bağlıdır. İlgili barayı sonsuz güçlü olduğu kabul edip, tek makine sonsuz güçlü bara modeli kurulmuştur. Generatör gücü ile paralellik göstermesi açısından temel güç $S_{baz} = 100 \text{ MVA}$, temel gerilim seviyesi $V_{baz} = 11,5 \text{ kV}$ olarak seçilmiştir.



Şekil 6.4 : Sisteme ait güç sistemi modeli.

Transformatörleri ve bağlantı kablosunu içeren model Şekil 6.4 'te gösterilmiştir. Bu modelde $r_e = 0$ olarak kabul edilmiştir. x_{T1} , x_{T2} değerleri transformatörlerin reaktanslarını göstermektedir. İlgili reaktanslar ise transformatörün test raporlarından elde edilmiştir. (Transformatörlerin test raporları Ek-A'da verilmiştir.)

6.3 Senkron Generatör Modeli

Benzetim çalışmasında kullanılacak generatörde sönümlenme sargıları olmadığı için q eksenine ait senkron reaktans, geçici senkron reaktansa eşit kabul edilebilir [12]. Bu durumda q ekseninde geçici gerilim değeri sıfır olarak kabul edilir ($E'_q = 0$). Bu şartları sağlayan matematiksel model literatürde, senkron generatörün üçüncü dereceden doğrusal olmayan modeli olarak geçmektedir [12]. Senkron generatöre ait

matematiksel model; diferansiyel ve lineer denklemlerden oluşmaktadır. (6.17) ve (6.18) deki ifadeler senkron generatöre ait salınım denklemlerini göstermektedir.

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e - D\Delta\omega}{M} \quad (6.17)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (6.18)$$

Denklemlerdeki M , senkron generatörün eylemsizlik sabitini; D ise sönüm katsayısını temsil etmektedir. Denklemlerde de görüleceği gibi, açısal hız ω ve ona bağlı olarak rotor açısı δ değerlerindeki değişim, mekanik güç, elektriksel güç ve sönüm katsayısına bağlıdır. Salınım denklemlerindeki açısal hız değişimi $\Delta\omega$ birim değere indirgenerek analiz yapılacaktır. Bu sebepten salınım denklemleri açısal hızın baz değerine (ω_b) bölünerek, güç değerleri moment değerlerine dönüşmüş olur. Kayma ise denklem (6.20) de ifade edilmiştir.

$$\omega_b = 2\pi f \quad (6.19)$$

$$S_m = \frac{\omega - \omega_b}{\omega_b} = \frac{\Delta\omega}{\omega_b} \quad (6.20)$$

$$\frac{dS_m}{dt} = \frac{T_m - T_e - D(S_m - S_{mo})}{M} \quad (6.21)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_b (S_m - S_{mo}) \quad (6.22)$$

Analizde kullanılacak salınım denklemleri (6.21) ve (6.22) de gösterilmiştir. Kararlı çalışma noktasındaki kayma sıfırdır ($S_{mo} = 0$).

Rotor sargısı denklemleri, senkron generatöre ilişkin elektromotor kuvvetinin geçici gerilim değerinin hesabı için kullanılır.

$$T'_{qo} \frac{dE'_q}{dt} = E'_{fd} - E'_q + I_d (X_d - X'_d) \quad (6.23)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_d \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_a & X_q \\ -X'_d & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

T'_{q0} açık devre geçici hal zaman sabitinin q eksenine ait bileşenleridir. E_{fd} uyarma gerilimini temsil eder. X_d, X_q senkron reaktansın, V_d, V_q terminal geriliminin d ve q eksenlerine ait bileşenleri, X'_d ise geçici senkron reaktansın d eksenine ait bileşenidir. Senkron generatöre ilişkin elektriksel güç P_E ise (6.25) denklemi ile ifade edilir [17]. Sürekli halde $\omega = 1$ olduğundan T_E (6.26) ile ifade edilir.

$$P_E = E'_q I_q + (x'_d - x_q) I_d I_q \quad (6.25)$$

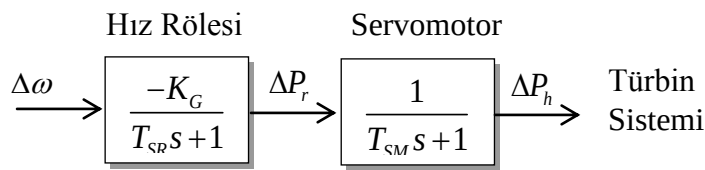
$$T_E = \frac{E'_q I_q + (x'_d - x_q) I_d I_q}{\omega} = \frac{E'_q I_q + (x'_d - x_q) I_d I_q}{1} \quad (6.26)$$

Generatörün teknik karakteristikleri EK A da verilmiştir.

6.4 Devir Sayısı Regülatörü ve Türbin Sistemi

Devir sayısı regülatörü, senkron generatörün mekanik giriş gücüne etki etmesiyle, generatörlere ilişkin mekanik giriş ve elektriksel çıkış gücü dengesini sağlamasıyla, senkron generatörün hızını sabit tutmayı amaçlayan kontrol elemanıdır.

Devir sayısı regülatörü hız rölesi ve servomotordan oluşur (Şekil 6.5). Bir bozucu sebebiyle senkron generatörün yavaşlaması veya hızlanması durumunda; hız rölesi ürettiği hata sinyali servomotora iletilir, servomotor bu sinyali değerlendirerek türbine verilecek buhar miktarını ayarlar.



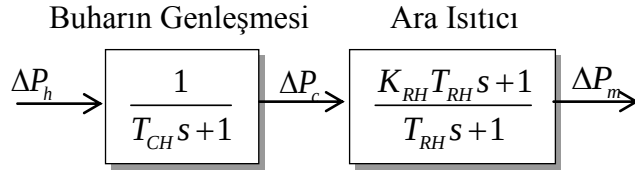
Şekil 6.5 : Devir sayısı regülatörü blok diyagramı [20].

Senkron generatörün açısal hızındaki değişim, hız rölesine giriş olarak verilir. Açısal hız değişimi, hız rölesi kazancı K_G ve zaman sabiti T_{SR} 'ye bağlı bir transfer fonksiyonundan geçerek servomotora giriş sinyali olarak verilir. Servomotordan çıkan sinyal türbin sistemine iletilir. Sisteme ait denklemler sırasıyla (6.27) ve (6.28) de verilmiş olup, T_{SM} servomotorun zaman sabitini göstermektedir.

$$\frac{d\Delta P_r}{dt} = \frac{1}{T_{SR}} [-\Delta P_r + K_G \Delta \omega] \quad (6.27)$$

$$\frac{d\Delta P_h}{dt} = \frac{1}{T_{SM}} [-\Delta P_h + \Delta P_r] \quad (6.28)$$

Türbin sistemin amacı; su buhardaki termal enerjiyi mekanik enerjiye çevirmektir. Bu şekilde, generatör milini tahrik edecek moment elde edilmiş olur. Servomotorun vanaları yönlendirmesiyle gelen buhar, türbinin yüksek basınç kademesinde genişledikten sonra ara ısıtıcıdan geçerek diğer basınç kademelerine gider. Tezde tek ara ısıtıcılı türbin (*Single-Reheat Steam-Turbine*) modeli kullanılacaktır [19,20]. Şekil 6.6’ da gösterildiği gibi bu modelde orta basınç ve düşük basınç türbinleri ihmal edilmiştir [19].



Şekil 6.6 : Türbin sistemi blok diyagramı [20].

Türbine ait denklemler sırasıyla (6.29) ve (6.30)’da verilmiştir. T_{CH} , T_{RH} sırasıyla buharın genişleme ve ara ısıtıcı zaman sabitlerini, K_{RH} ise ara ısıtıcının kazancını temsil eder.

$$\frac{d\Delta P_c}{dt} = \frac{1}{T_{CH}} [-\Delta P_c + \Delta P_h] \quad (6.29)$$

$$\frac{dG_0}{dt} = \frac{1}{T_{RH}} [-G_0 + \Delta P_c] \quad (6.30)$$

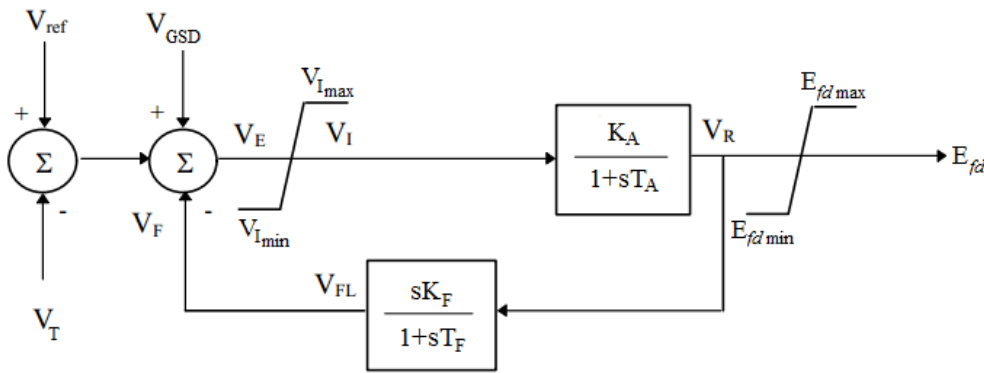
$$\Delta P_m = \frac{1 - K_{RH}}{T_{RH}} G_0 + K_{RH} \Delta P_c \quad (6.31)$$

Buhar türbininin zaman sabitinin yüksek olmasından dolayı, devir sayısı regülatörünün etkisi türbin üzerinde geç gözlemlenir. Bu sebeple devir sayısı regülatörlerinin küçük işaret kararlılığı incelenirken devre dışı oldukları kabul edilir [21].

6.5 Otomatik Gerilim Regülatörü

Uyarma sisteminin amacı, senkron generatörün rotor sargılarına ihtiyaç duyduğu besleme gerilimini uygulamaktır. OGR ile bu besleme gerilimi kontrol edilerek senkron generatör uç geriliminin istenilen değerde tutulması hedeflenir. Regülatörünün uyarma gerilimi üzerindeki etkisiyle, generatör tarafından üretilen reaktif güç ve güç faktörü de kontrol edilmiş olur.

Benzetim çalışmasında “IEEE Exciter ST1” regülatör modeli kullanılmıştır. Şekil 6.7 de bu modelin blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 6.7 : IEEE ST1 otomatik gerilim regülatörü blok diyagramı [17].

Bu model tristörler yardımıyla generatör barasından transformatör yardımıyla alınan alternatif akımı doğru akıma çevirerek senkron makinenin rotor sargılarının uyarılmasını sağlar. OGR'ye referans uç gerilim, anlık uç gerilim değerleri ve GSD'den gelen sinyaller giriş olarak verilir. Gelen sinyallerden regülatörün kazanç değeri ve zaman sabitinin etkisiyle uyarma gerilimi belirlenir. Regülatörün daha kararlı çalışması amacıyla, uyarma geriliminden elde edilen geri besleme sinyali ve GSD'den gelen ek sinyal regülatöre giriş olarak verilir. Uyarma gerilimi sınır koşulları aşamayacak şekilde rotorun uyarılması sağlanır. Bu tür regülatörlerdeki zaman sabiti çok küçük olduğundan uyarma sistemini için faz kompanzasyonuna ihtiyaç duyulmayabilir [16].

Şekil 6.7'de K_A regülatör kazancı, T_A regülatör zaman sabiti, K_F regülatör kararlılaştırıcısının kazancı, T_F ise regülatör kararlılaştırıcısının zaman sabitidir. Bahsedilen parametreler için IEEE 421.5 standartında bu model için tavsiye edilen değerler kullanılmıştır. Değişikliğe ihtiyaç duyulan parametre regülatörün çıkış

gerilimi limit değerleri olup, generatörün teknik dokümanının belirttiği sınır değerler çerçevesinde değiştirilmiştir.

Çizelge 6.1: Otomatik gerilim regülatöründe kullanılan parametreler [16].

OGR (ST1)							
Ka	210	Kf	0.025	Vlmin	-2.4	Efdmin	-6
Ta	0.01	Tf	1	Vlmax	2.4	Efdmax	6

Geçici hal kararlılığı analizi durum denklemlerinden yararlanılarak yapılacaktır. Bu sebepten dolayı statik tip uyarma sistemine ait durum denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler;

$$V_I = V_{REF} + V_{GSD} - V_T - V_F \quad (6.32)$$

$$V_I = \begin{cases} V_{I \max} & V_I > V_{I \max} \\ V_I & V_{I \max} \geq V_I \geq V_{I \min} \\ V_{I \min} & V_I < V_{I \min} \end{cases} \quad (6.33)$$

$$\frac{dV_R}{dt} = \frac{1}{T_A} [-V_R + K_A V_I] \quad (6.34)$$

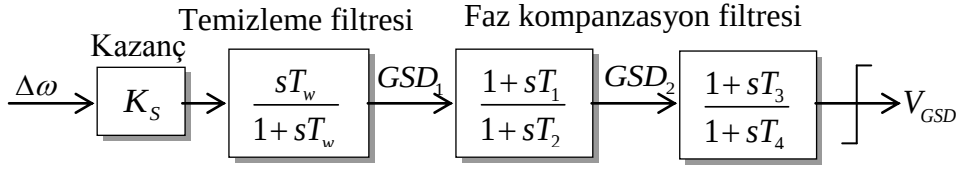
$$\frac{dAVR}{dt} = -\frac{AVR}{T_F} + V_R \quad (6.35)$$

$$V_F = -\frac{K_F}{T_F^2} AVR + \frac{K_F}{T_F} V_R \quad (6.36)$$

$$E_{fd} = \begin{cases} E_{fd \max} & V_R > E_{fd \max} \\ V_R & E_{fd \max} \geq V_R \geq E_{fd \min} \\ E_{fd \min} & V_R < E_{fd \min} \end{cases} \quad (6.37)$$

6.6 Güç Sistemi Dengeleyicisi Modeli

Beşinci bölümde güç sistemi dengeleyicisinin işlevi ve çalışma prensibi belirtilmiştir. Benzetim çalışmasında “IEEE PSS1A” modeli kullanılacaktır. Bu modelin blok diyagramı Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



Şekil 6.8 : Güç sistemi dengeleyicisi blok diyagramı [16].

Güç sistemi dengeleyicisine ait parametrelerin optimizasyonu genetik algoritma, parçacık sürüşü optimizasyonu, yapay arı kolonisi ve karınca kolonisi algoritmaları yardımıyla gerçekleştirilecektir. Parametrelerin aralıkları Çizelge 6.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2: Güç sistemi dengeleyicisi parametre aralıkları [16].

Sembol	Aralık
T_w	1 s - 20 s
T_1, T_3	0.1 s - 2 s
T_2, T_4	0.01 s - 0.20 s
K_S	0.1 pu - 50 pu
V_{GSDMIN}, V_{GSDMAX}	-0.1 pu, 0.1 pu

Geçici hal kararlılığı analizi durum denklemlerinden yararlanılarak yapılacaktır. Bu sebepten dolayı güç sistemi dengeleyicisine ait durum denklemleri elde edilmiştir.

$$\frac{dP_0}{dt} = \frac{-P_0 + K_S \Delta\omega}{T_w} \quad (6.38)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\left(-P_1 + \frac{(T_2 - T_1)}{T_2} GSD_1 \right)}{T_2} \quad (6.39)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{\left(-P_2 + \frac{(T_4 - T_3)}{T_4} GSD_2 \right)}{T_4} \quad (6.40)$$

$$GSD_1 = P_0 + K_S \Delta\omega \quad (6.41)$$

$$GSD_2 = P_1 + \frac{T_1}{T_2} GSD_1 \quad (6.42)$$

$$V_{GSD} = P_2 + \frac{T_3}{T_4} GSD_2 \quad (6.43)$$

Sınırlayıcının işlevi ise

$$V_{GSD} = \begin{cases} V_{GSD\max} & V_{GSD} > V_{GSD\max} \\ V_{GSD} & V_{GSD\max} \geq V_{GSD} \geq V_{GSD\min} \\ V_{GSD\min} & V_{GSD} < V_{GSD\min} \end{cases} \quad (6.44)$$

şeklinde ifade edilir.

Temizleme filtresinin zaman sabiti T_w 1 ile 20 saniye arasında değişir ve bu değer yeterince büyük olduğunda, hızdaki değişim, generatör çıkış gerilimini etkileyemez. Ancak çok büyük T_w değerleri generatörün uç gerilimde dalgalanmalar oluşturabilir [7].

6.7 Sürekli Hal Değerleri

Bu bölümde verilen denklemler ile, senkron generatörün bilgisayar benzetiminde kullanılacak sürekli hal değerleri hesaplanacaktır. İletim hattı üzerinden sonsuz güçlü şebekeye akan akım I_0 , faz açısı φ_0 ve generatör uç gerilimi V_T sırasıyla (6.45), (6.46) ve (6.47) denklemleriyle elde edilir.

$$I_0 = \frac{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}}{V_0} \quad (6.45)$$

$$\varphi_0 = \arctan \frac{Q_0}{P_0} \quad (6.46)$$

$$V_{T0} = \sqrt{V_\infty^2 - \left(I_0 (x_e \cos \varphi_0 + r_e \sin \varphi_0) \right)^2} + I_0 (x_e \sin \varphi_0 + r_e \cos \varphi_0) \quad (6.47)$$

(6.45) denklemindeki V_0 generatör uç geriliminin ilk değeridir [19]. Generatörden istenilen reaktif gücün aktarılması için V_T 'nin yeni değerinin hesaplanması gerekmektedir. Yeni hesaplan değer ise sistemden akan akım değiştireceği için (6.45), ve (6.47) denklemleri iteratif olarak çözülmek zorundadır. Aksi halde sistemin sürekli durumdaki verileri yanlış hesaplanmış olur. İteratif sistemin sözde kodu (pseudo code),

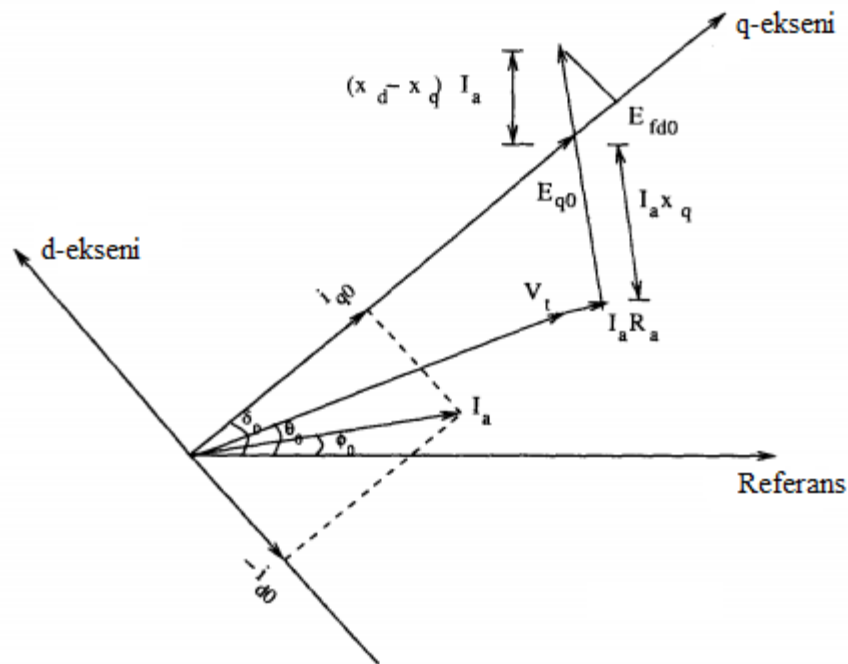
Döngü

Yeni akım değerinin hesabı; **(6.45)**

Yeni gerilim değerinin hesabı; **(6.47)**

Döngüden Ayrılma Şartı ($Hata > 0.001$)

şeklinde ifade edilebilir. Bazı sürekli hal değerlerinin hesaplanabilmesi için Şekil 6.9'deki fazör diyagram kullanılmıştır.



Şekil 6.9 : Sisteme ait fazör diyagram [17].

Güç açısı (rotor açısı) δ_o , E'_q ile V_∞ gerilimleri arasındaki açıdır.

$$\theta_o = \arcsin \frac{V_T E_\infty}{P_o x_e} \quad (6.48)$$

$$\hat{I}_o = \frac{V_T \angle \theta_o - E_\infty \angle 0}{jX_e} = I_o \angle \varphi_o \quad (6.49)$$

$$\hat{E}_{qo} = V_T \angle \theta_o + jX_q \hat{I}_o = E_{qo} \angle \delta_o \quad (6.50)$$

Senkron generatörden, şebekeye akan akımın d ve q bileşenleri;

$$I_{do} = -I_o \sin(\delta_o - \varphi_o) \quad (6.51)$$

$$I_{qo} = I_o \cos(\delta_o - \varphi_o) \quad (6.52)$$

Ayrıca E_{fdo} , E'_{do} ve E'_{qo} değerleri yine fazör diyagram yardımıyla elde edilir:

$$E_{fdo} = E_{qo} - (x_d - x_q) i_{do} \quad (6.53)$$

$$E'_{qo} = E_{fdo} + (x_d - x'_d) i_{do} \quad (6.54)$$

$$E'_{do} = -(x_q - x'_q) i_{qo} \quad (6.55)$$

Bu durumda elektriksel gücün sürekli hal değeri;

$$P_{Eo} = T_{Eo} = E'_q I_q + (x'_d - x_q) I_d I_q \quad (6.56)$$

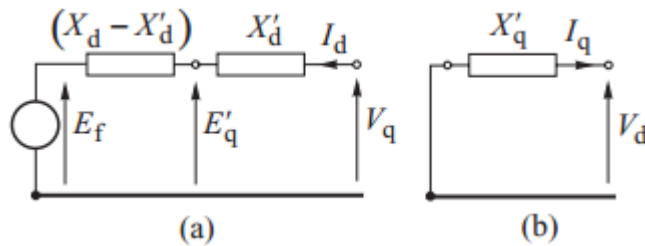
OGR'ye uygulanacak referans uç gerilimi V_{TRO} ,

$$V_{ref} = V_{TRO} + \frac{E_{fdo}}{K_A} \quad (6.57)$$

olarak bulunur. Denklemlerde kullanılan, makinanın karakteristik değerleri Ek-A'da verilmiştir.

6.8 Küçük İşaret Modeli

Sistemlerin küçük işaret modeli elektrik mühendisliğinde sıkça kullanılan bir analiz yöntemidir. Doğrusal olmayan davranışlara sahip sistem küçük işaret modeliyle doğrusal olarak incelenebilir. Güç sistemlerinde görülen küçük boyutlu salınımların incelenmesi çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların temelini oluşturan Heffron-Phillips, düşük genlikli salınımların senkron makinede incelenmesi için tek makine sonsuz güçlü bara (single machine infinite busbar) için küçük işaret modelini geliştirmiştir. Bir sistemin küçük işaret modeli, sistemin kararlı çalışma noktasındaki verilerin pertürbe edilip, Taylor serisine açıldıktan sonra yüksek dereceli terimlerin ihmal edilmesiyle elde edilir [17].



Şekil 6.10 : d ve q eksenine ait devre şeması [12].

Şekil 6.10'da senkron makinenin devre şeması verilmiştir, bu şemadan stator denklemleri elde edilir:

$$E'_q + x'_d i_d = v_q \quad (6.58)$$

$$-x_q i_q = v_d \quad (6.59)$$

Uç geriliminin kompleks biçiminden (6.60) denklemi elde edilir:

$$(v_q + jv_d) = (i_q + ji_d)(R_e + jx_e) + E_b e^{j\delta} \quad (6.60)$$

(6.60) denkleminin reel ve sanal kısımlara ayrıldığında;

$$v_q = R_e i_q - x_e i_d + E_b \cos \delta \quad (6.61)$$

$$v_d = R_e i_d + x_e i_q - E_b \sin \delta \quad (6.62)$$

ve (6.58), (6.59) denklemleri (6.61), (6.62) denklemleri ile birleştirildiğinde

$$\begin{bmatrix} (x'_d + x_e) & -R_e \\ -R_e & -(x_q + x_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_b \cos \delta - E'_q \\ -E_b \sin \delta \end{bmatrix} \quad (6.63)$$

elde edilir. (6.63) ifadesinden d ve q eksenine ait akımlar (6.65), (6.66) da ifade edilmiştir:

$$A = (x'_d + x_e)(x_q + x_e) + R_e^2$$

$$i_d = \frac{1}{A} \left[R_e E_b \sin \delta + (x_q + x_e)(E_b \cos \delta - E'_q) \right] \quad (6.65)$$

$$i_q = \frac{1}{A} \left[(x'_d + x_e) E_b \sin \delta - R_e (E_b \cos \delta - E'_q) \right] \quad (6.66)$$

(6.65) ve (6.66) denklemleri lineerleştirildiğinde;

$$\Delta i_d = C_1 \Delta \delta + C_2 \Delta E'_q \quad (6.67)$$

$$\Delta i_q = C_3 \Delta \delta + C_4 \Delta E'_q \quad (6.68)$$

$$C_1 = \frac{1}{A} \left[R_e E_b \cos \delta_0 - (x_q + x_e) E_b \sin \delta_0 \right] \quad (6.69)$$

$$C_2 = -\frac{1}{A} (x_q + x_e) \quad (6.70)$$

$$C_3 = \frac{1}{A} \left[(x'_d + x_e) E_b \cos \delta_0 + R_e E_b \sin \delta_0 \right] \quad (6.71)$$

$$C_4 = \frac{R_e}{A} \quad (6.72)$$

(6.58), (6.59) denklemleri lineerleştirip, (6.67), (6.68) ile birleştirildiğinde

$$\Delta v_q = x'_d C_1 \Delta \delta + (1 + x'_d C_2) \Delta E'_q \quad (6.73)$$

$$\Delta v_d = -x_q C_3 \Delta \delta - x_q C_4 \Delta E'_q \quad (6.74)$$

(6.21), (6.22) nolu salınım denklemleri lineerleştirip, Laplace dönüşümü uygulandığında;

$$\Delta S_m = \frac{1}{2Hs} [\Delta T_m - \Delta T_e - D \Delta S_m] \quad (6.75)$$

$$\Delta \delta = \frac{\omega_B}{s} \Delta S_m \quad (6.76)$$

(6.26) nolu moment denkleminin lineerleştirilmesiyle

$$\Delta T_e = [E'_{q0} - (x_q - x'_d) i_{d0}] \Delta i_q + i_{q0} \Delta E'_q - (x_q - x'_d) i_{q0} \Delta i_d \quad (6.77)$$

elde edilir. (6.77) denklemi ile (6.67), (6.68) denklemleri birleştirildiğinde,

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (6.78)$$

$$K_1 = E'_{q0} C_3 - (x_q - x'_d) i_{q0} C_1 \quad (6.79)$$

$$K_2 = E'_{q0} C_4 + i_{q0} - (x_q - x'_d) i_{q0} C_2 \quad (6.80)$$

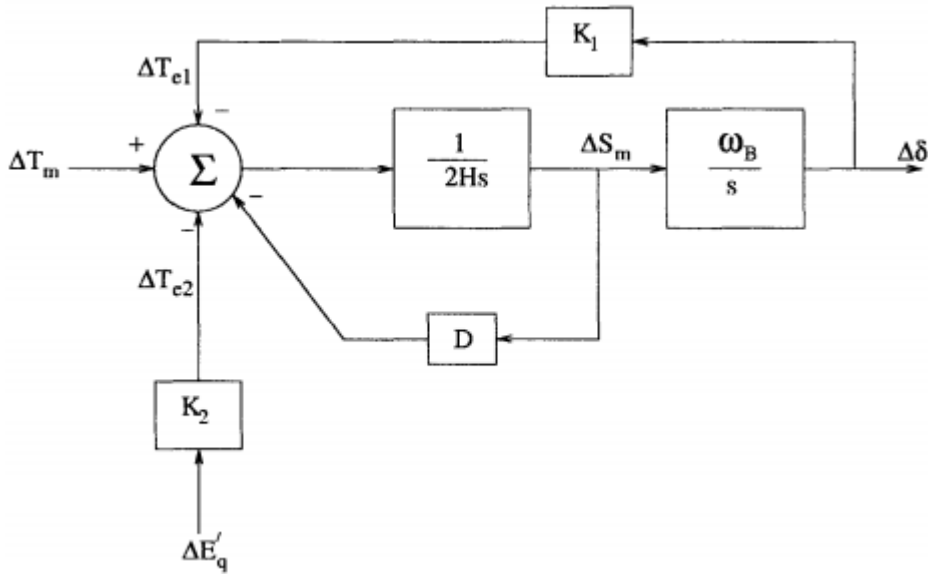
(6.75), (6.76) ve (6.78) denklemleri yardımıyla Şekil 6.11'deki blok diyagram elde edilir.

Rotor sargısı denklemi (6.23) lineerleştirip (6.67) ile birleştirildiğinde;

$$T'_{do} \frac{d\Delta E'_q}{dt} = \Delta E_{fd} - \Delta E'_q + (x_d - x'_d) (C_1 \Delta \delta + C_2 \Delta E'_q) \quad (6.81)$$

(6.81) denkleminin Laplace dönüşümü uygulandığında;

$$(1 + sT'_{do} K_3) \Delta E'_q = K_3 \Delta E_{fd} - K_3 K_4 \Delta \delta \quad (6.82)$$

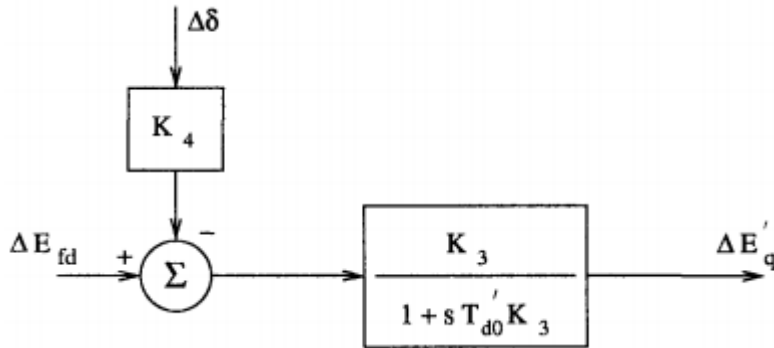


Şekil 6.11 : Moment - rotor açısı blok diyagramı [17].

$$K_3 = \frac{1}{[1 - (x_d - x'_d)C_2]} \quad (6.83)$$

$$K_4 = -(x_d - x'_d)C_1 \quad (6.84)$$

(6.82) denkleminin blok diyagramı Şekil 6.12 de gösterilmiştir.



Şekil 6.12 : Rotor sargısı denkleminin blok diyagramı [17].

Uç geriliminin pertube edilmesiyle

$$\Delta V_t = \frac{V_{do}}{V_{to}} \Delta V_d + \frac{V_{qo}}{V_{to}} \Delta V_q \quad (6.85)$$

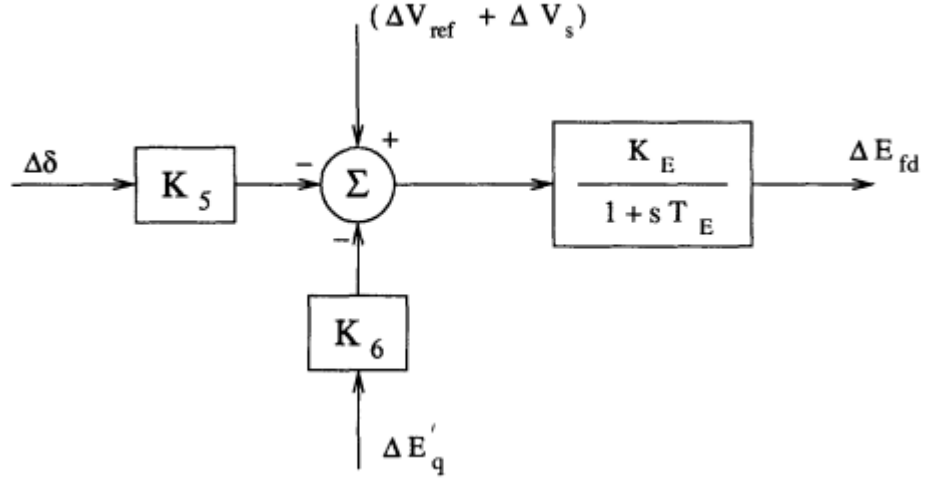
denklemini elde edilir. Bu denklemi (6.73), (6.74) ile birleştirildiğinde

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (6.86)$$

$$K_5 = -\left(\frac{V_{do}}{V_{to}}\right) x_q C_3 + \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}}\right) x'_d C_1 \quad (6.87)$$

$$K_6 = -\left(\frac{V_{do}}{V_{to}}\right)x_q C_4 + \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}}\right)(1 + x'_d C_2) \quad (6.88)$$

denklemleri elde edilir. (6.86) denkleminin ait blok diyagram Şekil 6.13 de belirtilmiştir.



Şekil 6.13 : Uyarma sistemine ait blok diyagram [17].

$K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ sabitleri Heffron-Phillips sabitleri olarak adlandırılmaktadır,

$R_E = 0$ durumunda bu sabitler daha basit şekilde ifade edilebilir [17].

$$K_1 = \frac{E_b E'_{qo} \cos \delta_o}{x_e + x_q} + \frac{x_q - x'_d}{x_e + x'_d} E_b i_{qo} \sin \delta_o \quad (6.89)$$

$$K_2 = \frac{E_b \sin \delta_o}{x_e + x'_d} \quad (6.90)$$

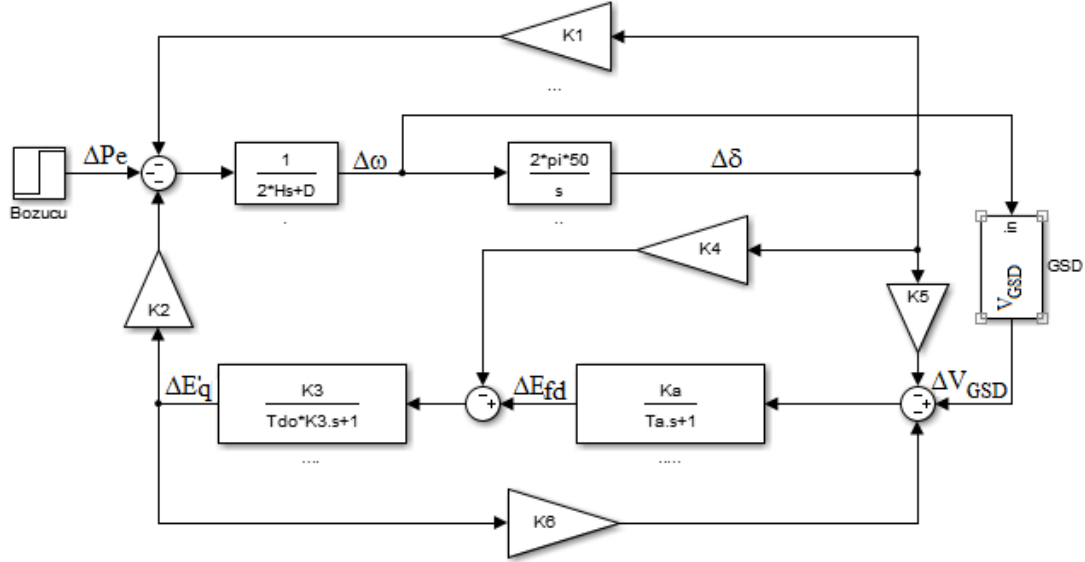
$$K_3 = \frac{x_e + x'_d}{x_d + x_e} \quad (6.91)$$

$$K_4 = \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x_e} E_b \sin \delta_o \quad (6.92)$$

$$K_5 = \frac{-x_q V_{do} E_b \cos \delta_o}{(x_e + x_q) V_{to}} - \frac{x'_d V_{qo} E_b \sin \delta_o}{(x_e + x'_d) V_{to}} \quad (6.93)$$

$$K_6 = \frac{x_e}{x_e + x'_d} \left(\frac{V_{qo}}{V_{to}} \right) \quad (6.94)$$

Elde edilen blok diyagramlar birleştirildiğinde, senkron makinaya ait küçük işaret modeli elde edilir (Şekil 6.14). Bu modele bozucu bloğu yardımıyla basamak (step) girişi uygulanarak; senkron makinanın küçük yük değişimlerdeki davranışı incelenir [17].



Şekil 6.14 : Heffron-Phillips küçük işaret modeli.

7. OPTİMİZASYON

Optimizasyon, genel olarak "daha iyiyi yapma" anlamına gelmektedir. Bir problemin birden fazla çözümü varsa, en iyi çözümü bulmak gerekir. Bilim açısından optimizasyon, bir probleme getirilen çözümlerden en iyi olanı bulma sürecidir. Aslında “en iyi” öznel bir kavram olup, optimizasyon problemini formüle eden kişiye bağlıdır

Optimizasyonun temel aşamaları Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1 : Optimizasyonun temel aşamaları [22].

Bir fonksiyona çeşitli parametreler girilip, çıkışında uygunluk değerleri incelenir. Problem boyutunun artması, lineer olmaması gibi olumsuz koşullara rağmen iyi sonuç verebilecek optimizasyon tekniğine ihtiyaç duyulur. Klasik optimizasyon algoritmalarının bu zorluklardaki çözümlerinin başarısızlığından dolayı literatürde bazı sezgisel tekniklere yönelinmiştir.

Doğada sürüler halinde yaşayan canlıların toplu olarak gösterdikleri zeki davranışlardan ilham alınarak; özellikle sürülerin yiyecek bulma davranışlarının modellenmesiyle başarılı algoritmalar ortaya çıkmıştır [22].

7.1 Amaç ve Uygunluk Fonksiyonu

Optimizasyon sürecinde çözümlerin en iyi olanının belirlenmesi için uygunluk (kalite) fonksiyonu kullanılır. Uygunluk fonksiyonu, çözümlerin sayısal değerlerini üretip; kullanılan parametrelerin problem için ne kadar uygun olduğunu gösterir. Optimizasyonda amaç, parametrelerin en uygun değerlerini bulmaktır.

Tek amaca yönelik optimizasyonda minimize edilmesi gereken tek bir problem bulunmaktadır. Sade ve basit olmasından dolayı algoritmaların çalışması verimli bir şekilde gerçekleşmektedir. Tek amaca yönelik optimizasyonun genel şekilde ifadesi (7.1) numaralı denklemde gösterilmiştir [23].

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimize } f(\vec{x}) \\ \vec{x} \in X \subset R^n \end{array} \right\} \quad (7.1)$$

İfadede bulunan $\vec{x}$, n boyutlu vektör olup çözümü temsil etmektedir.

Çok amaca yönelik optimizasyonun genel ifadesi (7.2) de verilmiş olup, tek bir çözüm vektörüyle birden fazla problemin minimize edilmesi beklenmektedir.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimize } f(\vec{x}) = (f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})) \\ \vec{x} \in X \subset R^n \end{array} \right\} \quad (7.2)$$

Birbiriyle bağıntılı olan fonksiyonlarda optimal parametrelerin belirlenmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiş olup, bunlardan birisi de “Çok Amaçlı Optimizasyon” probleminin “Tek Amaçlı Optimizasyon” problemine indirgenmesidir [23].

Bu yöntemdeki temel ilke, problemlerin bilinen bir çözümü baz alınarak fonksiyonların sonuçlarının tekrar boyutlandırılmasından ($\overline{f_i}(\vec{x})$) sonra istenilen fonksiyon ağırlıkların w_i eklenmesidir. Bu sabitle çözümün istenilen fonksiyona daha fazla yönelmesi hedeflenir. Sistemin genel ifadesi (7.3) te gösterilmiştir[22,23].

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimize } f(\vec{x}) = \sum_{i=1}^k w_i \overline{f_i}(\vec{x}) \\ \vec{x} \in X \subset R^n \end{array} \right\} \quad (7.3)$$

(7.3) denkleminde “Çok Amaçlı Optimizasyon” problemini “Tek Amaçlı Optimizasyon” problemine indirgenmiştir.

7.2 Sınırlamalar

Bir problemin belirli sınırlarlar içinde çözülmesi istenebilir. Örneğin çap değişkeninin negatif olması gibi istenmeyen durumlar söz konusudur. Bu tür durumlarda optimizasyon algoritmaların kullandığı parametrelerin belirli sınırlar içinde tutulması gerekmektedir.

7.3 Optimizasyon Metotları

Optimizasyon metotları temel olarak iki kategori altında toplanabilir. Bu gruplar, klasik teknikler ile yaklaşık optimal çözüm üreten modern sezgisel tekniklerdir.

7.3.1 Klasik teknikler

Klasik teknikler, tüm çözümleri kontrol ederek en iyi çözümü bulmaya çalışır. Klasik teknikler ile çözülen problemlerin boyutu küçüktür; problem boyutunun artmasıyla birlikte çözüm olasılıklarının çoğalması, optimizasyon süresini ciddi bir şekilde uzatmaktadır.

7.3.2 Modern sezgisel algoritmalar

Bu tür algoritmalar popülasyon tabanlıdır. Çözümlerin oluşturduğu popülasyonu çeşitli operatörlerle geliştirerek çözümler üretirler. Bu algoritmaları gelişime dayalı algoritmalar ve sürü zekâsı temelli algoritmalar olarak ayırmak mümkündür. Tek noktadan çözüm aramaya başlayan geleneksel yöntemlerdeki yerel en iyi sonuçlara takılma sorunu, birçok noktadan aramaya başlayan algoritmalar ve değişim operatörleri ile ortadan kalkar [22].

7.3.2.1 Genetik algoritma:

Genetik Algoritmanın (GA) amacı; hayatta kalan bireylerin yeteneklerini geliştirmektir. Doğada, canlılar çoğalarak nesillerini devam ettirirler. Eşeyli üremeden sonra, yavru bireylerin kromozomları her çiftten gelen genlerin kombinasyonundan oluşur. Oluşan bireylerden doğanın koşullarına en iyi uyum sağlayan birey yaşamına devam eder. Bu algorithmada kullanılan bazı terimler şunlardır:

Kromozom: İncelenen problemin aday çözümü olan her bir bireydir. Popülasyon içindeki her birey birer kromozomdur.

Gen: Kromozomun üzerinde bulunan ve tek başına anlamlı bilgi taşıyan en küçük birimdir.

Popülasyon: Bireylerin oluşturduğu topluluktur. İncelenen problemin alternatif çözüm kümesini oluşturur. Kesin kural olmamakla birlikte genelde popülasyon sayısı sabit tutulur.

Seçim: Popülasyon içinde hangi bireylerin çaprazlamaya gireceği ve mutasyona uğrayacağını belirler.

Çaprazlama: Popülasyon içinden seçilen kromozomlar arası gen değiş tokuşudur.

Rekombinasyon: Çaprazlama ile anne-babadan farklı gen kombinasyonlarına sahip yeni çocukların oluşmasıdır.

Mutasyon: Bireylerde meydana gelen rastlantısal değişikliklerdir [18].

Kodlama yöntemleri

GA'lar, problemin olası çözümü olan bireyleri kodlayarak; gen ve kromozomdan oluşan yapılara dönüştürürler. Çözülecek probleme bağlı olarak farklı kodlama yöntemleri kullanılır. Tez kapsamında *Reel Kodlama* yöntemi kullanılmıştır bu yöntemde; sistem parametreleri kromozomlarda reel sayılar olarak saklanır. Bu kodlama sistemiyle işlem sayısının azalır ve sistemin hafızasını fazla zorlamaz [25].

Parametreler:

GA' da, optimize edilecek parametre dizileri kromozom olarak saklanır. Her bir kromozom bir bireyi temsil eder. Kromozomun gen sayısını optimize edilecek gen sayısı belirler. N adet parametreye sahip bir optimizasyon problemi N boyutlu olur.

Kromozom = $[P_1, P_2, P_3, \dots, P_N]$ olarak tanımlanır.

Algoritmanın çalışma şekli

GA'nın genel yapısı şöyledir:

Başlangıç

Döngü

Seçim

Çaprazlama

Mutasyon

En Uygun Çözümün Belirlenmesi

Döngüden Ayrılma Şartı (Yeterli İterasyon Sayısı)

Başlangıç: Bireyler belirlenen popülasyon miktarına göre rastgele üretilir. Popülasyonun rolü, olası çözümleri hafızada tutmaktır. Popülasyondaki her birey, problemin çözümünü temsil etmektedir. Optimizasyon sürecinde tek bir nokta yerine

popülasyonun yani birçok noktanın kullanılması, gelişime dayalı algoritmaların bölgesel minimumlara takılmasını engeller [25]. Oluşturulan her bir bireyin uygunluk değeri hesaplanır.

Seçim: Bu aşamada rastlantısal seçim yöntemiyle çaprazlamaya girecek bireyler belirlenir. Yeni bir birey üretilmesi amacıyla seçilmiş olan bireyler ebeveyn ismini alır. Bireyler uygunluk değerlerine göre seçileceği gibi rastgele de seçilebilirler[25].

Tez çalışmasında Turnuva Yöntemi ve Rastgele iki birey seçimi yöntemi kullanılmıştır. Turnuva yönteminde k sayısı kadar birey rastgele seçilerek turnuva grubuna girer. Grup içinde en yüksek uygunluk değerine sahip iki birey ebeveyn olarak seçilir. İyi bireylerin seçimi popülasyonun kalitesini arttırarak çözüm sürecini hızlandırır. Genelde turnuva sayısı 2 olarak seçilir, bu durumda k sayısını 4 alınması uygun olacaktır [26]. Rastgele iki birey seçimi ise, popülasyondan rastgele iki bireyin seçilmesiyle olur. Algoritmada belli bir süre turnuva yöntemi kullanılacak ardından rastgele iki birey seçimi yöntemi kullanılacaktır. Turnuva yönteminin algoritmada hangi oranda kullanılacağı ise β katsayısı ile belirlenecektir.

Çaprazlama: Kromozomlar arasındaki gen alışverişine çaprazlama denir. Optimizasyon probleminde parametrelerin karşılıklı olarak yer değiştirmesini temsil etmektedir. Bu süreçte problem türü doğrultusunda, seçilen farklı kodlama sistemleriyle uyumlu olacak çaprazlama operatörleri geliştirilmiştir. Tez çalışmasında Ayrık Çaprazlama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde her bir genin hangi ebeveyninden yeni nesle aktarılacağı rastlantısal olarak belirlenir. İki kromozomdan iki tane yeni nesil elde edilir [18]. Örnek olarak:

1. Ebeveyn: $[P_1, P_2, P_3, P_4]$

2. Ebeveyn: $[P_5, P_6, P_7, P_8]$

1. Çocuk: $[P_1, P_6, P_7, P_4]$

2. Çocuk: $[P_5, P_2, P_3, P_8]$

Mutasyon: Bu aşamada mevcut bireylerden yeni bireyler üretilir. Mutasyon operatörü her zaman rastlantısal olup, çaprazlama sonucu meydana gelen çocukları mutasyona uğratabilirler. Optimizasyon probleminde bu ifade parametrelerin rastlantısal olarak gelişime uğrattır. Mutasyon oranı problemin cinsine göre değişebilir. Mutasyon, optimizasyon sürecinin yerel en iyi çözüme yakınsamasını

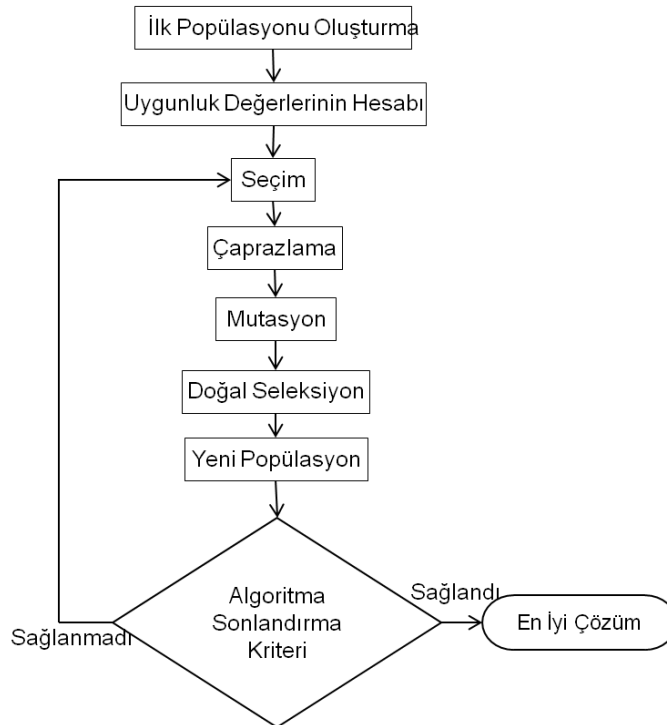
engeller. Mutasyon oranının yüksek seçilmesi, sınır koşullarının aşılmasına sebep olabileceği gibi çözümün sürecini yavaşlatabilir. Mutasyon Operatörü denklemdeki gibi belirlenmiştir [18].

$$\alpha = \frac{1 - \sqrt[4]{\frac{\text{dongü}}{\text{iterasyon}}}}{2} \quad (7.1)$$

Eşitliğe göre, döngü sayısı iterasyon sayısına yaklaştıkça mutasyon etkisi α da üstel olarak azalacak ve son iterasyonda sıfıra eşit olacaktır [18].

Yeni Popülasyon: Bu aşamada yeni bireylerin popülasyona katılıp katılamayacağına karar verilir. Çevre şartlarına uyum sağlayamayan bireyler yaşamların kaybederken, uyum sağlayan bireylerin yaşamaya devam ettikleri görülmektedir. Bu süreç doğal seleksiyon olarak adlandırılır. Ebeveyn seçme işleminin skolastik olmasının tersine, hayatta kalanın seçilmesi deterministik olup bireylerin uygunluk değerlerine göre şeklindedir [26].

En Uygun Çözümün Belirlenmesi: En yüksek uygunluk değerine sahip birey problemin çözümü olur. Aksi halde döngüyü sonlandıracak şartlardan biri sağlayıncaya kadar algoritma en iyi çözümü aramaya devam eder. Algoritmanın işleyişi bir akış diyagramı ile Şekil 7.2’de gösterilmiştir.



Şekil 7.2 : GA akış diyagramı [24].

7.3.2.2 Parçacık sürüsü optimizasyon algoritması

Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) kuş sürülerinin davranışlarının bir benzetimidir. Kuşların yiyecek aramaları, bir probleme çözüm aramaya benzetilir. Kuşlar yiyecek ararken, yiyeceğe en yakın olan kuşu takip ederler. Parçacık olarak adlandırılan her çözüm bir kuş olarak değerlendirilebilir. Parçacık hareket ettiğinde, geldiği noktanın uygunluk değeri hesaplanır. Bu değer parçacığın yiyeceğe olan uzaklığı gösterir. Parçacığın hızının ve yönünün her iterasyonda nasıl değişeceğini, komşularının tespit ettiği en iyi koordinatlar ve kendi tespit ettiği en iyi koordinatlar belirler. Çözüm için seleksiyon veya GA'daki gibi çaprazlama ve mutasyon operatörlerine ihtiyacı yoktur. Bu ise algoritma yapısını oldukça basitleştirmiştir [27].

PSO bir grup rastgele çözümle (parçacık popülasyonu) başlatılır ve parçacıklar yeni koordinatlara hareket ettirilir. Parçacıkların geldiği konumların uygunluk değerleri hesaplanarak optimum çözüme yaklaşılması amaçlanır.

Algoritmanın çalışma şekli:

PSO algoritmasının 3 aşamadan oluşur, ve algoritmanın genel yapısı aşağıdaki gibidir:

Başlangıç

Döngü

gbest, lbest Değerlerin Hesabı

Hız Vektörünün Güncellenmesi

Parçacıkların Hareketi

En Uygun Çözümün Belirlenmesi

Döngüden Ayrılma Şartı (Yeterli İterasyon Sayısı)

Başlangıç: Parçacıklar istenilen sayıdan problemin çözümü için belirlen sınırlar içinde rasgele üretilip, uygunluk değerleri hesaplanır.

Parçacıkların Hareketi: gbest, lbest Değerlerin Hesabı: Her parçacık keşfettiği en iyi yiyeceğin konum bilgisini ve uygunluk değeri saklamalıdır. Parçacıkların bireysel olarak keşfettiği yiyeceklerin uygunluk değeri lbest veya pbest olarak saklanır. Bütün

parçacıkların yaptığı araştırmalar sonucunda bilgi paylaşımı yapılır, en kaliteli yiyeceğin uygunluk değeri gbest olarak kaydedilir.

Hız Vektörünün Güncellenmesi: Herhangi bir parçacığın her eksenindeki konumlarının değişim miktarı hız olarak ifade edilir ve $v_i = [v_{i1} + v_{i2} + \dots + v_{id}]$ biçiminde gösterilir. Her iterasyonda, parçacıkların hızları hesaplanan lbest ve gbest değerine göre değiştirilir. Hızdaki bu değişim (7.2) denkleminde hesaplanır

$$v_i^{k+1} = w.v_i^k + c_1.rand_1^k(pbest_i^k - x_i^k) + c_2.rand_2^k(gbest^k - x_i^k) \quad (7.2)$$

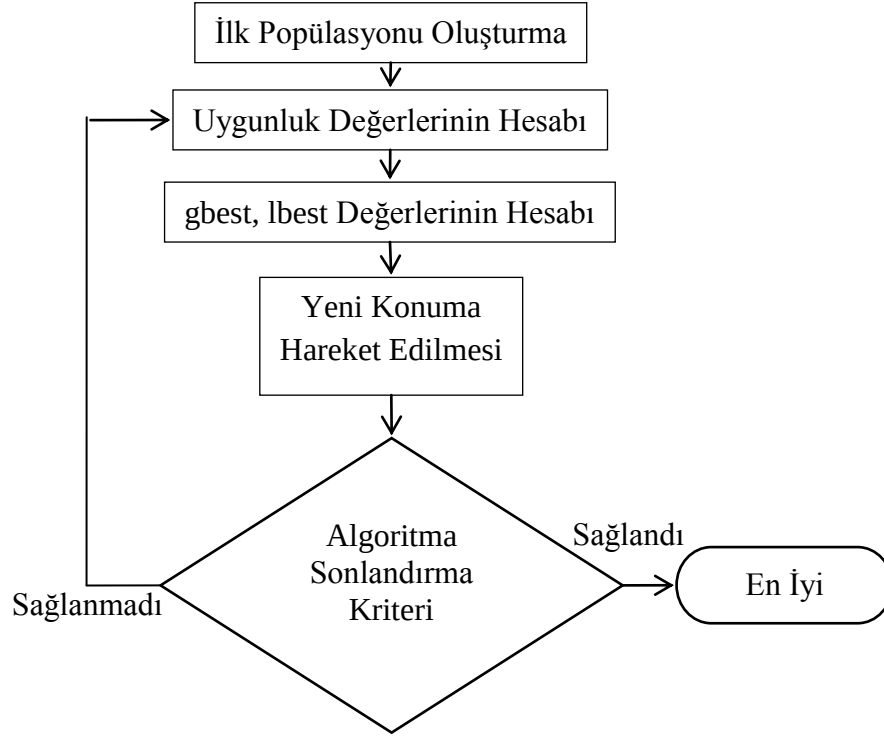
Denkleminde, c_1 ve c_2 öğrenme faktörleridir. c_1 , parçacığın kendi tecrübelerine göre hareket etmesini, c_2 ise sürüdeki diğer parçacıkların tecrübelerine göre hareket etmesini sağlar. Düşük değerlerin seçilmesi parçacıkların hedefe ulaşma süresi uzatsa da parçacıkların farklı yerlerde dolaşmasına imkân vererek farklı çözümlere ulaşması sağlar. Büyük değerler seçilmesi, hedefe ulaşmayı hızlandırırken hedef bölgenin es geçilmesine sebep olabilir [28]. Araştırmalar sonucunda öğrenme faktörlerinin $c_1=c_2=2$ olarak seçilmesinin iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [29]. Denklemindeki w değişkeni atalettir, hız güncelleme denkleminde kullanılır. Atalet, bir önceki hızın ne kadarının yeni çözümde kullanılacağını gösterir.

Parçacıkların Hareketi: Elde edilen hız vektörü bir önceki konum vektörüne eklenerek parçacıklar hareket ettirilir. Bu hareket (7.3) denklemi ile gösterilir. Parçacıkların geldiği her konum için uygunluk değerleri hesaplanır.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (7.3)$$

En Uygun Çözümün Belirlenmesi: En yüksek uygunluk değerine sahip olan parçacık problemin çözümü olur. Aksi halde döngüyü sonlandıracak şartlardan biri sağlanıncaya kadar algoritma en iyi çözümü aramaya devam eder.

PSO'da ayarlanması gereken çok fazla sayıda parametre yoktur. Çoğu zaman parçacık sayısının 20 ile 40 arasında seçilmesi yeterlidir, ancak çözülmesi zor olan optimizasyon problemlerinde bu sayı daha fazla alınabilir [30]. Algoritmanın işleyişi bir akış diyagramı ile Şekil 7.3 de gösterilmiştir.



Şekil 7.3 : PSO akış diyagramı [29].

7.3.2.3 Yapay arı kolonisi algoritması

Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAK), parçacık sürüsü tabanlı bir algoritma olup, 2005 yılında Karaboğa tarafından geliştirilmiştir. YAK’da üç çeşit arı bulunmaktadır:

- İşçi (employed) arılar nektarların kovana taşınmasından;
- Gözcü (onlooker) arılar işçi arıların yaptığı dansı takip edip kovandaki arıları nektar kaynağına yönlendirmekten;
- Kaşif (scout) arılar ise rastgele nektar kaynakları aramaktan sorumlulardır.

Kaşif ve işçi arılar arasında temelde farklılık yoktur. İşçi arılardan bazıları kaynaklarını bırakarak kaşif arı haline gelir ve rastgele yiyecek aramaya başlarlar. Rasgele araştırma yapan bu kaşif arılar, yeni bir kaynak keşfettikleri zaman tekrar nektar toplamaya başlamakta ve işçi arı halini almaktadırlar [31].

Yapay arı kolonisinde yapılan kabuller

YAK algoritmasının oluşturulurken bazı kabuller yapılmıştır. Bu kabuller:

1. Her bir kaynağın nektarının sadece bir arı tarafından alınmasıdır. Yani görevli arıların sayısı toplam yiyecek kaynağı sayısına eşittir.

2. İşçi arıların sayısı gözcü arıların sayısına eşittir.
3. Yiyecek kaynaklarının yerleri optimizasyon problemine ait olası çözümlere ve kaynakların nektar miktarları ise o kaynaklarla ilgili çözümlerin kalitesine (uygunluk) karşılık gelmektedir.

Dolayısıyla YAK optimizasyon algoritması en fazla nektara sahip kaynağın yerini bulmaya çalışarak problemin en iyi çözümünü bulmaya çalışmaktadır [22].

Algoritmanın çalışma şekli:

YAK algoritması 3 aşamadan oluşur ve algoritmanın genel yapısı şöyledir:

Başlangıç

Döngü

İşçi Arı Aşaması (Employed Bee Phase)

Gözcü Arı Aşaması (Onlooker Bee Phase)

Kaşif Arı Aşaması (Scout Bee Phase)

En Uygun Çözümün Belirlenmesi

Döngüden Ayrılma Şartı (Yeterli İterasyon Sayısı)

Başlangıç: GA' daki popülasyon kavramının karşılığı burada nektar kaynaklarıdır. Algoritma rastgele nektar yerleri üreterek çalışmaya başlamaktadır. Rastgele kaynak üretme süreci her bir parametrenin sınırları çerçevesinde rastgele değer üreterek gerçekleştirilir.

İşçi Arı Aşaması: Bu aşamada işçi arılar nektar kaynaklarına gönderilir. İşçi arı çalıştığı nektar kaynağı komşuluğunda yeni bir yiyecek kaynağı belirler. Yeni kaynak daha kaliteli (uygun) ise bu yeni kaynağı hafızasına alır. Yeni kaynağın mevcut kaynak komşuluğunda belirlenmesinin benzetimi (7.4) denklemi ile tanımlanmaktadır.

$$v_{m,i} = x_{m,i} + \varphi_{m,i}(x_{m,i} - x_{k,i}) \quad (7.4)$$

Denklemden x_k rastgele seçilmiş nektar kaynağı, i ise rastgele seçilmiş parametreyi ifade etmektedir. $\varphi_{m,i}$ ise $[-1,1]$ arasında rastgele seçilmiş bir katsayıdır. Yeni kaynağın üretilmesiyle ($v_{m,i}$), kalite (uygunluk) değeri hesaplanır.

Gözcü Arı Aşaması: Tüm işçi arılar araştırmalarını tamamladıktan sonra kovana dönüp buldukları kaynakların nektar miktarları ile ilgili gözcü arılara bilgi aktarırlar. Temel YAK algoritmasında seleksiyon işlemi rulet tekerleği kullanılarak yapılmıştır. Tekerlekteki her bir dilimin açısını uygunluk değeri toplamına oranı o kaynağın diğer kaynaklara göre nispi seçilme olasılığını vermektedir. (7.5)

$$p_i = \frac{uygunluk_i}{\sum_{i=1}^{SN} uygunluk_i} \quad (7.5)$$

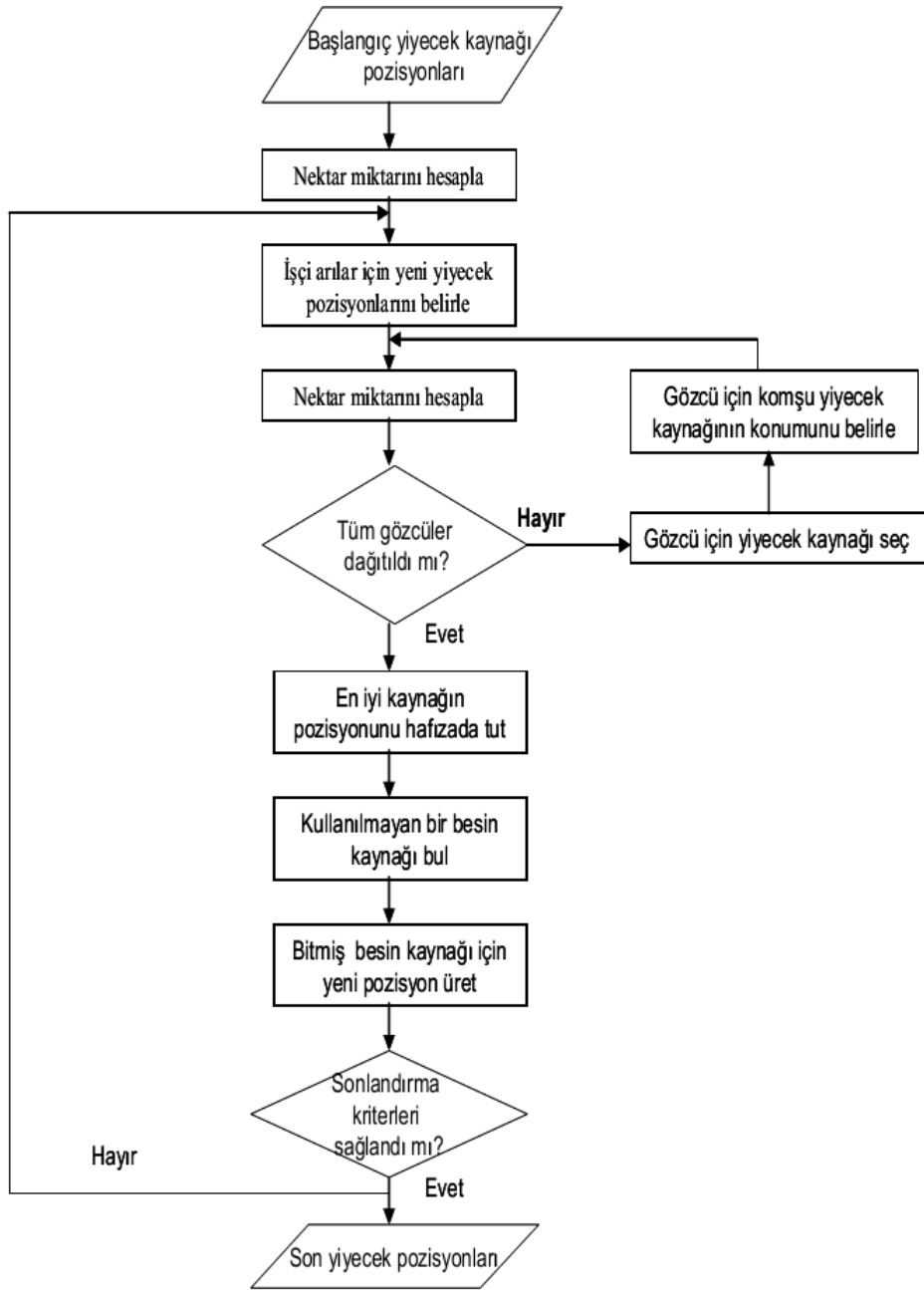
Burada kaynağın kalitesini, SN görevli arı sayısını göstermektedir. Bu olasılık hesaplama işlemine göre bir kaynağın nektar miktarı arttıkça (uygunluk değeri arttıkça) bu kaynak bölgesini seçecek gözcü arı sayısı da artacaktır. Bu seleksiyon çeşidine aç gözlü seleksiyonu denilmektedir [22]. Aç gözlü seleksiyonunun hangi oranda yapılacağını α parametresi ile belirlenmelidir.

Kaşif Arı Aşaması: Tüm görevli ve gözcü arılar kaynak arama süreçlerini tamamladıktan sonra hata sayaçları (failure) kontrol edilir. Bir arının bir kaynaktan faydalanıp faydalanmadığı çözüm geliştirememeye sayaçları aracılığıyla bilinir. Bu sayaç belli bir eşik değerinin üzerindeyse, bu kaynakta görevli olan arının kendisine yeni bir çözüm araması gerekir. Bu ise görevli olan arının kaşif arıya dönüşmesi manasına gelmektedir. Kaşif arı haline geldikten sonra rastgele nektar arama işlemine devam eder [32].

En Uygun Çözümün Belirlenmesi: Tüm görevli ve gözcü arıların getirdiği bilgiye göre kalite değeri en yüksek olan kaynak, en iyi çözüm olarak kabul edilir.

Yeterli sayıda iterasyon yapıldıktan sonra algoritma sonlandırılarak, en uygun çözüm belirlenir.

Algoritmanın işleyişi bir akış diyagramı ile Şekil 7.4 de gösterilmiştir.



Şekil 7.4 : YAK akış diyagramı [22].

7.3.2.4 Karınca kolonisi algoritması

Karınca kolonisi algoritması (KKA), optimizasyon problemlerini çözmek için karıncaların yiyecek arama davranışını modeller. Doğal karıncaların davranış yapılarını, çeşitli optimizasyon probleminde kullanılabileceği ilk kez 1992 yılında Marco Dorigo ve arkadaşları tarafından ortaya atılmıştır [33].

Karıncalar, yuvalarından bir gıda kaynağına giden en kısa yolu, herhangi görsel bir ipucu kullanmadan bulma yetisine sahiptirler. Karıncaların bu yolu bulmak için

kullandıkları araç feromenler yani bıraktıkları kimyasal salgılardır. Karıncalar ilerlerken belirli bir miktar feromen depo ederler ve olasılığa dayanan bir yöntemle feromenin daha çok olduğu yolu az olduğu yola tercih ederler. Depo ettikleri feromenleri, gıdaya giderken seçtikleri yola bırakarak, kendilerinden sonraki karıncalara yol seçiminde yardımcı olurlar. Yapılan seçimler de, bu yol üzerindeki feromen miktarını artıracak ve sonradan gelen karıncalar için tercih sebebi olacaktır.

Karınca kolonisi algoritmasında yapılan kabuller

KKA oluşturulurken; karıncaların bir takım özellikleri aynen kullanılarak ve bu özelliklere bazı eklemelerle optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılabilir hale getirilmiştir [33].

Yapay karıncalar oluşturulurken gerçek karıncalardan alınan özellikler:

1. Karıncalar arasında feromen aracılığı ile kurulan iletişim,
2. Feromeni fazla olan yolların öncelikle tercih edilmesi,
3. Kaliteli kaynaklara giden yollarda feromen miktarının daha hızlı artması.

Gerçek karıncalara eklenen özellikler:

1. Eklenen hafıza ile problemin çözümü için oluşturulan bilgiler saklanır.
2. Hafıza bilgilerinin paylaşımıyla en uygun çözümü bulunur.

Algoritmanın çalışma şekli

KKA'nın genel yapısı şöyledir:

Başlangıç

Döngü

Feromen değerlerinden gidilecek konumların olasılıklarının hesabı

Karıncaların hareketi

Uyguluk değerlerinin hesabı

Feromen güncellemesi

En Uygun Çözümün Belirlenmesi

Döngüden Ayrılma Şartı (Yeterli İterasyon Sayısı)

Problemin başlangıcında her konuma bir miktar feromen eklenir ve karıncaların hangi konumu seçecekleri olasılık bağıntısına göre belirlenir (7.6). Başlangıçta

feromen miktarının aynı olmasından dolayı karıncalarda herhangi bir yönelim yoktur. Ancak ilerleyen iterasyonlarda karıncalar en uygun çözüme doğru yönelim gösterirler [34].

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{i \in N_i} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} & \begin{pmatrix} \text{k izin verilen} \\ \text{bir seçimse} \end{pmatrix} \\ 0 & \text{(aksi halde)} \end{cases} \quad (7.6)$$

Burada;

$\tau_{ij}(t)$: i, j komundaki feromen miktarı

η_{ij} : konumların birbirinden uzaklığı (heuristic factor)

α : feromen sabiti

β : sezgisellik sabiti (heuristic constant)

ile ifade edilir. Problemin başlangıcında konumlarının birbirinden uzaklığı (η_{ij})'nın belirlenmesi gerekmektedir. Parametre optimizasyon problemlerinde η_{ij} ifadesinin Denklem (7.7) de belirtilen şekilde tanımlanması uygun görülmüştür [34].

$$\eta_{ij} = \frac{1}{T_j}, j = 1, 2, \dots \quad (7.7)$$

Denklemdeki T her bir parametrenin değerinin göstermektedir ve bu değerler problemin çözümü için uygun görülen parametre aralığının ayrıklaştırılması ile elde edilir [33]. Feromen miktarı algoritmanın çalışması süresince güncellenecektir. Olasılık değerinin hesabında α, β sabitleri sırasıyla feromen miktarına ve sezgiselliğe verilecek önemi göstermektedir. Konumların bu olasılık değeriyle rulet tekerleği yöntemi kullanılarak, karıncaların bir sonraki iterasyonda hangi konuma yerleşeceği belirlenir. Karıncalar ilgili konumlarının uygunluk değeri hesaplandıktan sonra uygunluk değerine bağlı olarak ilgili kaynağa feromen bırakırlar. Tez kapsamında elit karınca yöntemi kullanılmıştır, bu yöntemde mevcut iterasyondaki uygunluk değeri en iyi olan karıncanın feromen bırakmasına izin verilir. Feromen güncellenmesi (7.7) denklemine göre yapılır [35].

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (7.7)$$

Burada;

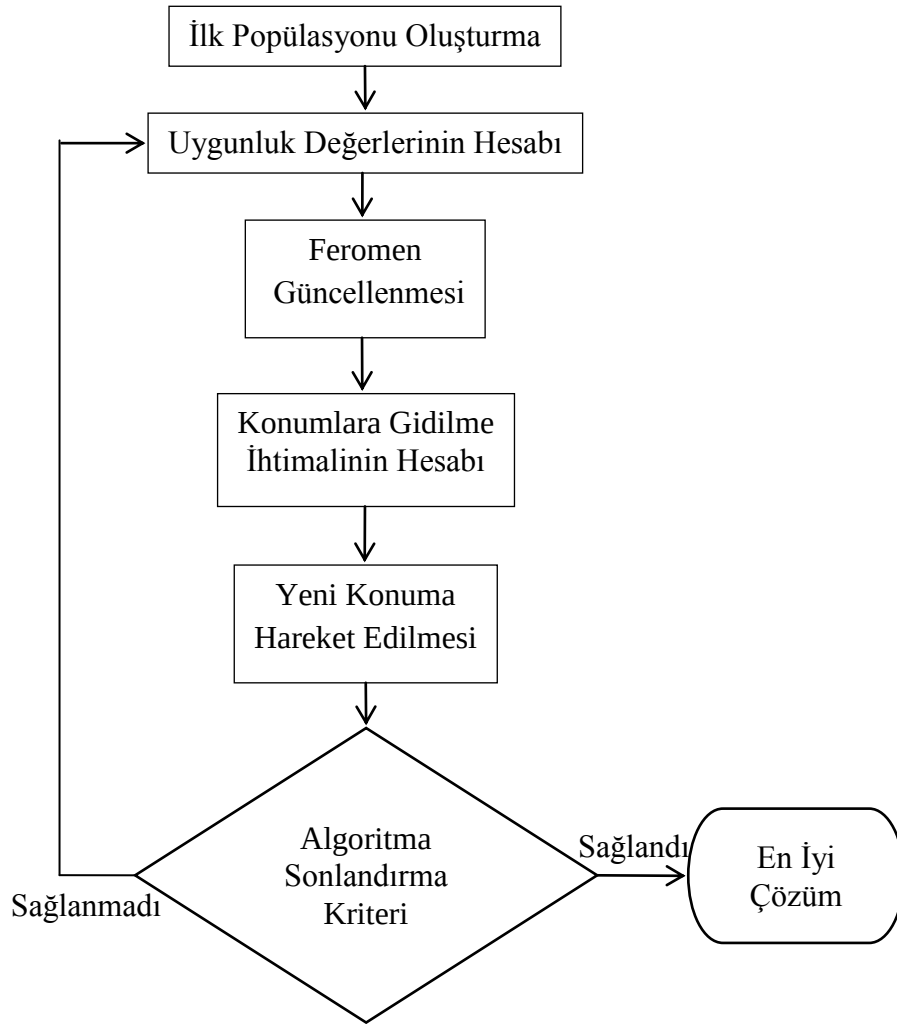
ρ : feromen buharlaşma katsayısı

$\Delta\tau_{ij}$: karıncaların bırakacağı fermonen miktarı

Gerçek karınca kolonilerinde, feromen yoğunluğu buharlaşmadan dolayı azalmaktadır. KKA'da buharlaşmanın etkisi, uygun şekilde tanımlanmış bir buharlaşma fonksiyonu ile elde edilir. Buharlaşmanın etkisiyle problemin çözümünde lokal en iyi noktasına yönelimi azaltılarak, global minimum noktasına yönelim arttırılmaktadır. Karıncaların bırakacağı feromen miktarı ise

$$\Delta\tau_{ij} = \frac{1}{Hata} = Uygunluk \quad (7.8)$$

denklemleriyle hesaplanarak, en iyi çözümün bulunması amaçlanır [34]. Algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 7.5'de verilmiştir.



Şekil 7.5 : KKA Akış diyagramı [33].

8. BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu proje çalışmasında, Bis Enerji Elektrik Üretim A.Ş. Termik Santrali'nde işletmede olan *11,5 kV, 36 MVA gücünde, 11 no.lu Buhar Türbini Generatör ünitesinin*; küçük işaret kararlılığı ve geçici hal kararlılığı, bağlı olduğu TEİAŞ 154kV barasının sonuz güçlü olduğu varsayımı altında incelenecektir.

Güç sistemin modellenmesi Bölüm 6'da detaylı olarak anlatılmıştır. Projedeki generatör, transformatörler, yer altı kablosu ve diğer teçhizatın teknik karakteristikleri, üreticilerin vermiş olduğu teknik dokümanlardan ve test raporlarından alınmış olup, ilgili teknik dokümanlar eklerde verilmiştir.(EK-A)

Optimizasyon algoritmalarında kullanılacak parametreler;

Çizelge 8.1: GA'da kullanılacak parametreler [18].

M: 40	β : 0.66
-------	----------------

Çizelge 8.2: PSO'da kullanılacak parametreler [29].

M: 40	C_1 : 2	C_2 : 2	w_0 : 0.1	w: 0.8
-------	-----------	-----------	-------------	--------

Çizelge 8.3: YAK'ta kullanılacak parametreler [22].

M: 40	Limit: 15	α : 0.9
-------	-----------	----------------

Çizelge 8.4: KKA'da kullanılacak parametreler [34].

M: 40	α : 6	β : 6	ρ : 0.1	τ_0 : 0.01
-------	--------------	-------------	--------------	-----------------

Çizelgelerdeki M parametresi popülasyonun boyutunu temsil etmektedir. Diğer parametrelerin işlevleri Bölüm 7 de anlatılmıştır.

8.1 Hata Değerinin Hesabı

Optimizasyonunun amacı rotorun açısal hız salınımlarını minimize etmektir. Rotor salınımlarının miktarını belirlemek için ITAE performans ölçüm yöntemi kullanılacaktır. Bu yöntem hatanın mutlak değerinin, hata süresiyle çarpılmasından

elde edilen büyüklüğün integrali olarak belirtilmiş olup aşağıdaki denklemde gösterilmiştir.

$$ITAE = \int |\Delta\omega| dt \quad (8.1)$$

Bu hata değerinin düşük olması, sistemin güç sistemi dengeleyicinin daha başarılı çalışması anlamına geldiği için uygunluk fonksiyonunu hatanın tersi olarak tanımlamak uygun olacaktır.(7.2)

$$J = \frac{1}{ITAE} \quad (8.2)$$

8.2 Benzetim Sonuçları

İkinci Bölümde detaylı olarak anlatıldığı gibi, 154 kV'luk sistemdeki üç fazlı kısa devrelerin azami temizlenme süresi, mesafe koruma röleleri ve kesicilerin açma süreleri dahil 120 milisaniye olarak şebeke yönetmeliğinde belirtilmiştir [8]. Bu sebepten dolayı geçici hal kararlılığı incelenirken arıza süresi 0.12 sn. seçilmiştir.

Bu bölümde üç farklı optimizasyon yapılacaktır: *Birincisinde*; senkron generatöre 0.01 pu ek yük gelmesi durumunda, senkron generatörün rotor açısal hızındaki ($\Delta\omega$) salınımlarını minimize eden GSD parametrelerinin bulunması amaçlanmıştır. *İkincisinde*; senkron generatörün bağlı olduğu sonsuz güçlü barada 0.12 sn. süren üç fazlı kısa devre durumunda, senkron generatörün rotor açısal hızındaki ($\Delta\omega$) salınımlarını minimize eden GSD parametrelerinin bulunması amaçlanmıştır. *Üçüncüsünde* ise hem senkron generatöre 0.01 pu ek yük gelmesi durumunda, hem de senkron generatörün bağlı olduğu sonsuz güçlü barada 0.12 sn süren üç fazlı kısa devre durumunda, senkron generatörün rotor açısal hızındaki ($\Delta\omega$) salınımlarını minimize eden ortak GSD parametrelerinin bulunması amaçlanmıştır. Bu şartı sağlamak için Bölüm 7'de belirtilen “Çok Amaçlı Optimizasyon” yöntemi kullanılacaktır. Benzetim çalışması; işlemcisi Core 2 Duo 2.5 GHz ve belleği 2 GB olan bilgisayar yardımıyla yapılacaktır. Optimizasyonlarda YAK, KKA, GA, PSO algoritmaları kullanılacak ve bu algoritmalar 15 kez çalıştırılıp algoritmaların performansları incelenecektir.

Küçük bozucuların (küçük yük değişimlerinin) senkron generatör üzerindeki etkisi Bölüm 6'da detaylı olarak açıklanan Heffron-Philps modeliyle; büyük bozucuların

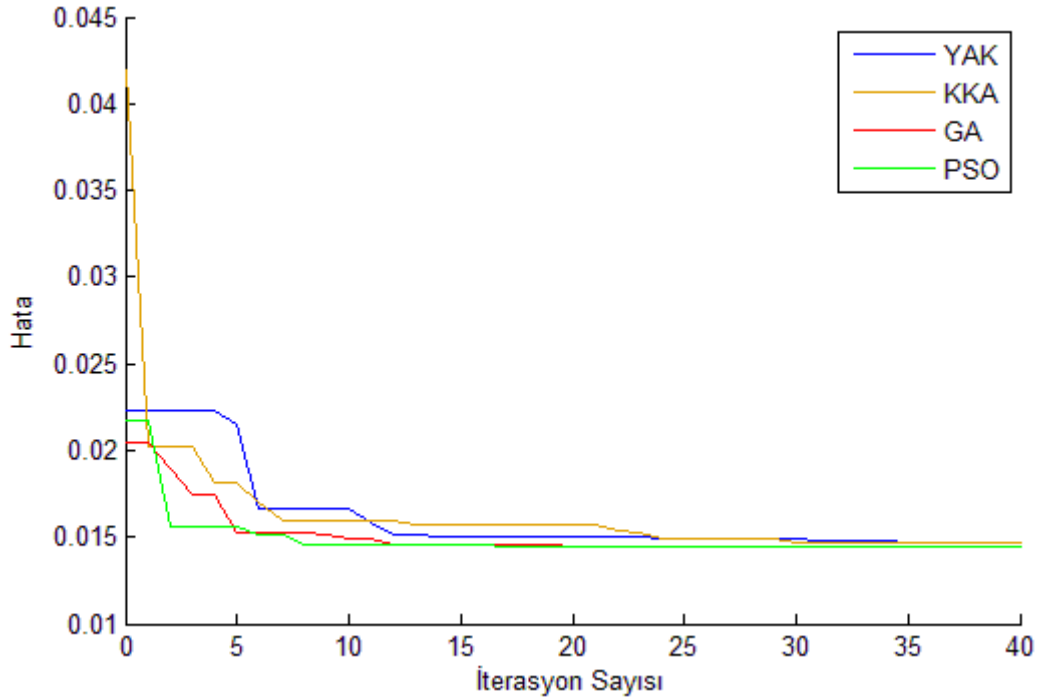
(kısa devre) senkron generatör üzerindeki etkisi ise Bölüm 6’da detaylı olarak açıklanan durum denklemleri (genel model) yardımıyla incelenecektir.

8.2.1 Küçük işaret kararlılığı için optimizasyon

Bu bölümde; senkron generatöre 0.01 pu ek yük gelmesi durumunda, senkron generatörün rotor hızındaki ($\Delta\omega$) salınımlarını minimize eden GSD parametreleri YAK, KKA, GA, PSO algoritmaları yardımıyla hesaplanmıştır. İlgili algoritmalar lineer model üzerinde 15 kere çalıştırılarak, algoritmaların başarıları test edilmiş olup, optimizasyon yaklaşık 9 saat sürmüştür. Optimizasyondan elde edilen en iyi GSD parametreleri Çizelge 8.5.’de ve algoritmaların öğrenme grafikleri Şekil 8.1 verilmiştir.

Çizelge 8.5: Optimizasyondan elde edilen en iyi parametreler.

							0.01 yük değişimi durumunda	0.1 sn 3 fazlı kısa devre durumunda
	Tw	Ks	T1	T2	T3	T4	ITAE	ITAE
YAK	20	24,745	0,1	0,011	0,141	0,141	0,015	550,601
GA	20	20,769	0,106	0,023	0,113	0,134	0,014	564,798
PSO	20	20,86	0,1	0,199	0,175	0,022	0,014	566,241
KKA	20	21,058	0,176	0,196	0,1	0,025	0,014	568,188
GSD YOK							3,9251	240,1916



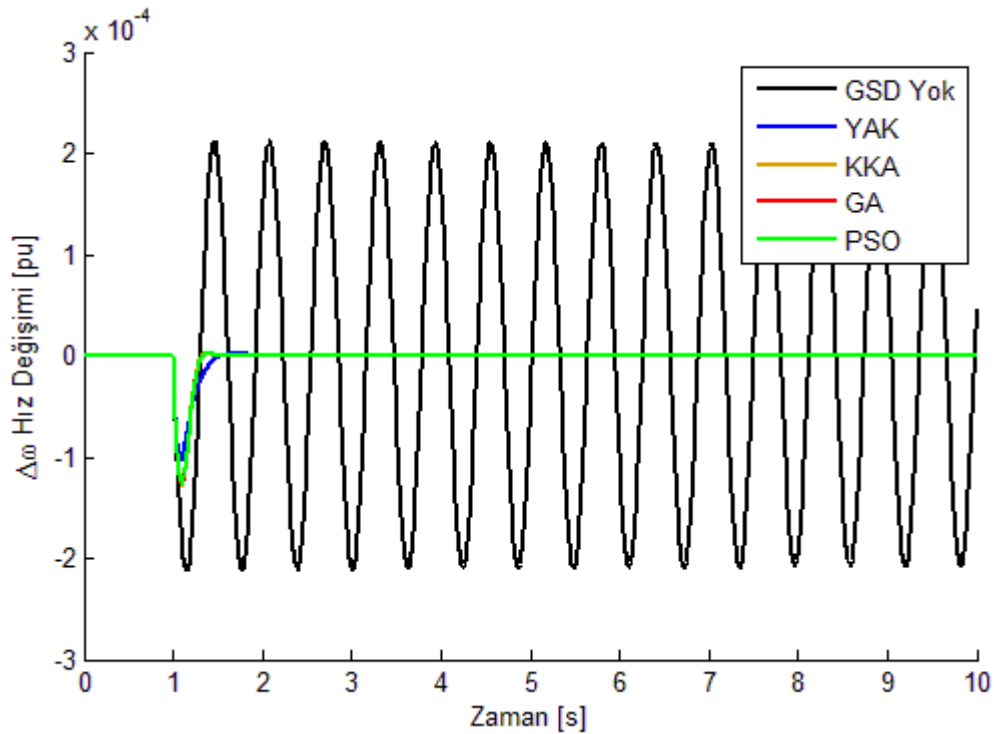
Şekil 8.1 : Öğrenme grafiği.

Öğrenme grafiği, optimizasyon süresince elde edilen parametrelerinin gelişimini göstermektedir. Grafiğe bakıldığında, her algoritma rotor hızı salınımları hemen hemen aynı miktarda azaltmıştır. Algoritmaların performansları, optimizasyonların sonunda elde edilen hata değerlerin (ITAE) ortalaması ve standart sapması üzerinden incelenmiştir. Çizelge 8.6 da verilen bu değerlere bakıldığında küçük işaret kararlılığı için en başarılı algoritmaların KKA ve PSO olduğu gözükmektedir.

Çizelge 8.6: Algoritmaların performansları.

	Ortalama	Standart Sapma
YAK	0,0176	0,0026
KKA	0,0146	0,0001
GA	0,0148	0,0012
PSO	0,0145	0,0001

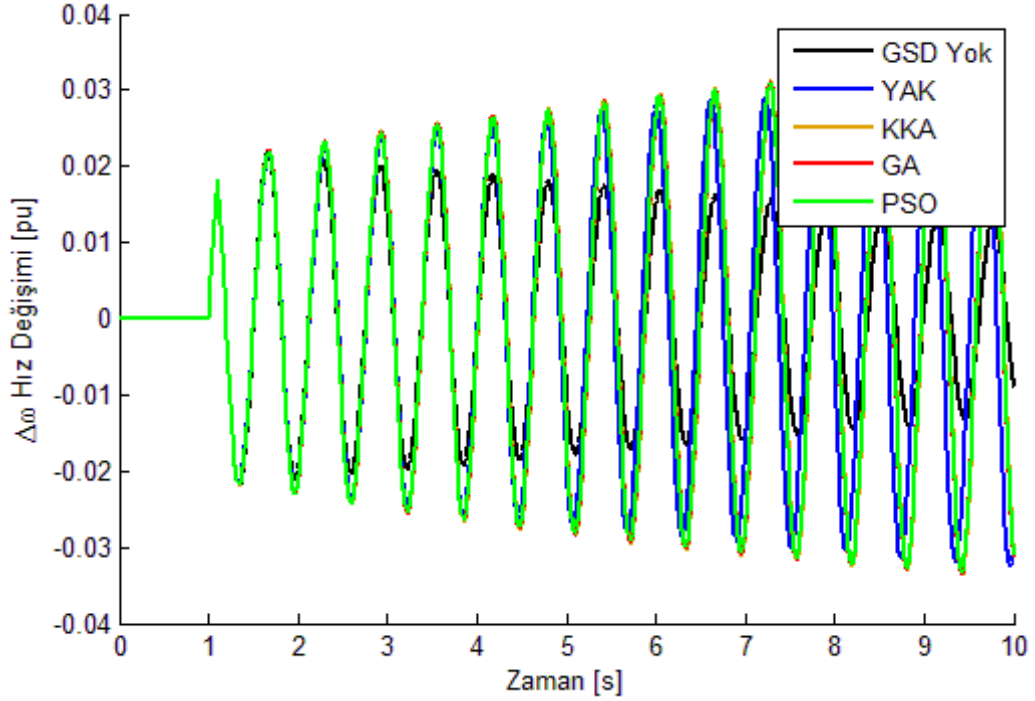
Optimizasyondan elde edilen GSD parametrelerinin, senkron generatöre 0.01 pu ilave yük gelmesi durumunda rotor hızındaki salınımları minimize etmesi beklenmektedir. Şekil 8.2 ye bakıldığında GSD nin çok iyi çalıştığı gözükmektedir.



Şekil 8.2 : Küçük işaret kararlılığı.

Fakat, senkron makinenin bağlı olduğu sonsuz güçlü barada 0.12 sn süren üç faz kısa devre arızası meydana geldiğinde, GSD hatalı çalışmakta ve bunun sonucunda senkron generatörün senkronizmadan çıkmasına sebep olmaktadır (Şekil 8.3). Küçük

yük değişimleri için optimize edilen GSD parametreleri sistemin farklı koşullarında sistemi olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebepten dolayı bu parametrelerin GSD için kullanılması doğru değildir.



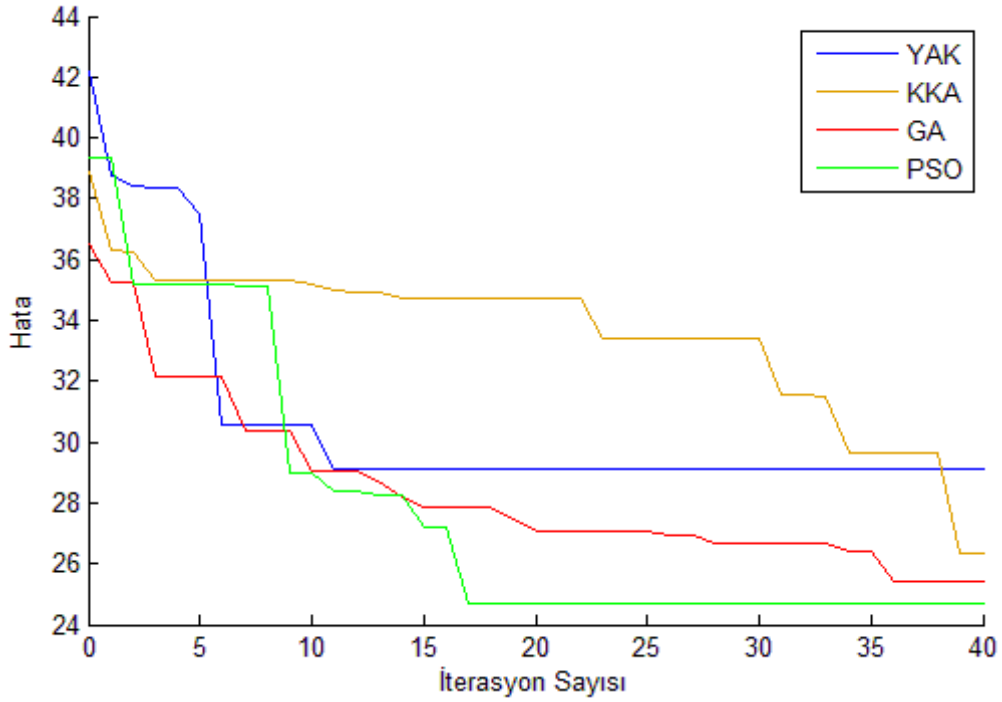
Şekil 8.3 : Geçici hal kararlılığı.

8.2.2 Geçici hal kararlılığı için optimizasyon

Bu bölümde; senkron generatörün bağlı olduğu sonsuz güçlü barada 0.12 sn süren üç faz kısa devre durumunda, senkron generatörün rotor hızındaki ($\Delta\omega$) salınımlarını minimize eden GSD parametreleri YAK, KKA, GA, PSO algoritmaları yardımıyla hesaplanmıştır. İlgili algoritmalar genel model (durum denklemleri) üzerinde 15 kere çalıştırılarak, algoritmaların başarıları test edilmiş olup, optimizasyon yaklaşık 11 saat sürmüştür. Optimizasyondan elde edilen en iyi GSD parametreleri Çizelge 8.7.'de ve algoritmaların öğrenme grafikleri Şekil 8.4'de verilmiştir.

Çizelge 8.7: Optimizasyondan elde edilen en iyi parametreler.

							0.01 yük değişimi durumunda	0.1 sn 3 faz kısa devre durumunda
	Tw	Ks	T1	T2	T3	T4	ITAE	ITAE
GA	1,1	0,64	0,808	0,028	0,681	0,057	6,496	25,438
KKA	16	0,1	1,544	0,014	0,936	0,014	0,968	26,33
PSO	9,2	0,1	2	0,023	2	0,101	3,084	24,719
YAK	5,8	0,198	0,931	0,095	1,844	0,016	1,983	29,115
GSD YOK							3,9251	240,1916

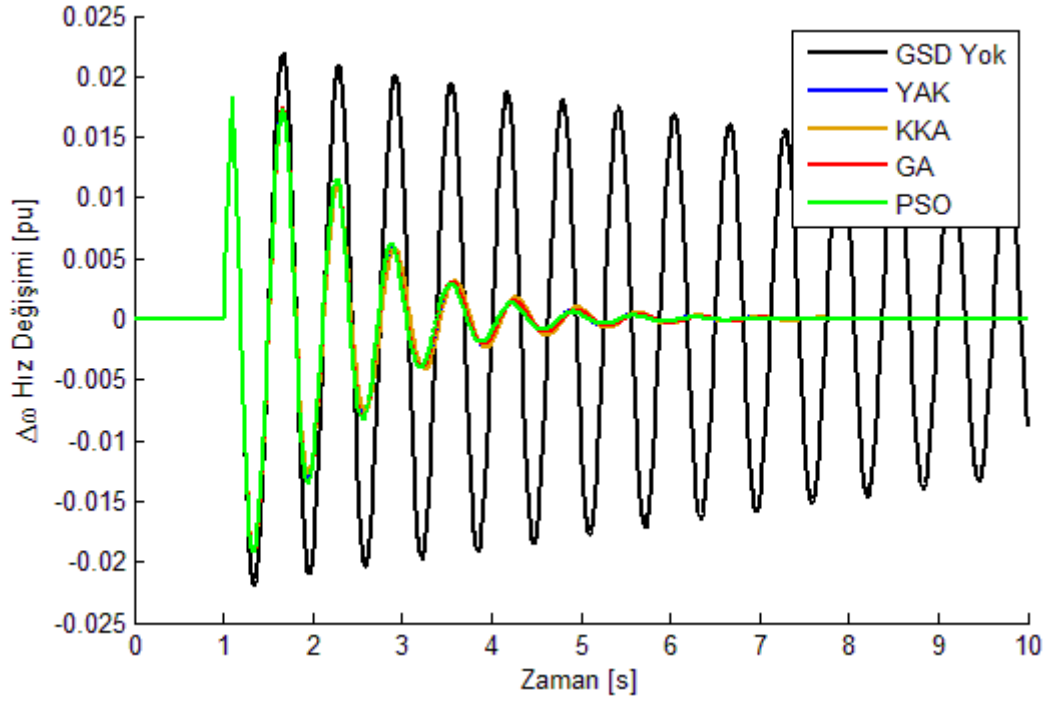


Şekil 8.4 : Öğrenme grafiği.

Öğrenme grafiği, optimizasyon süresince elde edilen parametrelerinin gelişimini göstermektedir. Grafiğe bakıldığında, PSO algoritmasının elde ettiği GSD parametreleri; diğer algoritmalarla göre daha iyi sonuç vererek, geçici hal kararlılığı durumunda rotor hızı salınımları minimize etmiştir. Algoritmaların performansları, optimizasyonların sonunda elde edilen hata değerlerin (ITAE) ortalaması ve standart sapması üzerinden incelenmiştir. Çizelge 8.8 de verilen bu değerlere bakıldığında geçici hal kararlılığı için en başarılı algoritmanın PSO olduğu gözükmemektedir.

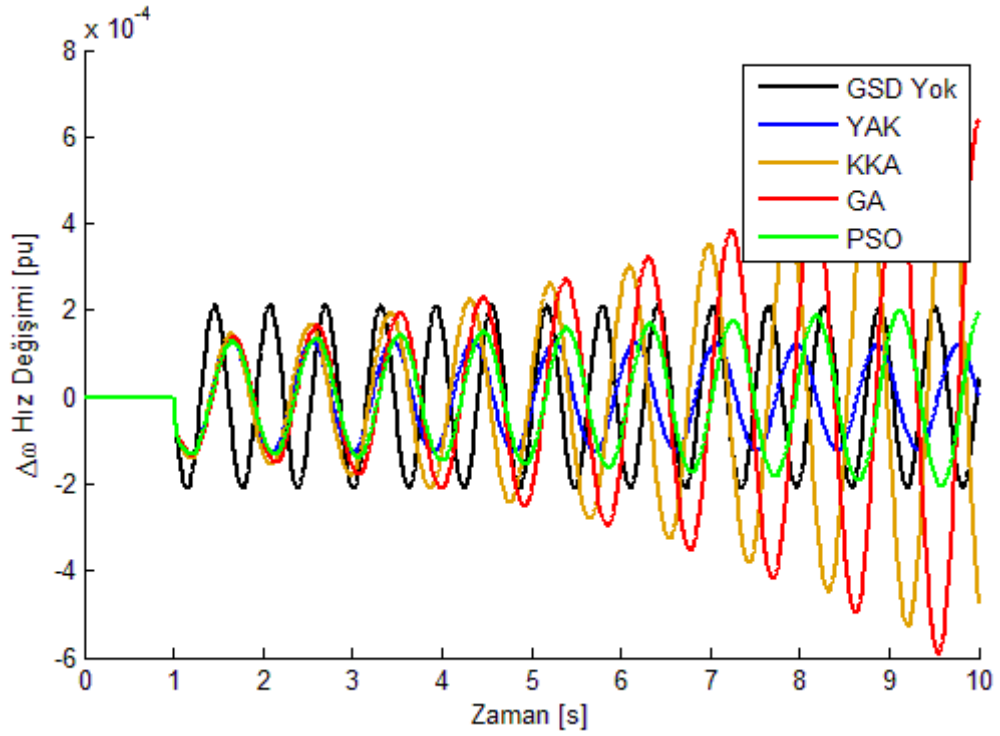
Çizelge 8.8: Algoritmaların performansları.

	Ortalama	Standart Sapma
YAK	31,2156	2,4155
KKA	30,4236	2,849
GA	30,1138	2,2416
PSO	26,9754	2,1027



Şekil 8.5 : Geçici hal kararlılığı.

Optimizasyondan elde edilen GSD parametrelerinin, senkron generatörün bağlı olduğu sonsuz güçlü barada 0.12 sn süren üç faz kısa devre durumunda rotor hızı salınımları minimize etmesi beklenmektedir. Şekil 8.5'e bakıldığında GSD nin çok iyi çalıştığı gözükmemektedir.



Şekil 8.6 : Küçük işaret kararlılığı.

Fakat, senkron generatöre 0.01 pu lik ek yük geldiğinde, GSD hatalı çalışmakta ve bunun sonucunda senkron generatörün senkronizmadan çıkmasına sebep olmaktadır (Şekil 8.6). Geçici hal kararlılığı için optimize edilen GSD parametreleri sistemin farklı koşullarında sistemi olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebepten dolayı bu parametrelerin GSD için kullanılması doğru değildir.

8.2.3 Küçük işaret ve geçici hal kararlılığı için optimizasyon

Bölüm 8.1’de küçük işaret kararlılığı için optimize edilen GSD’nin geçici hal durumlarında hatalı çalıştığı gösterilmiştir. Aynı şekilde, Bölüm 8.2’de geçici hal kararlılığı için optimize edilen GSD’nin küçük yük değişimlerinde hatalı çalıştığı gösterilmiştir.

Bu bölümde hem küçük işaret kararlılığının hem de geçici hal kararlılığının iyileştirilmesi için ortak GSD parametreleri hesaplanacaktır. Böylece elde edilen parametrelerin sistemin her türlü koşullarında rotor hızı salınımlarını minimize etmesi beklenmektedir. Optimizasyon Bölüm 7 de detaylı olarak anlatılan “Çok Amaçlı Optimizasyon Problemini Tek Amaçlı Optimizasyon Problemine İndirgenmesi” yöntemiyle yapılacaktır.

Senkron generatör işletme süresince sürekli olarak küçük yük değişimlerine maruz kalmaktadır, kısa devreler (büyük bozucu etkiler) işletme sırasında zaman zaman meydana gelen arızalardır. Bu sebepten dolayı çok amaçlı optimizasyonda küçük işaret kararlılığının, geçici hal kararlılığına göre daha fazla arttırılması amaçlanarak, optimizasyondaki ağırlık küçük işaret kararlılığına yönlendirilecektir. Optimizasyon problemi Denklem 8.1 de gösterilmiştir.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimize } f(\vec{x}) = w_1 \cdot f_{\text{Küçükİşaret}}(\vec{x}) + w_2 \cdot f_{\text{GeçiciHal}}(\vec{x}) \\ \vec{x} \in X \subset R^n \end{array} \right\} \quad (8.1)$$

Geçici hal analizinden (*fonksiyonundan*) elde edilen hata değeri (*ITAE*), küçük işaret analizinden elde edilen hata (*ITAE*) değerinden çok büyüktür. Bu şekilde tanımlanacak olan optimizasyon probleminde, küçük işaret kararlılığın gelişmesi beklenemez. Optimizasyon probleminde bu etkiyi kaldırmak için fonksiyonların sonuçların boyutlandırması (*scalarizing*) gerekmektedir. GSD’nin sistemde olmadığı durumda; küçük işaret kararlılığı analizinden alınan hata değeri (*ITAE*) değeri 3.92, geçici hal kararlılığından alınan hata değeri 240.19 olarak hesaplanmıştır. Bu

değerler için fonksiyon sonuçları boyutlandırılması Denklem (8.2) ve (8.3) de verilmiştir.

$$\bar{f}_{Küçükİşaret}(\vec{x}) = \frac{f_{Küçükİşaret}(\vec{x})}{3.92} \quad (8.2)$$

$$\bar{f}_{GeçiciHal}(\vec{x}) = \frac{f_{GeçiciHal}(\vec{x})}{240.19} \quad (8.3)$$

Yeni elde edilen boyutlandırılmış fonksiyonlar kullanılarak, optimizasyonda kullanılacak yeni ifade Denkelem (8.4) de gösterilmiştir.

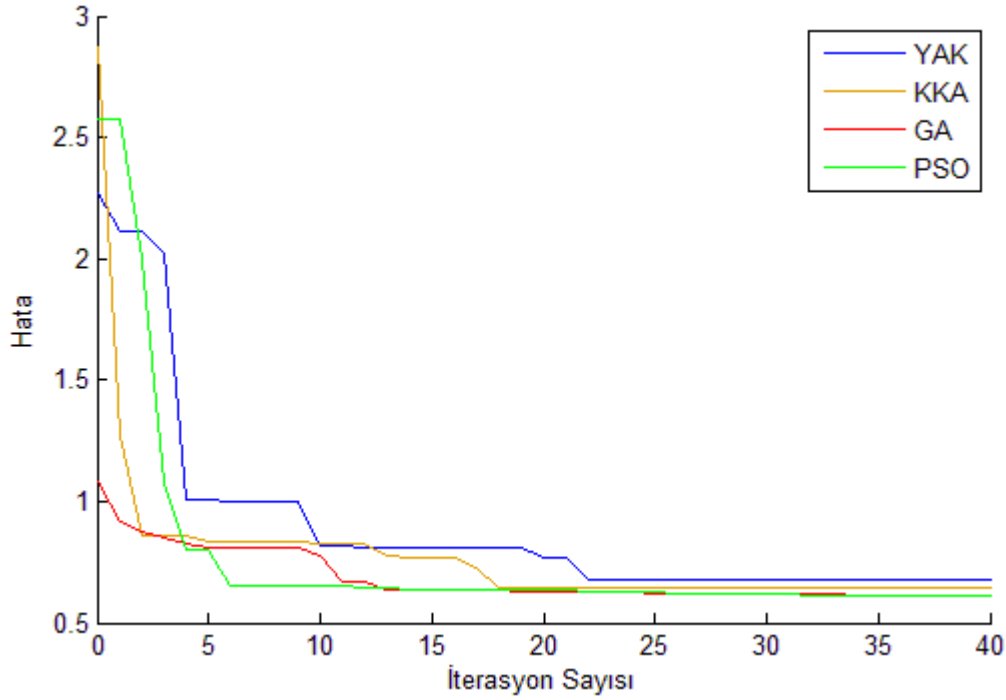
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimize } f(\vec{x}) = w_1 \cdot \bar{f}_{Küçükİşaret}(\vec{x}) + w_2 \cdot \bar{f}_{GeçiciHal}(\vec{x}) \\ \vec{x} \in X \subset R^n \end{array} \right\} \quad (8.4)$$

Yukarıda nedeni belirtildiği gibi optimizasyonun küçük işaret kararlılığına ağırlığını vermesi istenmekte, bu sebepten dolayı geçici hal fonksiyonunun ağırlığı $w_2 = 1$ olarak seçilmiştir. Küçük işaret fonksiyonun ağırlığı $w_1 = 1, w_1 = 10, w_1 = 25$ ve $w_1 = 50$ olma durumları tek tek incelenmiş olup optimizasyondan elde edilen parametreler EK B’de, algoritmaların performansları EK C’de, en iyi parametrelerin sistemdeki davranışları EK D’de verilmiştir. GSD nin küçük işaret kararlılığını en iyi şekilde arttıran ve geçici hal kararlılığında da sistemin düzelmesine yardımcı olan parametreleri $w_1 = 50$ durumunda hesaplanmıştır. $w_1 = 50$ durumunda optimizasyon yaklaşık 19 saat sürmüştür. Optimizasyondan elde edilen en iyi GSD parametreleri Çizelge 8.9.’de ve algoritmaların öğrenme grafikleri Şekil 8.7 verilmiştir.

Çizelge 8.9: Optimizasyondan elde edilen en iyi parametreler.

							0.01 yük değişimi durumunda	0.1 sn 3 faz kısa devre durumunda	
	Tw	Ks	T1	T2	T3	T4	ITAE	ITAE	50a + b
GA	14	10,353	0,11	0,019	0,1	0,033	0,049	45,263	0,612
YAK	9,8	10,527	0,1	0,017	0,1	0,031	0,031	51,341	0,645
KKA	11	10,08	0,1	0,018	0,138	0,04	0,034	57,719	0,632
PSO	4,1	10,745	0,1	0,018	0,1	0,033	0,031	51,534	0,613
GSD YOK							3,9251	240,1916	51

Not: Çizelgedeki a parametresi $\bar{f}_{Küçükİşaret}(\vec{x})$, b parametresi ise $\bar{f}_{GeçiciHal}(\vec{x})$ fonksiyonlarını temsil etmektedir.



Şekil 8.7 : Öğrenme grafiği.

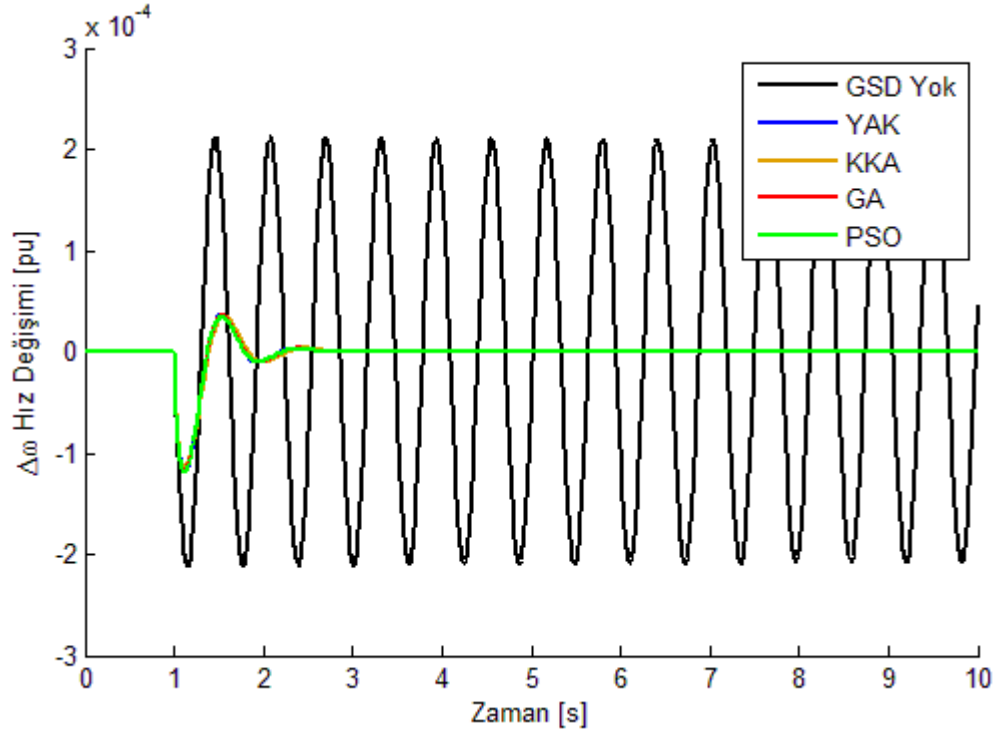
Öğrenme grafiği, optimizasyon süresince elde edilen parametrelerinin gelişimini göstermektedir. Grafiğe bakıldığında, her algoritmanın başarısı hemen hemen aynı miktarda azaltmıştır ancak şekildeki öğrenme grafiğinin 15 kez tekrarlanan optimizasyondaki en iyi parametrelerinin gelişimini gösterdiği unutulmamalıdır. Algoritmaların asıl performansları, optimizasyonların sonunda elde edilen hata değerlerin (ITAE) ortalaması ve standart sapması üzerinden incelenmesi gerekmektedir. Çizelge 8.10 da verilen bu değerlere ve EK C’ de verilen $w_1 = 1$, $w_1 = 10$, $w_1 = 25$ koşullarındaki algoritmaların performansına bakıldığında en başarılı algoritmaların GA olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.10: Algoritmaların performansları.

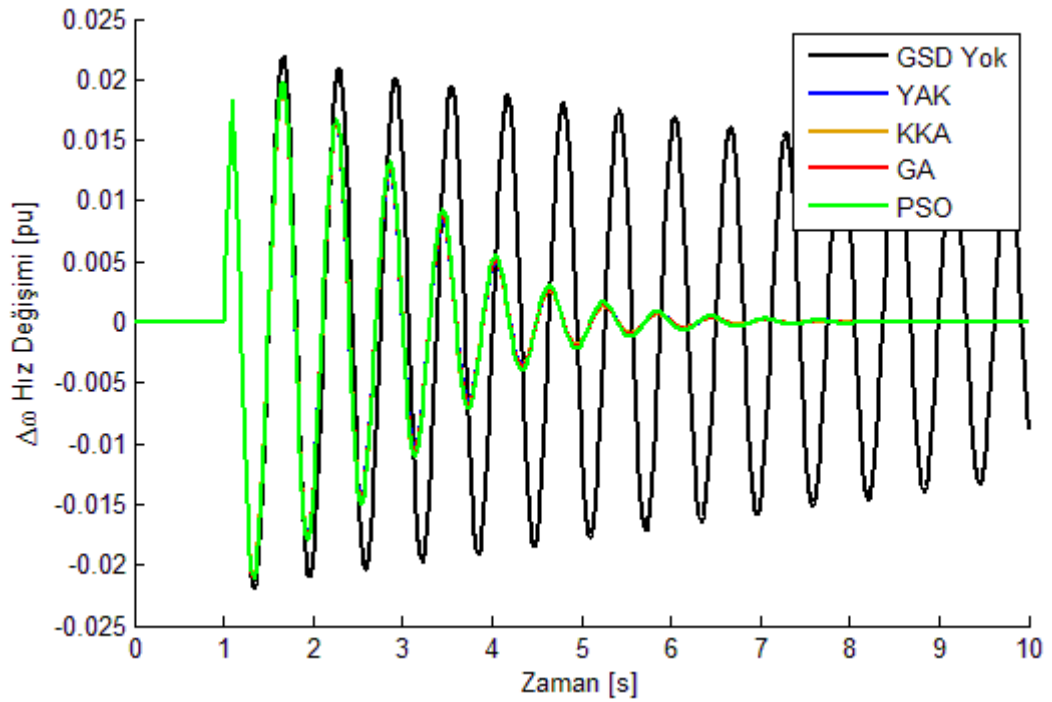
	Ortalama	Standart Sapma
YAK	0,7457	0,0748
KKA	0,7645	0,0833
GA	0,6614	0,0353
PSO	0,7082	0,1242

Optimizasyondan elde edilen GSD parametrelerinin, senkron generatöre 0.01 pu ilave yük gelmesi ve senkron generatörün bağlı olduğu sonsuz güçlü barada 0.12 sn

süren üç faz kısa devre durumlularında rotor hızındaki salınımları minimize etmesi beklenmektedir. Şekil 8.8'e ve Şekil 8.9'a bakıldığında GSD nin çok iyi çalıştığı gözükmemektedir ve EK-E de bu parametrelerin farklı yük koşullarındaki davranışları verilmiştir.



Şekil 8.8 : Küçük işaret kararlılığı.



Şekil 8.9 : Geçici hal kararlılığı.

Çizelge 8.11: Küçük işaret kararlılığında YAK, KKA ait oturma süresi ve maksimum genlikleri.

	YAK		KKA	
	Oturma Süresi	Maksimum Genlik	Oturma Süresi	Maksimum Genlik
$w_1 = 1, w_2 = 1$	4,454	1,196e-04	3,903	1,300e-04
$w_1 = 10, w_2 = 1$	3,061	1,168e-04	3,415	1,199e-04
$w_1 = 25, w_2 = 1$	3,139	1,070e-04	2,724	1,081e-04
$w_1 = 50, w_2 = 1$	2,487	1,178e-04	2,578	1,131e-04

Çizelge 8.12: Küçük işaret kararlılığında GA, PSO ait oturma süresi ve maksimum genlikleri.

	GA		PSO	
	Oturma Süresi	Maksimum Genlik	Oturma Süresi	Maksimum Genlik
$w_1 = 1, w_2 = 1$	3,822	1,305e-04	4,406	1,255e-04
$w_1 = 10, w_2 = 1$	2,864	1,261e-04	2,574	1,260e-04
$w_1 = 25, w_2 = 1$	2,479	1,258e-04	2,502	1,238e-04
$w_1 = 50, w_2 = 1$	2,500	1,171e-04	2,468	1,190e-04

Çizelge 8.11 ve Çizelge 8.12 ye bakıldığında her optimizasyon algoritmasından elde edilen parametrelerin küçük işaret analizindeki göstermiş olduğu davranışa ait rotor hızı salınımlarının maksimum genliği ve salınımların oturma süresini içeren veriler içermektedir. Optimizasyondaki küçük işaret fonksiyonuna ait ağırlık sabitinin w_1 artması rotorun açısal hızı salınımlarındaki maksimum genliği ve salınımların oturma sürelerinde azalma göstermektedir. Bu ise optimizasyonun; küçük işaret kararlılığına daha fazla önem verdiğinin bir göstergesidir.

Çizelge 8.13: Geçici hal kararlılığında YAK, KKA ait oturma süresi ve maksimum genlikleri.

	YAK		KKA	
	Oturma Süresi	Maksimum Genlik	Oturma Süresi	Maksimum Genlik
$w_1 = 1, w_2 = 1$	5,440	2,005e-02	5,759	2,052e-02
$w_1 = 10, w_2 = 1$	5,676	2,052e-02	5,719	2,046e-02
$w_1 = 25, w_2 = 1$	5,388	2,032e-02	5,655	2,057e-02
$w_1 = 50, w_2 = 1$	6,481	2,113e-02	6,201	2,094e-02

Çizelge 8.14: Geçici hal kararlılığında GA, PSO ait oturma süresi ve maksimum genlikleri.

	GA		PSO	
	Oturma Süresi	Maksimum Genlik	Oturma Süresi	Maksimum Genlik
$w_1 = 1, w_2 = 1$	5,792	2,058e-02	5,465	2,018e-02
$w_1 = 10, w_2 = 1$	6,267	2,106e-02	5,973	2,101e-02
$w_1 = 25, w_2 = 1$	6,512	2,123e-02	6,493	2,118e-02
$w_1 = 50, w_2 = 1$	6,462	2,111e-02	6,496	2,116e-02

Çizelge 8.13 ve Çizelge 8.14’e bakıldığında her optimizasyon algoritmasından elde edilen parametrelerin geçici hal kararlılığı analizindeki göstermiş olduğu davranışa ait rotor hızı salınımlarının maksimum genliği ve salınımların oturma süresini içeren veriler içermektedir. Optimizasyondaki küçük işaret fonksiyonuna ait ağırlık sabitinin w_1 artmasıyla, rotorun açısal hızı salınımlarındaki maksimum genliği ve salınımların oturma süreleri artmıştır. Bu ise optimizasyonun; küçük işaret kararlılığına daha fazla önem verdiğinin bir göstergesidir.

8.3 Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

GSD’ nin optimal parametreleri; üç farklı durum için incelenmiş; küçük işaret kararlılığını arttırmak için hesaplan parametreler, geçici hal kararlılığını bozmuş; aynı şekilde geçici hal kararlılığını arıttırmak için hesaplanan parametreler, küçük işaret kararlılığını bozmuşdur. Bu sebepten dolayı “Çok Amaçlı Optimizasyon” önerilmiş olup, böylelikle her iki durum için rotor hızı salınımlarını minimize eden ortak GSD parametreleri Yapay Arı Kolonisi, Karıca Kolonisi Algoritması, Genetik Algoritma ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu algoritmaları yardımıyla elde edilmiştir. “Çok Amaçlı Optimizasyon” nun çözümü için “Çok Amaçlı Optimizasyon Problemini Tek Amaçlı Optimizasyon Problemine İndirgenmesi” yöntemi belirlenmiştir. Algoritmaların performansları, optimizasyonların sonunda elde edilen hata değerlerin (ITAE) ortalaması ve standart sapması üzerinden incelenip, “Tek Amaçlı Optimizasyon” yönteminde *Parçacık Sürüsü Optimizasyon* algoritması, “Çok Amaçlı Optimizasyon” yönteminde ise *Genetik Algoritmanın* en başarılı algoritmalar olduğuna karar verilmiştir.

9. SONUÇ

1950'lerden 1960'lara kadar elektrik santralleri jeneratör ünitelerindeki hız regülatörleri ile kesintisiz ve hızlı ayar yapan otomatik gerilim regülatörleri, enerji sistemleri kararlılığını sağlamış olmakla beraber, santral sayısının artması, bu santrallerdeki türbin, jeneratör ve donanımlarındaki teknik özellik farklılıkları, güç sistemi kararlılığını bozan olumsuz etkiler göstermiş, şebekede oluşan düşük genlikli ve frekanslı güç salınımları, uzun periyodlar ile devam ettiğinden, bazı hallerde enterkonnekte sistemde enerji iletimini sınırlayacak boyutlara ulaşmıştır.

Son bir kaç on yıldır sistem kararlılığı güvenilirliğinin artırılmasında, güç sistemi dengeleyicileri gerilim regülatörleri ile birlikte kullanılarak, jeneratörlerin uyarma akımlarının değişimi ve uygulama zamanları modüle edilerek, olumlu senkronizasyon ve sönümleme momentleri üretilmiş, sistemdeki frekans ve gerilim değişimleri belirli sınırlar içinde tutularak, sistemin kararlı çalışabilmesi sağlanmıştır.

Tüm dünyada yaygın olarak kullanılan güç sistemi dengeleyicileri 2006 yılından itibaren Kuzey Batı Amerika ve Kanada'da Enerji Yasası Mevzuatı ile NERC (North American Reliability Council) tarafından yayınlanan standartlarda 35 MVA ya da toplam 75 MVA kurulu gücü olan elektrik santrallerinde, iletim sistemlerinde, sistem kararlılığının artırılması için zorunlu hale getirilmiştir.

Türkiye'de ise, TEİAŞ sisteminin, ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators For Electricity) ile entegrasyonu çalışmaları kapsamında, 03 Ocak 2013 yılında yayınlanan EPDK/TEİAŞ Şebeke yönetmenliğinin 19 ve 21. maddeleri ile enterkonnekte sistemde ortaya çıkabilecek $\pm 0,5$ Hz arasındaki düşük frekanslı elektromekanik salınımlara karşı, kurulu gücü 50 MW ve üstü olan elektrik santrallerdeki ünitelerin otomatik gerilim regülatöründe, elektriksel sönümleme sağlama özelliğine sahip bir güç sistemi dengeleyicisi bulunması, iletim sistemi kararlılığının artırılması için zorunlu hale getirilmiştir.

Yapay Arı Kolonisi, Karınca Kolonisi Algoritması, Genetik Algoritma ve Parçacık Sürüş Optimizasyonu algoritmalarıyla; güç sisteminin hem küçük işletme kararlılığını, hem de geçici hal kararlılığını arttıracak, güç sistemi dengeleyicisi parametreleri “Çok Amaçlı Optimizasyon Problemini Tek Amaçlı Optimizasyon Problemine İndirgenmesi” yöntemiyle belirlenmiştir. Küçük yük değişimlerinin senkron generatör üzerindeki etkisi güç sisteminin lineerleştirilmiş bir modeli olan Heffron-Phillips modeliyle; arızaların senkron generatör üzerindeki etkisi ise durum denklemleri yardımıyla incelenmiştir. Algoritmaların performansları, optimizasyonların sonunda elde edilen hata değerlerin (ITAE) ortalaması ve standart sapması üzerinden incelenmiş, bu yöntem için en başarılı optimizasyon algoritmasının *Genetik Algoritma* olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Çalışkan, K., ve diğerleri**, “Orta Gerilim Elektrik Tesislerinde Koruma ve Kontrol”, *Türkiye Elektrik İletim A.Ş.*, 1990
- [2] **TEİAŞ**, “Primer Frekans Kontrol Hizmetinin Uygulanmasına İlişkin El Kitabı”, *Türkiye Elektrik İletim A.Ş.*, 2009
- [3] **Kundur, P., ve diğerleri**, “Definition and classification of power system stability, IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, 2004.
- [4] **TEİAŞ**, “Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği” , *Türkiye Elektrik İletim A.Ş.*, 2013
- [5] **IEC**, “Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules” *IEC 60071-1:2006*, 2006
- [6] **TEİAŞ**, “İTM 74 Genel Teknik Montaj Şartnamesi”, *Türkiye Elektrik İletim A.Ş.*, 2013
- [7] **Demirören, A., Zeynelgil, H. L.**, “*Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması*” Birsan Yayınevi, 2004
- [8] **TEİAŞ**, “Şebeke Yönetmeliği”, *Türkiye Elektrik İletim A.Ş.*, 2013
- [9] **Applied Protective Relay**, *Westinghouse Electric Corporation*, Bölüm 20.2.C. 1982
- [10] **Kundur, P.**, “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, 1994
- [11] **Basler, M.J.; Schaefer, R.C.**, “*Understanding Power-System Stability*,” Industry Applications, *IEEE Transactions on* , vol.44, 2008
- [12] **Machowski, J. ve diğerleri**, “*Power System Dynamics: Stability and Control*”, John Wiley & Sons, 2008.
- [13] **IEEE**, “*IEEE Guide for the Preparation of Excitation System Specifications*” IEEE Std 421.4, 2004.
- [14] **Bayliss, C.R, Hardy. B.J**, *Transmission and Distribution Electrical Engineering*, 3rd. Edition, 2007
- [15] **IEEE**, “*IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems*,” IEEE Std 421.2, 1990
- [16] **IEEE**, “*IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*,” IEEE Std 421.5, 2006.
- [17] **Padiyar, K. R.**, “*Power System Dynamics : Stability and Control*”, BS Publications, Second Edition, 2008

- [19] **Demirören, A., Zeynelgil, H.L.**, “Modelling and simulation of synchronous machine transient analysis using *SIMULINK*”, International Journal of Electrical Engineering, 2002
- [20] **Report, I.C.**, “Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies”, Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on , vol.PAS-92, 1973
- [21] **Tacer, E.**, “Enerji Sistemlerinde Kararlılık”, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, 1990, İstanbul
- [22] **Akay, B.**, “Nümerik Optimizasyon Problemlerinde Yapay Ari Kolonisi Algoritmasının Performans Analizi”, Erciyes Üniversitesi s.1-10 ,2009
- [23] **Watanabe, S., Sakakibara, K.**, “Multi-objective approaches in a single-objective optimization environment,” Evolutionary Computation, 2005.
- [24] **Ishibuchi, H., Nojima, Y.**, “Optimization of scalarizing functions through evolutionary multiobjective optimization,” Evolutionary Multi-Criterion Optimization - EMO 2007, pp. 51-65, Springer, Berlin, 2007
- [18] **Küçüktezcan, F.**, “Genetik Algoritma ile Optimize Edilmiş Bulanık Güç Sistemi Kararlı Kılıcısının Sistem Kararlılığına Etkisi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008
- [25] **Eiben, A., Smith, J.**, “Introduction to Evolutionary Computing”, Springer, 2003.
- [26] **Emel, G., Taşkın, Ç.**, “Genetik Algoritmalar ve Uygulama Alanları”, Uludağ Üniversitesi ,s.134, 2002
- [27] **Hassan L. H ve diğerleri**, "Power system stabilization based on artificial intelligent techniques; A review," in *Technical Postgraduates (TECHPOS)*, International Conference, 2009.
- [28] **Bratton. D., ve Kennedy J.**, "Defining a Standard for Particle Swarm Optimization," in *Swarm Intelligence Symposium*, IEEE, 2007
- [29] **Tamer, S. ve Karakuzu, C.**, “Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması ve Benzetim Örnekleri”, Kocaeli Üniversitesi
- [30] **Padhy N. P.**, “Robust Power System Stabilizer Design using Particle Swarm Optimization Technique”, International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2008
- [31] **Tapkan, P. ve diğerleri**, “Arı Algoritması ve Genelleştirilmiş Atama Problemi Farklı Komşuluk Yapılarının Karşılaştırılması”, Endüstri Mühendisliği Dergisi, 2008
- [32] **D. Karaboga ve B. Gorkemli**, "A quick artificial bee colony -qABC- algorithm for optimization problems," in *Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, 2012 International Symposium, 2012
- [33] **Helio, J.C.**, “Ant Colony Optimization - Methods and Applications”, InTech, 2013

- [34] **Chiha, I. ve diğerleri**, “*Tuning PID Controller Using Multiobjective Ant Colony Optimization*” Applied Computational Intelligence and Soft Computing, 2012
- [35] **Dorigo, M.**, “*Ant Algorithms for Discrete Optimization*” Artificial Life, 1999

EKLER

EK A: Generatörün plaka değeri ve transformatörlerin test raporları

EK B: Optimizasyondan elde edilen parametreler

EK C: Algoritmaların performansları

EK D: En iyi parametrelerin sistemdeki davranışları

EK E: Farklı yük koşullarında GSD nin davranışı

EK A: Generatörün plaka değeri ve transformatörlerin test raporları

EK B: Optimizasyondan elde edilen parametreler

KÜÇÜK İŞARET KARARLILIĞI (0,01 PU DEĞİŞİM) İÇİN OPTİMİZASYON										
								0.01 yük değişimi	0.1 sn 3 fazlı kısa devre	
		Tw	Ks	T1	T2	T3	T4	ITAE	ITAE	Süre
1	YAK	20	14,549	0,503	0,2	0,1	0,066	0,02	580,831	543,57
1	KKA	18,48	22,056	0,176	0,185	0,1	0,033	0,015	575,076	539,618
1	GA	20	21,048	0,12	0,168	0,131	0,028	0,014	568,848	539,484
1	PSO	20	20,995	0,151	0,02	0,1	0,173	0,014	563,13	541,403
2	YAK	20	24,745	0,1	0,011	0,141	0,141	0,015	550,601	536,177
2	KKA	19,62	22,056	0,138	0,025	0,1	0,154	0,015	572,729	541,109
2	GA	19,958	20,696	0,113	0,127	0,1	0,022	0,014	561,341	526,005
2	PSO	20	20,938	0,103	0,126	0,106	0,021	0,014	564,538	536,68
3	YAK	20	23,982	0,1	0,2	0,235	0,044	0,016	583,596	539,71
3	KKA	20	23,054	0,1	0,192	0,176	0,033	0,015	580,298	539,47
3	GA	19,735	20,826	0,103	0,024	0,116	0,135	0,014	567,375	541,966
3	PSO	20	20,933	0,1	0,117	0,1	0,02	0,014	563,642	535,482
4	YAK	20	18,524	0,1	0,046	0,1	0,076	0,015	568,757	540,389
4	KKA	20	22,056	0,1	0,154	0,138	0,025	0,015	569,952	538,106
4	GA	20	20,923	0,16	0,183	0,103	0,025	0,014	564,899	544,951
4	PSO	20	21,306	0,1	0,117	0,1	0,019	0,014	562,093	535,833
5	YAK	17,568	24,734	0,227	0,2	0,205	0,081	0,018	582,212	538,533
5	KKA	20	21,058	0,1	0,158	0,138	0,025	0,015	568,946	539,223
5	GA	20	21,01	0,138	0,024	0,104	0,162	0,014	566,422	533,511
5	PSO	12,029	21,776	0,1	0,2	0,173	0,022	0,015	568,256	541,475
6	YAK	20	23,096	0,1	0,015	0,183	0,2	0,015	554,377	533,736
6	KKA	18,1	20,06	0,138	0,147	0,1	0,025	0,015	563,048	542,104
6	GA	19,902	21,014	0,103	0,026	0,151	0,171	0,014	568,254	532,39
6	PSO	20	20,836	0,1	0,022	0,1	0,116	0,014	563,451	547,54
7	YAK	12,014	25,887	0,216	0,065	0,155	0,2	0,017	583,433	534,989
7	KKA	20	25,05	0,1	0,018	0,138	0,185	0,015	570,212	538,231
7	GA	19,894	21,051	0,172	0,025	0,106	0,2	0,014	566,775	543,105
7	PSO	19,934	21,003	0,1	0,024	0,172	0,192	0,014	565,649	543,52
8	YAK	20	9,557	0,1	0,052	0,473	0,2	0,019	557,057	534,391
8	KKA	19,62	21,058	0,176	0,021	0,1	0,2	0,014	563,998	539,842
8	GA	18,489	9,797	0,444	0,199	0,1	0,049	0,019	552,678	532,462
8	PSO	19,569	20,975	0,1	0,117	0,1	0,019	0,014	563,85	540,943
9	YAK	20	11,08	0,123	0,11	0,59	0,149	0,023	580,891	540,14
9	KKA	20	22,056	0,1	0,105	0,1	0,033	0,015	575,699	536,793
9	GA	20	20,769	0,106	0,023	0,113	0,134	0,014	564,798	531,603
9	PSO	20	20,891	0,1	0,116	0,1	0,02	0,014	564,734	538,774
10	YAK	20	29,397	0,229	0,189	0,1	0,028	0,016	572,201	549,667
10	KKA	20	23,054	0,138	0,021	0,1	0,162	0,015	570,897	541,928
10	GA	19,631	21,289	0,144	0,188	0,123	0,03	0,015	567,345	543,944

10	PSO	20	20,638	0,122	0,138	0,1	0,023	0,014	566,158	537,455
11	YAK	20	12,386	0,451	0,2	0,1	0,061	0,019	575,997	542,447
11	KKA	18,86	22,056	0,138	0,196	0,138	0,029	0,015	568,887	542,628
11	GA	20	20,904	0,15	0,169	0,102	0,025	0,014	567,925	536,728
11	PSO	20	20,885	0,1	0,116	0,1	0,021	0,014	563,827	537,237
12	YAK	20	29,579	0,1	0,022	0,151	0,2	0,015	579,612	574,626
12	KKA	19,62	21,058	0,138	0,025	0,1	0,154	0,014	568,745	540,958
12	GA	11,957	21,299	0,123	0,172	0,132	0,03	0,015	572,453	546,224
12	PSO	19,78	20,779	0,1	0,115	0,1	0,021	0,014	563,476	540,998
13	YAK	16,435	26,957	0,1	0,057	0,1	0,071	0,015	583,129	536,209
13	KKA	20	21,058	0,138	0,029	0,138	0,2	0,015	565,331	547,341
13	GA	20	20,905	0,115	0,143	0,111	0,022	0,014	564,287	536,928
13	PSO	20	20,86	0,1	0,199	0,175	0,022	0,014	566,241	541,419
14	YAK	20	6,991	0,1	0,2	0,71	0,061	0,021	563,628	534,372
14	KKA	20	27,046	0,176	0,181	0,1	0,04	0,015	584,621	536,595
14	GA	20	21,264	0,136	0,168	0,114	0,028	0,014	569,033	533,538
14	PSO	19,919	21,067	0,179	0,2	0,1	0,024	0,014	563,885	546,875
15	YAK	13,7	22,834	0,256	0,114	0,201	0,152	0,019	582,687	534,257
15	KKA	20	21,058	0,176	0,196	0,1	0,025	0,014	568,188	535,595
15	GA	20	20,847	0,103	0,127	0,107	0,02	0,014	562,157	541,208
15	PSO	18,827	21,534	0,1	0,192	0,165	0,023	0,015	570,647	535,464
	GSD YOK							3,9251	240,1916	
							Toplam Zaman:	8,99	saat	

GEÇİCİ HAL KARARLILIĞI (0,1 SN ÜÇ FAZ KISA DEVRE) İÇİN OPTİMİZASYON										
								0.01 yük değişimi	0.1 sn 3 fazlı kısa devre	
		Tw	Ks	T1	T2	T3	T4	ITAE	ITAE	Süre
1	YAK	1	0,1	1,693	0,017	2	0,094	12,095	30,364	634,348
1	KKA	1	37,026	1,924	0,04	1,696	0,014	7,851	32,395	634,426
1	GA	1,072	14,871	1,872	0,048	2	0,033	9,302	31,823	636,475
1	PSO	14,69	0,1	2	0,033	1,949	0,061	13,377	25,803	644,683
2	YAK	1,252	0,1	2	0,063	2	0,022	31,974	31,643	636,525
2	KKA	1,76	0,1	2	0,014	1,848	0,132	1,844	27,13	637,928
2	GA	1,146	0,64	0,808	0,028	0,681	0,057	6,496	25,438	643,84
2	PSO	1	48,109	1,331	0,01	2	0,049	10,163	30,354	636,366
3	YAK	1	28,726	0,845	0,013	1,787	0,105	15,75	31,222	633,688
3	KKA	13,92	0,1	1,81	0,078	1,734	0,018	5,551	27,522	637,088
3	GA	2,632	7,497	1,691	0,012	0,904	0,063	7,975	30,157	627,523
3	PSO	12,904	0,1	1,715	0,022	1,936	0,055	18,332	28,525	638,367
4	YAK	3,47	0,155	1,359	0,114	1,801	0,045	0,472	33,348	638,658
4	KKA	15,82	0,1	1,544	0,014	0,936	0,014	0,968	26,33	640,265
4	GA	1,021	12,646	0,846	0,012	0,734	0,086	8,369	29,553	632,343
4	PSO	16,62	0,1	1,767	0,032	2	0,059	11,796	25,177	637,734
5	YAK	1,012	2,286	2	0,012	1,702	0,087	7,765	29,148	638,617
5	KKA	10,12	0,1	1,962	0,086	1,658	0,018	4,491	27,539	642,424
5	GA	1,025	14,008	1,434	0,048	1,555	0,012	6,087	32,185	626,713
5	PSO	7,058	0,1	1,928	0,054	1,864	0,036	15,081	26,388	636,462
6	YAK	4,117	0,1	1,68	0,012	2	0,066	0,52	30,829	636,69
6	KKA	5,18	2,096	0,442	0,048	0,214	0,014	0,187	32,528	644,685
6	GA	1,074	32,133	1,956	0,066	1,947	0,011	8,702	32,799	621,415
6	PSO	17,836	3,074	1,52	0,011	0,887	0,056	6,614	31,899	643,465
7	YAK	1,298	0,1	2	0,052	1,984	0,025	31,54	30,803	634,233
7	KKA	8,6	1,098	1,506	0,029	0,1	0,029	0,114	28,689	645,897
7	GA	1	10,308	2	0,065	1,828	0,011	8,053	31,773	637,352
7	PSO	1	0,1	0,54	0,01	1,871	0,016	3,031	26,041	638,671
8	YAK	1	16,662	0,957	0,012	1,6	0,113	13,371	32,933	643,051
8	KKA	1	30,04	0,86	0,014	1,126	0,071	6,724	32,852	637,733
8	GA	1,003	7,503	1,981	0,05	1,963	0,012	6,12	31,795	633,47
8	PSO	6,521	0,1	1,559	0,019	2	0,077	6,561	24,817	640,145
9	YAK	1	1,492	0,397	0,054	0,606	0,029	1,516	30,111	633,789
9	KKA	17,72	1,098	0,366	0,033	0,822	0,044	0,778	28,546	643,716
9	GA	18,846	1,177	0,279	0,017	0,351	0,01	0,874	25,447	627,446
9	PSO	13,229	0,1	1,673	0,01	1,665	0,06	28,3	27,34	637,576
10	YAK	18,389	0,1	1,503	0,01	1,708	0,049	15,46	31,256	646,623
10	KKA	1	1,098	1,316	0,014	0,214	0,071	0,441	31,403	643,215
10	GA	1,021	4,67	1,69	0,051	1,693	0,011	6,159	31,739	630,566

10	PSO	9,241	0,1	2	0,023	2	0,101	3,084	24,719	637,551
11	YAK	5,758	0,198	0,931	0,095	1,844	0,016	1,983	29,115	637,859
11	KKA	13,16	6,088	0,556	0,01	1,316	0,048	6,644	31,902	637,188
11	GA	1,005	3,206	2	0,012	0,988	0,084	8,321	28,776	628,851
11	PSO	1	0,1	2	0,097	1,816	0,02	12,942	25,409	644,184
12	YAK	7,22	10,866	1,356	0,013	2	0,122	14,996	33,01	646,592
12	KKA	1	36,028	0,784	0,014	1,658	0,078	8,442	33,419	638,285
12	GA	3,753	5,964	1,363	0,012	1,639	0,064	7,396	30,058	622,691
12	PSO	1	0,1	1,256	0,012	1,384	0,018	23,429	27,699	642,463
13	YAK	1	9,534	1,149	0,013	1,455	0,066	6,567	33,124	648,291
13	KKA	10,88	0,1	1,886	0,078	1,848	0,021	6,953	27,67	646,579
13	GA	1	27,295	2	0,049	2	0,013	6,308	30,726	615,588
13	PSO	4,138	0,1	1,191	0,016	0,881	0,01	2,329	27,424	594,734
14	YAK	1	17,077	1,129	0,013	0,799	0,116	10,294	31,653	590,803
14	KKA	1	13,074	1,924	0,025	2	0,056	8,242	34,465	596,848
14	GA	4,221	2,379	1,688	0,012	2	0,071	6,866	30,514	629,762
14	PSO	8,701	0,1	2	0,029	1,072	0,01	2,334	28,023	593,508
15	YAK	1	4,317	1,47	0,013	2	0,138	10,275	29,677	616,402
15	KKA	1,38	41,018	1,582	0,037	2	0,04	9,643	33,961	680,822
15	GA	1,002	4,435	1,688	0,012	1,109	0,08	7,131	28,923	627,687
15	PSO	16,42	0,1	2	0,023	1,8	0,077	7,368	25,013	618,024
	GSD YOK							3,9251	240,1916	
							Toplam Zaman:	10,57	saat	

$w_1 = 1, w_2 = 1$ İÇİN OPTİMİZASYON											
								0.01 yük değişimi	0.1 sn 3 fazlı kısa devre		
		Tw	Ks	T1	T2	T3	T4	ITAE	ITAE	a + b	Süre
1	YAK	7,576	0,38	0,966	0,016	1,058	0,2	0,163	31,232	0,171	1078,048
1	GA	5,034	4,022	0,19	0,021	0,309	0,057	0,121	30,339	0,14	1083,388
1	KKA	19,62	2,096	0,328	0,018	0,328	0,082	0,087	28,416	0,157	1104,575
1	PSO	1	2,629	0,663	0,022	0,1	0,04	0,112	27,591	0,143	1090,772
2	YAK	1	3,171	0,404	0,2	0,376	0,013	0,077	38,458	0,18	1098,941
2	GA	3,318	3,477	0,108	0,019	0,38	0,039	0,098	32,437	0,146	1096,326
2	KKA	13,92	1,098	0,48	0,177	0,632	0,018	0,08	30,176	0,16	1418,075
2	PSO	1	5,529	0,307	0,028	0,1	0,025	0,075	30,122	0,144	1272,775
3	YAK	10,045	1,288	0,84	0,071	0,195	0,021	0,148	32,447	0,173	1219,597
3	GA	1,052	4,389	0,135	0,04	0,29	0,02	0,153	30,553	0,145	1172,339
3	KKA	4,42	1,098	0,328	0,116	0,822	0,018	0,094	29,191	0,166	1395,204
3	PSO	18,886	0,231	0,92	0,147	1,945	0,01	0,187	31,741	0,18	1440,269
4	YAK	3,012	2,14	0,934	0,026	0,19	0,068	0,152	36,134	0,189	1161,357
4	GA	8,746	1,883	0,324	0,015	0,469	0,144	0,104	32,13	0,15	1215,448
4	KKA	7,84	1,098	0,898	0,018	0,328	0,151	0,087	30,667	0,16	1196,406
4	PSO	18,459	2,937	0,281	0,061	0,176	0,015	0,087	30,792	0,15	1159,812
5	YAK	12,682	2,391	0,472	0,056	0,242	0,02	0,173	28,922	0,165	1185,559
5	GA	19,003	2,708	0,121	0,045	0,491	0,022	0,093	30,489	0,145	1188,253
5	KKA	1,76	3,094	0,404	0,018	0,1	0,029	0,083	29,858	0,151	1176,416
5	PSO	17,391	0,1	1,5	0,114	1,908	0,01	0,202	30,766	0,179	1252,363
6	YAK	5,18	3,452	0,494	0,017	0,1	0,07	0,055	44,67	0,2	1321,367
6	GA	3,363	1,969	0,1	0,021	0,819	0,039	0,072	32,418	0,145	1325,354
6	KKA	1	5,09	0,328	0,033	0,1	0,029	0,1	28,59	0,153	1328,226
6	PSO	17,327	0,1	2	0,01	0,877	0,06	0,163	31,736	0,174	1341,115
7	YAK	6,244	2,623	0,565	0,172	0,319	0,01	0,092	41,055	0,194	1259,059
7	GA	10,339	1,157	1,479	0,063	0,112	0,016	0,119	34,14	0,149	1240,026
7	KKA	3,28	3,094	0,556	0,044	0,176	0,037	0,097	29,779	0,173	1235,593
7	PSO	6,052	0,1	2	0,141	1,844	0,01	0,195	29,68	0,173	1090,007
8	YAK	11,285	0,1	1,178	0,01	1,741	0,066	0,167	32,06	0,176	1224,93
8	GA	2,041	3,91	0,102	0,018	0,392	0,046	0,096	30,076	0,143	1252,812
8	KKA	19,24	2,096	0,138	0,059	0,746	0,018	0,072	29,926	0,15	1240,196
8	PSO	1	3,549	0,1	0,043	0,457	0,024	0,085	30,414	0,148	1157,88
9	YAK	11,341	2,312	0,342	0,109	0,43	0,012	0,106	36,086	0,177	999,141
9	GA	2,024	3,999	0,303	0,022	0,132	0,038	0,122	30,913	0,142	1004,713
9	KKA	11,64	1,098	0,214	0,018	0,974	0,101	0,085	28,85	0,16	988,013
9	PSO	11,736	1,468	0,873	0,123	0,191	0,01	0,075	34,924	0,164	992,674
10	YAK	10,945	0,1	0,943	0,01	2	0,067	0,214	38,765	0,216	994,971
10	GA	5,098	2,027	0,385	0,016	0,312	0,123	0,121	32,178	0,147	999,683

10	KKA	12,02	1,098	0,898	0,132	0,328	0,021	0,091	29,807	0,165	989,823
10	PSO	1,97	1,401	0,1	0,044	1,129	0,024	0,106	28,931	0,147	996,742
11	YAK	14,9	1,505	0,1	0,024	1,209	0,051	0,084	32,456	0,157	986,118
11	GA	17,325	3,463	0,314	0,03	0,129	0,032	0,109	30,987	0,14	1000,085
11	KKA	20	1,098	1,544	0,021	0,138	0,063	0,078	28,82	0,157	983,587
11	PSO	17,637	1,807	0,84	0,025	0,114	0,045	0,092	28,25	0,141	991,98
12	YAK	19,607	2,953	0,1	0,027	0,445	0,019	0,082	33,653	0,161	991,707
12	GA	20	2,529	0,128	0,042	0,53	0,019	0,086	30,173	0,142	997,392
12	KKA	7,84	3,094	0,176	0,029	0,328	0,052	0,096	28,248	0,148	1372,13
12	PSO	20	0,667	0,445	0,184	1,209	0,013	0,12	32,108	0,164	991,123
13	YAK	20	2,829	0,4	0,015	0,312	0,124	0,081	35,99	0,17	997,567
13	GA	14,248	0,578	0,688	0,015	1,146	0,2	0,124	29,566	0,157	997,719
13	KKA	10,5	1,098	0,936	0,018	0,214	0,094	0,145	28,825	0,155	984,36
13	PSO	12,768	0,1	1,496	0,01	2	0,116	0,195	29,154	0,171	997,041
14	YAK	1	2,161	0,1	0,053	0,708	0,016	0,104	29,804	0,151	995,699
14	GA	10,65	3,638	0,245	0,023	0,214	0,04	0,115	30,319	0,142	993,902
14	KKA	10,5	1,098	1,164	0,021	0,138	0,059	0,098	28,141	0,155	992,215
14	PSO	5,601	0,1	2	0,145	1,929	0,01	0,184	32,016	0,18	995,052
15	YAK	20	3,104	0,179	0,043	0,384	0,033	0,096	30,003	0,149	994,068
15	GA	2,337	4,691	0,2	0,033	0,247	0,034	0,199	30,175	0,143	999,15
15	KKA	12,4	0,1	1,278	0,01	1,772	0,075	0,091	28,706	0,176	989,666
15	PSO	18,825	0,77	0,388	0,015	1,183	0,183	0,109	29,281	0,15	1018,741
	GSD YOK							3,9251	240,1916		
								Toplam Zaman:		18,68	saat

Not: Çizelgedeki a parametresi $\bar{f}_{Küçükİşaret}(\bar{x})$, b parametresi ise $\bar{f}_{GeçiciHal}(\bar{x})$ fonksiyonlarını temsil etmektedir.

$w_1 = 10, w_2 = 1$ İÇİN OPTİMİZASYON											
								0.01 yük değişimi	0.1 sn 3 fazlı kısa devre		
		Tw	Ks	T1	T2	T3	T4	ITAE	ITAE	10a + b	Süre
1	YAK	11,961	2,722	0,233	0,185	0,576	0,024	0,049	43,362	0,305	1085,244
1	GA	16,607	7,353	0,137	0,021	0,104	0,029	0,052	40,978	0,258	1087,933
1	KKA	8,6	6,088	0,176	0,067	0,214	0,018	0,042	36,083	0,303	1105,994
1	PSO	20	5,459	0,28	0,027	0,1	0,035	0,051	33,808	0,272	1098,798
2	YAK	1,252	9,548	0,161	0,018	0,1	0,03	0,044	41,066	0,282	1101,215
2	GA	18,706	0,997	0,1	0,015	1,736	0,133	0,053	39,013	0,287	1102,664
2	KKA	16,58	4,092	0,138	0,018	0,366	0,09	0,053	36,483	0,299	1422,262
2	PSO	8,912	8,055	0,1	0,021	0,152	0,041	0,038	41,898	0,271	1270,201
3	YAK	8,538	4,591	0,1	0,066	0,368	0,02	0,047	44,042	0,304	1227,609
3	GA	5,964	6,756	0,103	0,017	0,225	0,054	0,064	41,089	0,277	1170,628
3	KKA	7,08	1,098	0,176	0,151	1,43	0,018	0,043	40,035	0,334	1407,27
3	PSO	14,287	0,484	0,76	0,2	1,392	0,041	0,098	40,109	0,416	1419,419
4	YAK	1	10,911	0,1	0,019	0,158	0,042	0,038	50,558	0,308	1179,295
4	GA	4,321	4,804	0,217	0,19	0,252	0,019	0,043	46,853	0,298	1201,572
4	KKA	10,5	6,088	0,1	0,059	0,214	0,014	0,042	46,055	0,306	1172,93
4	PSO	20	3,327	0,388	0,066	0,1	0,01	0,054	36,937	0,292	1161,26
5	YAK	1,981	7,577	0,1	0,021	0,184	0,03	0,047	38,412	0,28	1186,593
5	GA	13,095	7,71	0,174	0,047	0,115	0,017	0,051	37,432	0,27	1191,879
5	KKA	17,34	5,09	0,1	0,044	0,252	0,021	0,041	39,875	0,286	1177,302
5	PSO	7,935	3,329	0,102	0,087	0,393	0,019	0,05	39,715	0,292	1267,979
6	YAK	4,445	5,878	0,141	0,019	0,192	0,095	0,042	47,311	0,303	1328,039
6	GA	3,352	7,846	0,122	0,018	0,147	0,033	0,075	38,717	0,265	1336,686
6	KKA	20	1,098	0,29	0,158	1,088	0,029	0,045	35,889	0,353	1336,339
6	PSO	4,556	0,944	1,824	0,022	0,137	0,153	0,052	40,47	0,3	1353,732
7	YAK	11,767	2,34	1,198	0,2	0,139	0,018	0,04	63,509	0,366	1245,665
7	GA	11,165	2,769	0,102	0,016	0,763	0,129	0,07	38,299	0,293	1278,72
7	KKA	18,48	1,098	1,202	0,2	0,252	0,018	0,043	43,948	0,338	1226,16
7	PSO	20	1,17	1,492	0,019	0,1	0,076	0,066	34,79	0,313	1093,364
8	YAK	16,074	2,95	0,765	0,022	0,1	0,043	0,075	39,227	0,355	1250,45
8	GA	4,569	7,618	0,109	0,018	0,128	0,03	0,074	92,693	0,261	1259,219
8	KKA	14,68	0,1	2	0,124	2	0,135	0,043	36,695	0,575	1246,476
8	PSO	10,494	0,211	1,843	0,191	1,467	0,057	0,116	52,428	0,515	1127,053
9	YAK	8,664	5,97	0,247	0,106	0,169	0,019	0,042	49,863	0,315	996,985
9	GA	1,793	6,306	0,11	0,018	0,223	0,059	0,055	42,793	0,276	1005,43
9	KKA	11,26	4,092	0,404	0,09	0,138	0,018	0,048	36,764	0,317	988,775
9	PSO	18,13	1,579	1,244	0,107	0,1	0,01	0,051	42,277	0,305	997,236
10	YAK	13,066	5,485	0,149	0,109	0,377	0,011	0,051	58,389	0,373	991,014
10	GA	2,554	2,932	0,58	0,02	0,118	0,089	0,036	47,637	0,304	1005,582

10	KKA	3,28	10,08	0,138	0,018	0,1	0,033	0,057	38,424	0,29	991,9
10	PSO	20	2,499	0,705	0,079	0,1	0,01	0,054	40,126	0,304	1004,305
11	YAK	14,94	1,221	1,449	0,096	0,1	0,01	0,057	40,718	0,315	990,034
11	GA	13,776	7,49	0,128	0,018	0,109	0,034	0,047	45,182	0,26	1004,417
11	KKA	8,22	2,096	1,012	0,128	0,1	0,014	0,041	37,166	0,307	985,239
11	PSO	17,22	0,1	2	0,065	2	0,2	0,09	63,778	0,496	998,487
12	YAK	5,814	2,045	1,032	0,057	0,1	0,05	0,053	63,232	0,398	997,05
12	GA	19,54	7,113	0,105	0,019	0,155	0,033	0,077	86,052	0,259	995,11
12	KKA	8,98	0,1	1,962	0,139	1,924	0,116	0,044	35,559	0,554	1376,088
12	PSO	5,512	2,894	0,606	0,095	0,1	0,01	0,049	41,644	0,299	996,189
13	YAK	9,669	3,584	0,179	0,025	0,452	0,068	0,082	35,573	0,358	999,44
13	GA	4,524	8,039	0,152	0,022	0,107	0,03	0,043	43,549	0,259	997,536
13	KKA	5,94	5,09	0,176	0,094	0,214	0,029	0,042	36,64	0,292	986,525
13	PSO	3,428	7,198	0,1	0,033	0,168	0,027	0,043	38,47	0,269	1001,292
14	YAK	18,789	4,148	0,462	0,013	0,1	0,072	0,05	46,82	0,323	996,975
14	GA	3,512	7,303	0,135	0,018	0,1	0,033	0,054	34,159	0,262	994,962
14	KKA	13,16	6,088	0,176	0,018	0,138	0,037	0,043	36,529	0,279	994,397
14	PSO	6,385	2,646	0,801	0,112	0,103	0,01	0,047	46,59	0,312	1001,722
15	YAK	8,634	8,602	0,1	0,013	0,1	0,033	0,036	46,821	0,286	997,317
15	GA	12,19	4,383	0,397	0,091	0,101	0,018	0,05	46,9	0,29	998,536
15	KKA	5,18	4,092	0,252	0,021	0,29	0,139	0,044	42,772	0,324	995,015
15	PSO	10	6,296	0,187	0,021	0,147	0,055	0,048	37,951	0,279	1005,775
	GSD YOK							3,9251	240,1916		
								Toplam Zaman:		18,73	saat

Not: Çizelgedeki a parametresi $\bar{f}_{Küçüklşaret}(\bar{x})$, b parametresi ise $\bar{f}_{GeçiciHal}(\bar{x})$ fonksiyonlarını temsil etmektedir.

$w_3 = 25, w_2 = 1$ İÇİN OPTİMİZASYON											
								0.01 yük değişimi	0.1 sn 3 fazlı kısa devre		
		Tw	Ks	T1	T2	T3	T4	ITAE	ITAE	25a + b	Süre
1	YAK	10,759	4,947	0,189	0,2	0,501	0,015	0,038	77,891	0,565	1016,225
1	GA	14,568	9,682	0,101	0,023	0,114	0,026	0,043	44,175	0,406	1026,336
1	KKA	7,46	6,088	0,176	0,086	0,176	0,018	0,034	45,76	0,459	1013,009
1	PSO	13,608	4,9	0,1	0,01	0,458	0,092	0,038	53,466	0,463	1028,077
2	YAK	16,579	2,152	0,899	0,015	0,1	0,094	0,052	41,429	0,503	1025,261
2	GA	7,572	9,288	0,1	0,02	0,1	0,029	0,046	101,708	0,398	1031,499
2	KKA	12,02	1,098	0,404	0,189	1,012	0,082	0,034	43,109	0,713	1015,402
2	PSO	7,522	8,741	0,1	0,021	0,132	0,031	0,037	41,28	0,409	1027,739
3	YAK	5,293	6,206	0,134	0,021	0,1	0,023	0,049	40,248	0,481	1023,558
3	GA	12,729	2,762	0,1	0,016	0,749	0,131	0,048	56,519	0,461	1029,931
3	KKA	3,66	1,098	0,1	0,014	1,734	0,173	0,042	45,616	0,542	1012,808
3	PSO	19,516	0,577	1,239	0,159	0,659	0,113	0,052	99,121	0,742	1030,314
4	YAK	6,689	7,239	0,1	0,042	0,284	0,024	0,045	44,913	0,472	1026,015
4	GA	18,193	4,929	0,133	0,015	0,352	0,134	0,041	53,039	0,46	1023,727
4	KKA	8,6	4,092	0,138	0,014	0,48	0,166	0,04	48,962	0,482	1014,013
4	PSO	15,653	9,084	0,1	0,017	0,156	0,039	0,036	47,012	0,426	1030,103
5	YAK	13,001	2,059	0,1	0,1	0,931	0,025	0,046	46,987	0,486	1027,434
5	GA	8,312	1,207	0,205	0,032	1,424	0,192	0,044	64,662	0,529	1023,787
5	KKA	10,88	3,094	0,86	0,014	0,176	0,192	0,052	47,219	0,549	1014,386
5	PSO	12,13	1,334	0,1	0,01	2	0,119	0,044	49,511	0,485	1028,637
6	YAK	15,059	6,067	0,208	0,024	0,14	0,035	0,056	34,33	0,499	1024,827
6	GA	9,482	1,781	0,109	0,017	1,317	0,183	0,042	48,536	0,456	1022,737
6	KKA	13,54	6,088	0,176	0,014	0,214	0,109	0,04	47,594	0,467	1011,992
6	PSO	15,876	2,685	0,647	0,021	0,1	0,102	0,045	43,42	0,465	1027,442
7	YAK	20	2,855	0,115	0,023	0,787	0,13	0,042	59,57	0,515	1022,88
7	GA	12,423	8,823	0,113	0,017	0,1	0,035	0,043	42,167	0,396	1022,061
7	KKA	19,24	7,086	0,176	0,014	0,138	0,059	0,035	41,051	0,448	1014,423
7	PSO	1,018	8,105	0,1	0,01	0,151	0,058	0,038	47,406	0,442	1024,191
8	YAK	5,239	2,966	0,507	0,024	0,206	0,101	0,072	43,417	0,641	1057,714
8	GA	19,444	5,671	0,235	0,07	0,111	0,015	0,035	53,577	0,45	1084,211
8	KKA	15,06	10,08	0,138	0,048	0,138	0,018	0,045	39,856	0,445	1100,957
8	PSO	3,856	9,481	0,1	0,019	0,1	0,028	0,035	43,265	0,402	1113,883
9	YAK	15,208	7,56	0,248	0,074	0,151	0,017	0,044	52,048	0,499	1096,457
9	GA	12,177	8,667	0,135	0,017	0,127	0,047	0,051	49,478	0,416	1098,902
9	KKA	12,4	1,098	0,176	0,17	1,886	0,025	0,037	43,409	0,532	1309,38
9	PSO	20	8,485	0,133	0,045	0,1	0,016	0,035	44,623	0,412	1483,377
10	YAK	1,903	3,133	0,523	0,175	0,28	0,021	0,065	47,05	0,611	1153,788
10	GA	9,158	8,111	0,102	0,038	0,159	0,02	0,048	52,613	0,42	1220,801

10	KKA	11,26	3,094	0,252	0,2	0,594	0,021	0,039	41,435	0,526	1306,08
10	PSO	17,57	8,707	0,1	0,022	0,128	0,029	0,037	43,62	0,415	1456,64
11	YAK	12,821	4,34	0,1	0,025	0,521	0,059	0,053	49,003	0,54	1291,546
11	GA	11,198	2,098	1,01	0,142	0,108	0,011	0,04	42,97	0,491	1195,409
11	KKA	15,06	8,084	0,214	0,021	0,1	0,04	0,045	48,566	0,433	1195,734
11	PSO	2,93	6,189	0,1	0,01	0,268	0,077	0,039	47,503	0,444	1142,716
12	YAK	20	4,039	0,1	0,013	0,316	0,066	0,054	37,721	0,502	1171,381
12	GA	8,472	9,189	0,103	0,021	0,137	0,029	0,041	53,147	0,41	1194,499
12	KKA	8,6	6,088	0,176	0,014	0,214	0,116	0,037	42,059	0,481	1180,444
12	PSO	5,76	7,051	0,246	0,107	0,118	0,01	0,035	57,076	0,458	1191,602
13	YAK	4,3	8,181	0,181	0,024	0,125	0,034	0,045	38,174	0,446	1308,553
13	GA	10,556	9,496	0,107	0,018	0,1	0,035	0,052	43,195	0,407	1316,864
13	KKA	19,62	1,098	1,43	0,025	0,138	0,139	0,033	46,787	0,512	1329,684
13	PSO	13,15	4,407	0,158	0,011	0,554	0,2	0,037	56,293	0,471	1344,39
14	YAK	3,39	4,499	0,155	0,014	0,423	0,172	0,042	46,532	0,462	1334,1
14	GA	11,71	8,241	0,133	0,02	0,1	0,029	0,071	45,145	0,407	1160,49
14	KKA	19,62	1,098	0,29	0,192	1,506	0,021	0,039	38,283	0,642	1300,522
14	PSO	1,601	3,474	0,574	0,178	0,151	0,014	0,048	44,827	0,492	1115,651
15	YAK	1	3,653	0,754	0,026	0,1	0,096	0,053	68,085	0,62	1135,472
15	GA	1,692	9,453	0,103	0,017	0,1	0,035	0,046	61,952	0,4	1264,939
15	KKA	10,5	1,098	1,962	0,033	0,1	0,101	0,036	41,349	0,55	1232,264
15	PSO	1,307	2,954	0,594	0,021	0,112	0,128	0,046	44,077	0,479	1278,17
	GSD YOK							3,9251	240,1916		
								Toplam Zaman:		18,83	saat

Not: Çizelgedeki a parametresi $\bar{f}_{Küçüklşaret}(\bar{x})$, b parametresi ise $\bar{f}_{GeçiciHal}(\bar{x})$ fonksiyonlarını temsil etmektedir.

$w_1 = 50, w_2 = 1$ İÇİN OPTİMİZASYON											
								0.01 yük değişimi	0.1 sn 3 fazlı kısa devre		
		Tw	Ks	T1	T2	T3	T4	ITAE	ITAE	50a + b	Süre
1	YAK	14,541	2,778	0,1	0,01	1,017	0,119	0,038	63,047	0,749	1025,452
1	GA	15,973	5,476	0,37	0,019	0,128	0,154	0,042	49,439	0,695	1029,32
1	KKA	19,24	3,094	0,138	0,151	0,594	0,018	0,033	66,544	0,746	1014,378
1	PSO	20	2,739	0,828	0,153	0,1	0,01	0,038	56,234	0,722	1026,863
2	YAK	6,959	5,168	0,141	0,09	0,242	0,032	0,04	51,754	0,73	1022,314
2	GA	18,301	7,464	0,127	0,019	0,134	0,068	0,036	64,779	0,663	1030,055
2	KKA	17,72	2,096	1,24	0,189	0,1	0,018	0,036	48,523	0,726	1013,82
2	PSO	4,135	1,471	0,1	0,019	2	0,2	0,036	62,432	0,713	1026,143
3	YAK	16,884	7,336	0,1	0,046	0,243	0,02	0,042	44,129	0,714	1022,898
3	GA	13,048	2,884	0,106	0,145	0,73	0,018	0,04	115,61	0,71	1026,494
3	KKA	18,86	1,098	1,24	0,147	0,29	0,113	0,037	55,872	0,992	1012,523
3	PSO	11,25	8,259	0,162	0,064	0,1	0,01	0,033	53,938	0,647	1027,266
4	YAK	19,526	2,196	0,909	0,106	0,1	0,029	0,044	87,122	0,921	1021,449
4	GA	11,042	9,707	0,109	0,019	0,118	0,046	0,036	50,455	0,64	1029,642
4	KKA	16,96	9,082	0,1	0,025	0,176	0,037	0,032	56,209	0,666	1012,658
4	PSO	2,927	9,793	0,1	0,024	0,1	0,025	0,034	44,462	0,621	1027,367
5	YAK	10,946	3,125	0,1	0,193	0,91	0,016	0,031	95,788	0,789	1021,512
5	GA	14,186	10,353	0,11	0,019	0,1	0,033	0,049	45,263	0,612	1029,26
5	KKA	8,6	1,098	0,1	0,014	1,848	0,143	0,032	50,419	0,807	1012,341
5	PSO	8,19	3,838	0,553	0,02	0,1	0,143	0,034	66,202	0,71	1025,2
6	YAK	1	12,218	0,1	0,066	0,1	0,013	0,028	94,669	0,748	1019,922
6	GA	20	10,179	0,113	0,021	0,106	0,028	0,042	46,563	0,616	1029,116
6	KKA	20	3,094	0,138	0,014	0,708	0,185	0,033	47,094	0,723	1010,009
6	PSO	15,819	5,766	0,234	0,025	0,211	0,146	0,036	57,27	0,7	1024,912
7	YAK	9,834	10,527	0,1	0,017	0,1	0,031	0,031	51,341	0,613	1022,198
7	GA	5,344	4,73	0,1	0,017	0,482	0,16	0,033	54,331	0,672	1030,184
7	KKA	10,5	10,08	0,1	0,018	0,138	0,04	0,034	57,719	0,645	1011,343
7	PSO	17,463	10,39	0,101	0,018	0,1	0,028	0,032	51,317	0,618	1020,436
8	YAK	17,976	4,987	0,34	0,082	0,1	0,017	0,043	45,323	0,738	1050,895
8	GA	3,25	3,759	0,127	0,2	0,631	0,017	0,042	71,716	0,689	1090,177
8	KKA	7,08	1,098	0,1	0,158	2	0,014	0,035	58,368	0,834	1099,799
8	PSO	20	0,1	2	0,189	2	0,139	0,055	105,228	1,133	1110,427
9	YAK	14,648	3,91	0,109	0,023	0,479	0,076	0,051	47,707	0,844	1096,873
9	GA	4,702	6,078	0,1	0,01	0,33	0,105	0,047	52,837	0,69	1104,023
9	KKA	12,02	2,096	1,05	0,018	0,176	0,185	0,035	59,929	0,819	1312,115
9	PSO	9,563	1,33	1,885	0,022	0,1	0,18	0,034	68,669	0,724	1490,286
10	YAK	1	6,056	0,25	0,021	0,1	0,07	0,046	47,254	0,776	1152,182
10	GA	13,919	2,19	0,109	0,017	1,299	0,196	0,039	51,787	0,696	1223,403

10	KKA	12,78	1,098	1,924	0,021	0,1	0,154	0,036	57,489	0,716	1313,359
10	PSO	12,392	2,547	0,948	0,023	0,114	0,2	0,033	63,35	0,686	1443,848
11	YAK	7,429	2,531	0,1	0,013	1,067	0,2	0,035	67,344	0,732	1314,232
11	GA	4,739	10,857	0,107	0,043	0,1	0,016	0,039	74,235	0,621	1216,302
11	KKA	16,96	3,094	0,556	0,037	0,214	0,196	0,03	57,152	0,808	1195,7
11	PSO	10,942	4,05	0,695	0,192	0,1	0,01	0,032	69,619	0,693	1137,368
12	YAK	9,898	8,794	0,1	0,043	0,16	0,023	0,035	54,945	0,674	1166,135
12	GA	18,463	1,36	0,111	0,016	1,876	0,2	0,04	52,353	0,706	1204,037
12	KKA	10,5	7,086	0,176	0,021	0,176	0,078	0,039	49,813	0,728	1200,201
12	PSO	20	2,205	0,1	0,01	1,193	0,155	0,037	61,452	0,728	1215,087
13	YAK	8,884	6,423	0,1	0,01	0,277	0,08	0,036	56,262	0,688	1343,145
13	GA	12,66	10,352	0,111	0,042	0,112	0,017	0,033	90,022	0,625	1338,11
13	KKA	13,54	5,09	0,1	0,109	0,366	0,029	0,031	54,288	0,792	1358,176
13	PSO	15,887	6,421	0,1	0,01	0,285	0,088	0,034	55,991	0,672	1377,99
14	YAK	20	8,015	0,101	0,081	0,124	0,018	0,033	59,536	0,674	1362,433
14	GA	11,234	11,019	0,105	0,026	0,106	0,023	0,036	64,719	0,627	1146,401
14	KKA	12,02	2,096	0,1	0,01	1,278	0,177	0,031	55,26	0,726	1294,016
14	PSO	4,133	10,745	0,1	0,018	0,1	0,033	0,031	51,534	0,613	1105,19
15	YAK	19,896	4,23	0,558	0,196	0,195	0,013	0,043	60,133	0,795	1185,736
15	GA	16,919	8,337	0,173	0,079	0,105	0,017	0,035	70,243	0,659	1290,878
15	KKA	12,02	2,096	1,392	0,185	0,1	0,018	0,032	60	0,739	1294,016
15	PSO	3,596	11,587	0,1	0,021	0,1	0,021	0,032	56,265	0,642	1234,675
	GSD YOK							3,9251	240,1916		
								Toplam Zaman:		18,91	saat

Not: Çizelgedeki a parametresi $\bar{f}_{Küçüklşaret}(\bar{x})$, b parametresi ise $\bar{f}_{GeçiciHal}(\bar{x})$ fonksiyonlarını temsil etmektedir.

EK C: Algoritmaların performansları

0,01 PU DEĞİŞİM İÇİN OPTİMİZASYON		
	Ortalama	Standart Sapma
YAK	0,0176	0,0026
KKA	0,0146	0,0001
GA	0,0148	0,0012
PSO	0,0145	0,0001

0,1 SN UC FAZLI KISA DEVRE İÇİN OPTİMİZASYON		
	Ortalama	Standart Sapma
YAK	31,2156	2,4155
KKA	30,4236	2,849
GA	30,1138	2,2416
PSO	26,9754	2,1027

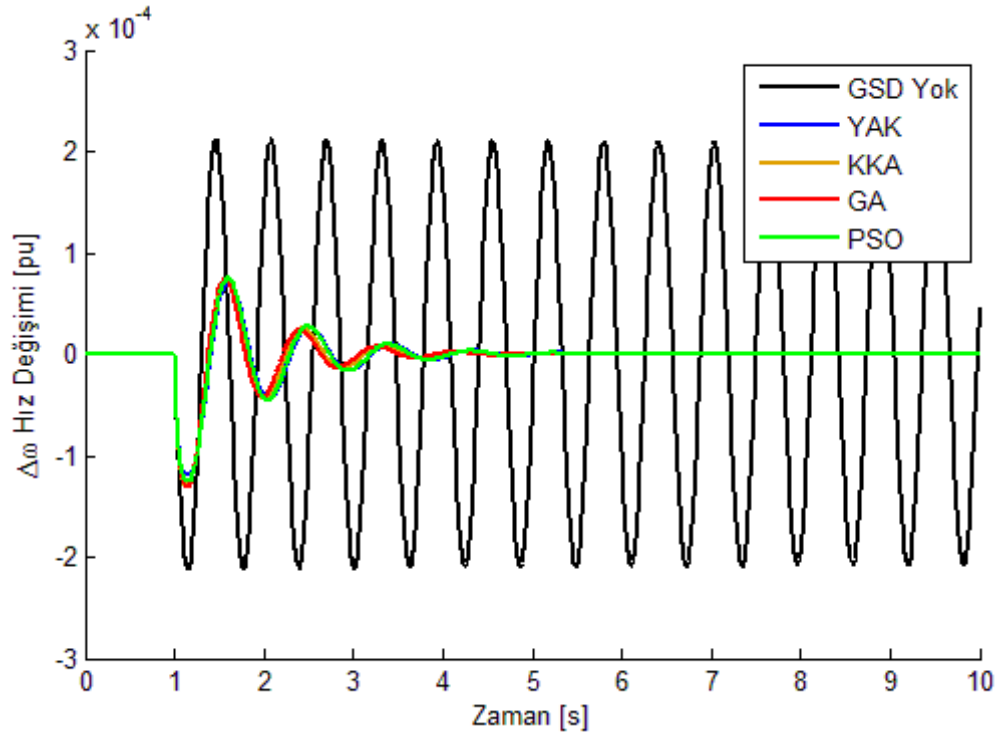
$w_1 = 1, w_2 = 1$ İÇİN OPTİMİZASYON		
	Ortalama	Standart Sapma
YAK	0,1753	0,0186
KKA	0,159	0,0081
GA	0,1451	0,0044
PSO	0,1607	0,0148

$w_1 = 10, w_2 = 1$ İÇİN OPTİMİZASYON		
	Ortalama	Standart Sapma
YAK	0,3248	0,0363
KKA	0,3437	0,0919
GA	0,2746	0,016
PSO	0,329	0,0796

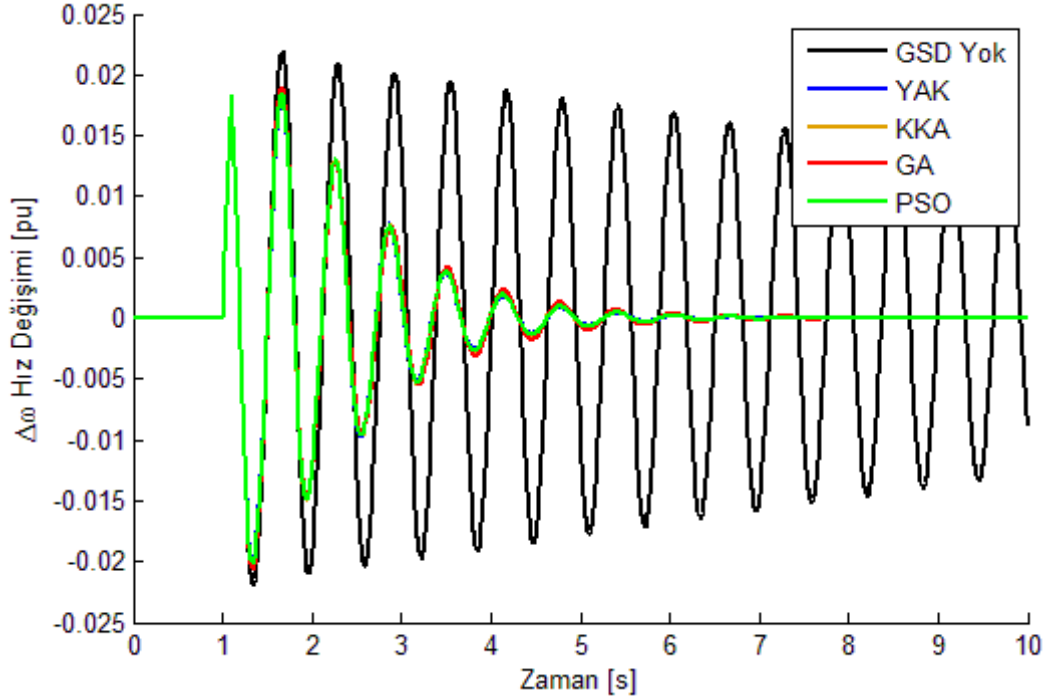
$w_1 = 25, w_2 = 1$ İÇİN OPTİMİZASYON		
	Ortalama	Standart Sapma
YAK	0,5229	0,0602
KKA	0,5188	0,0768
GA	0,4338	0,0393
PSO	0,467	0,0814

$w_1 = 50, w_2 = 1$ İÇİN OPTİMİZASYON		
	Ortalama	Standart Sapma
YAK	0,7457	0,0748
KKA	0,7645	0,0833
GA	0,6614	0,0353
PSO	0,7082	0,1242

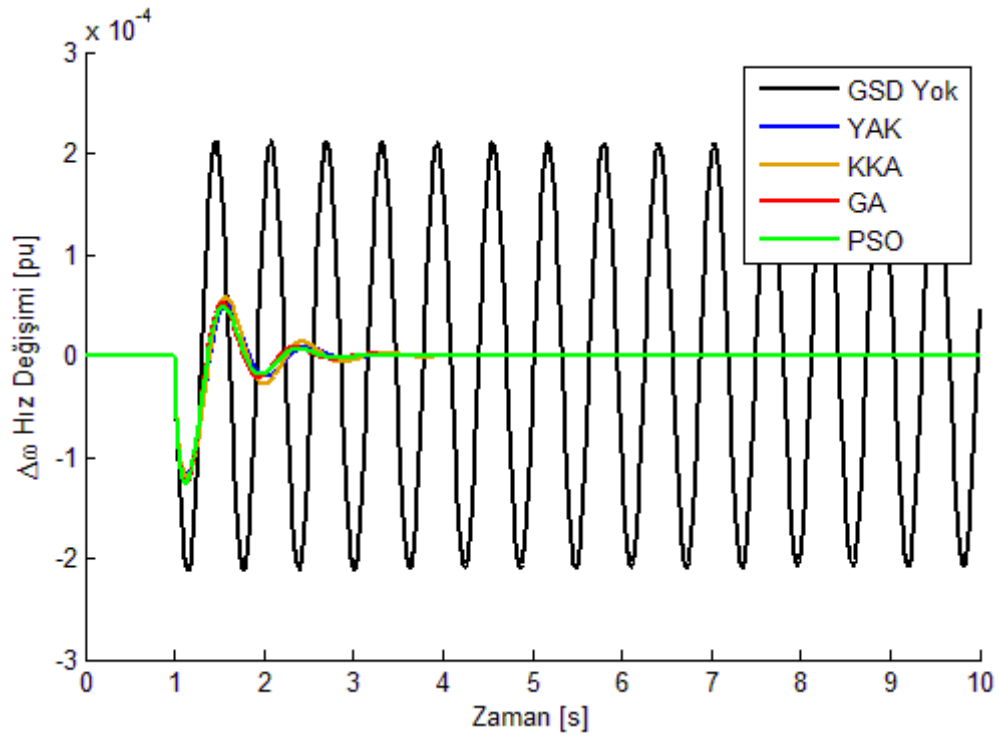
EK D: En iyi parametrelerin sistemdeki davranışları



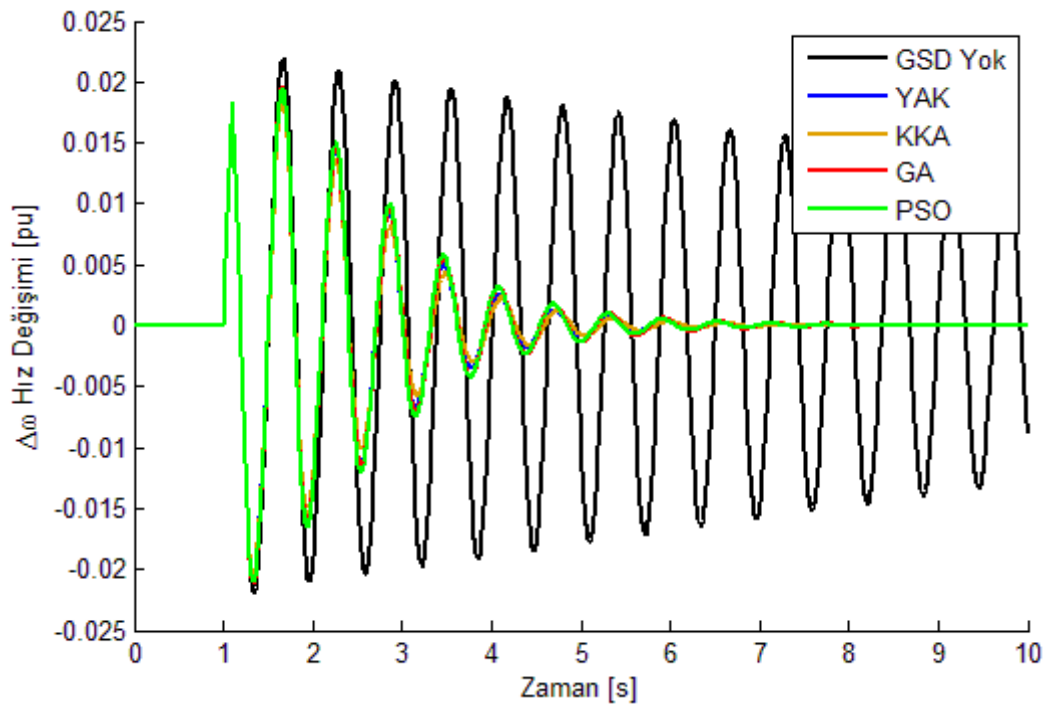
Şekil D.1 : $w_1 = 1, w_2 = 1, P=0.85, Q=0.53$ endüktif yük durumunda küçük işaret kararlılığı.



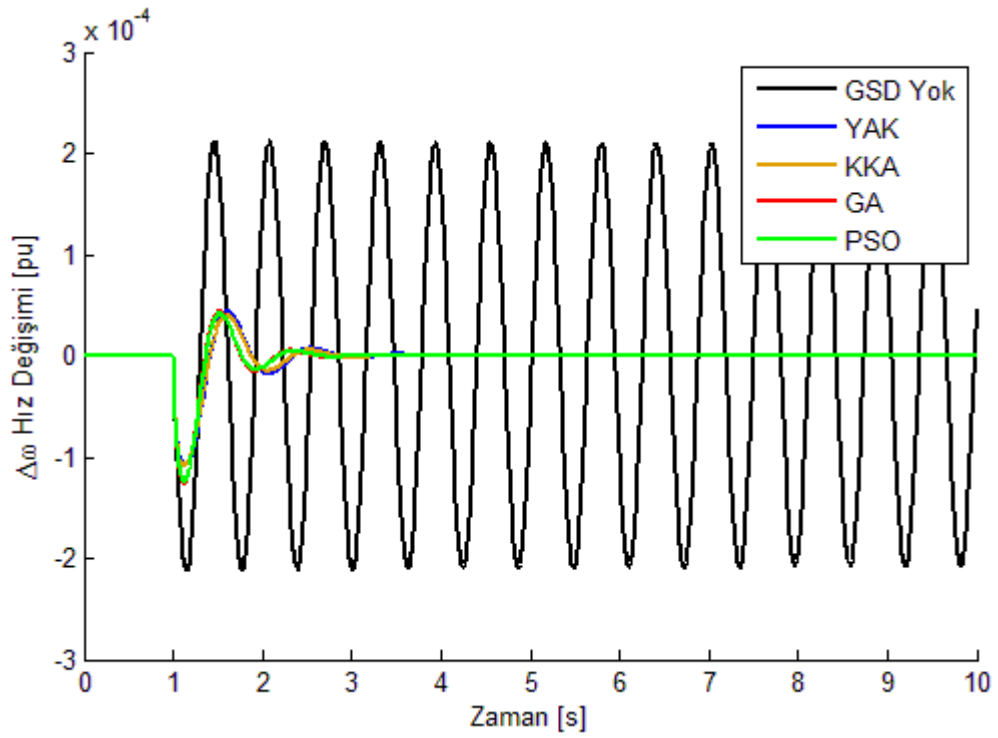
Şekil D.2 : $w_1 = 1, w_2 = 1, P=0.85, Q=0.53$ endüktif yük durumunda geçici hal kararlılığı.



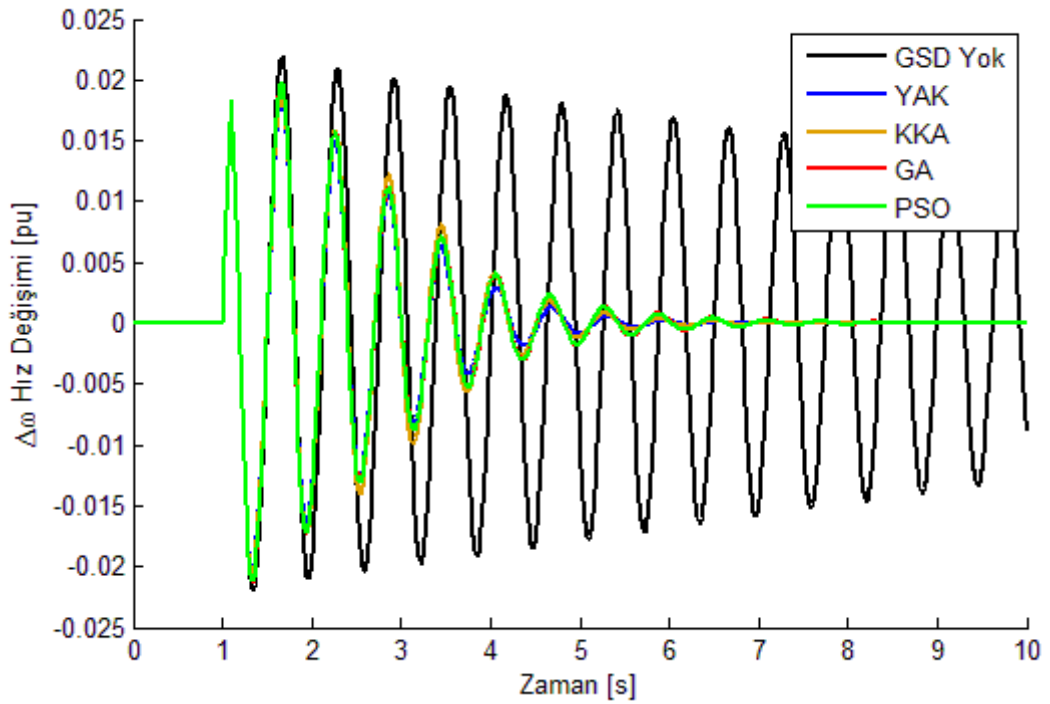
Şekil D.3 : $w_1=10, w_2=1, P=0.85, Q=0.53$ endüktif yük durumunda küçük işaret kararlılığı.



Şekil D.4 : $w_1=10, w_2=1, P=0.85, Q=0.53$ endüktif yük durumunda geçici hal kararlılığı.

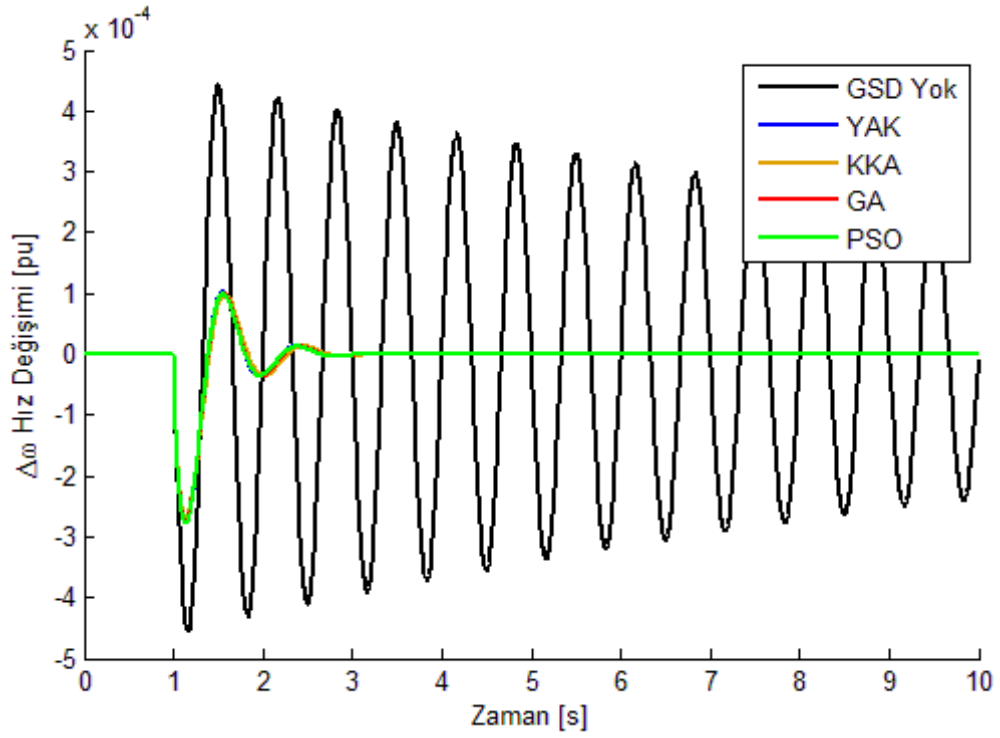


Şekil D.5 : $w_1 = 25, w_2 = 1, P=0.85, Q=0.53$ endüktif yük durumunda küçük işaret kararlılığı.

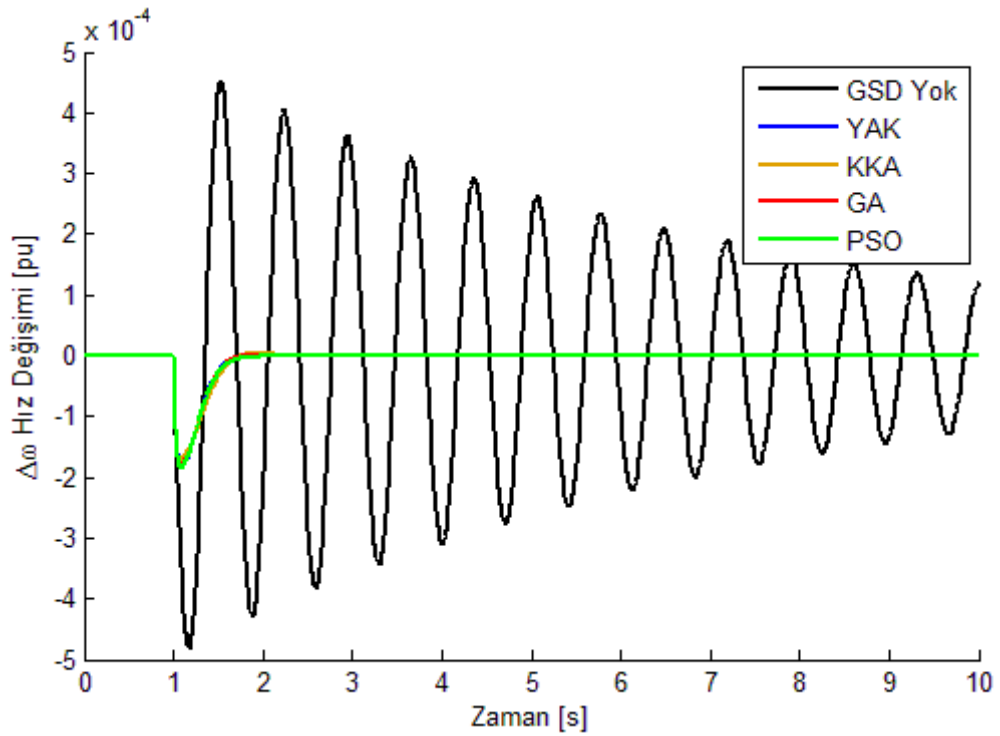


Şekil D.6 : $w_1 = 25, w_2 = 1, P=0.85, Q=0.53$ endüktif yük durumunda geçici hal kararlılığı.

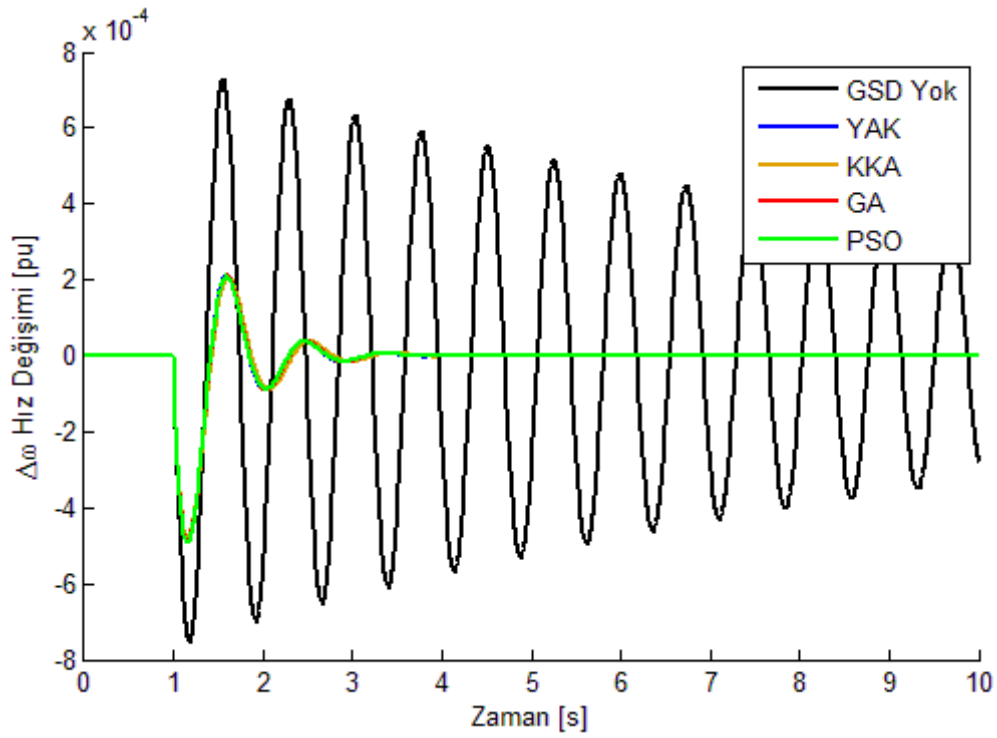
EK E: Farklı yük koşullarında GSD nin davranışı



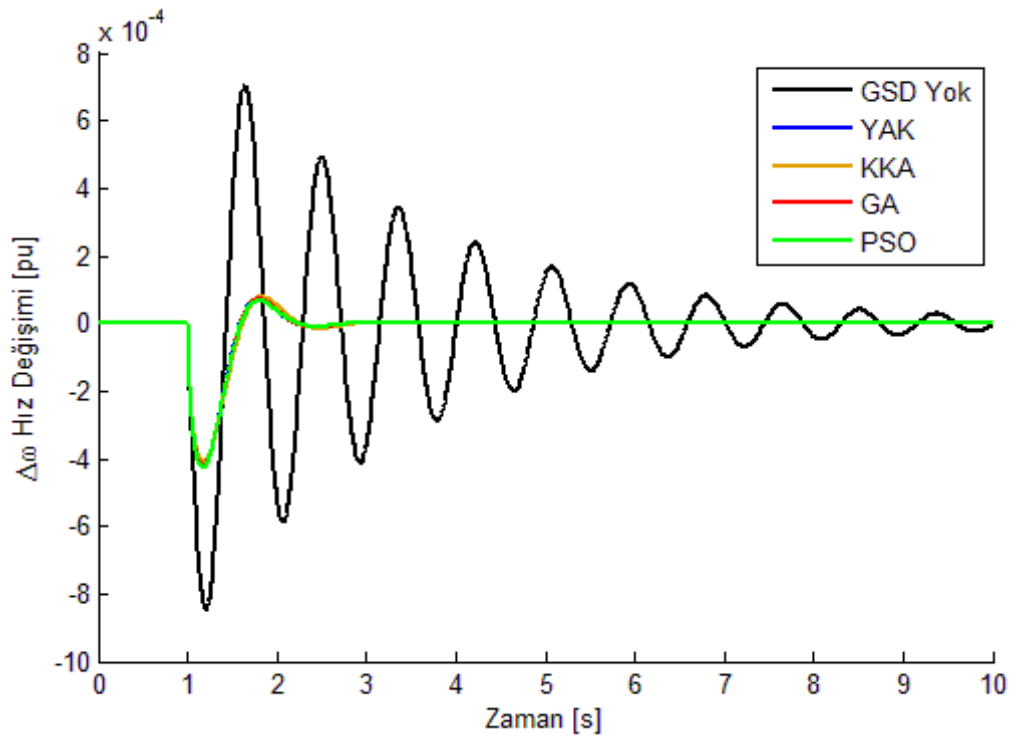
Şekil E.1 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.6, Q=0.4$ orta endüktif yük durumunda küçük işaret kararlılığı (ek yük=0.02pu).



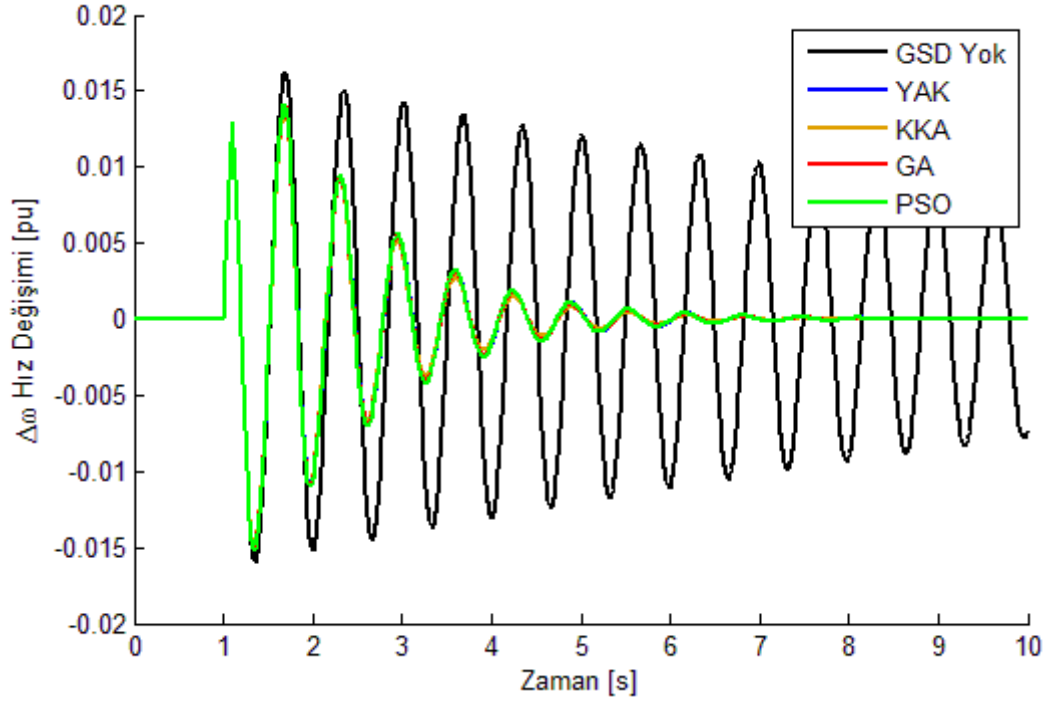
Şekil E.2 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.6, Q= - 0.4$ orta kapasitif yük durumunda küçük işaret kararlılığı (ek yük=0.02 pu).



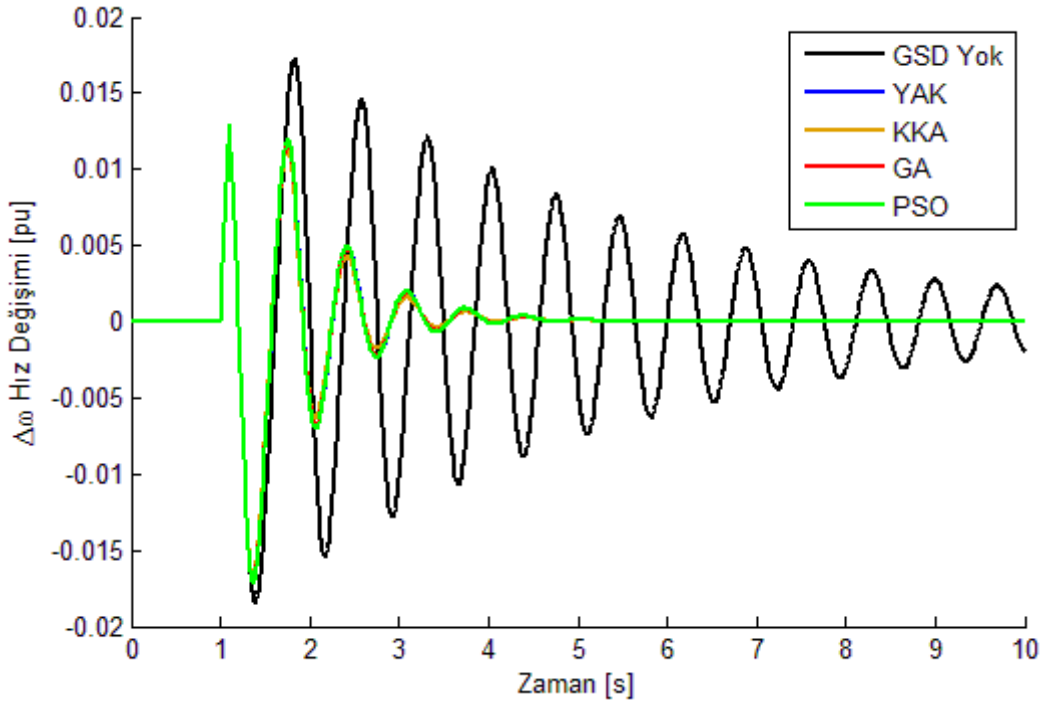
Şekil E.3 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.4, Q= 0.2$ hafif endüktif yük durumunda küçük işaret kararlılığı (ek yük=0.03 pu).



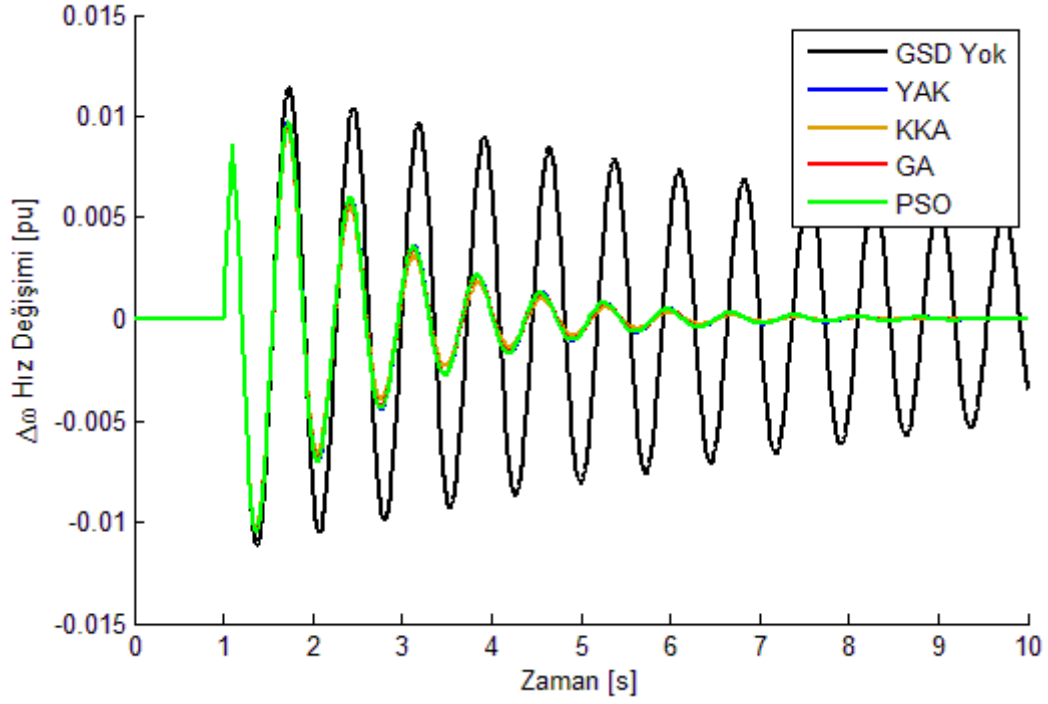
Şekil E.4 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.4, Q= - 0.2$ hafif kapasitif yük durumunda küçük işaret kararlılığı (ek yük=0.03 pu).



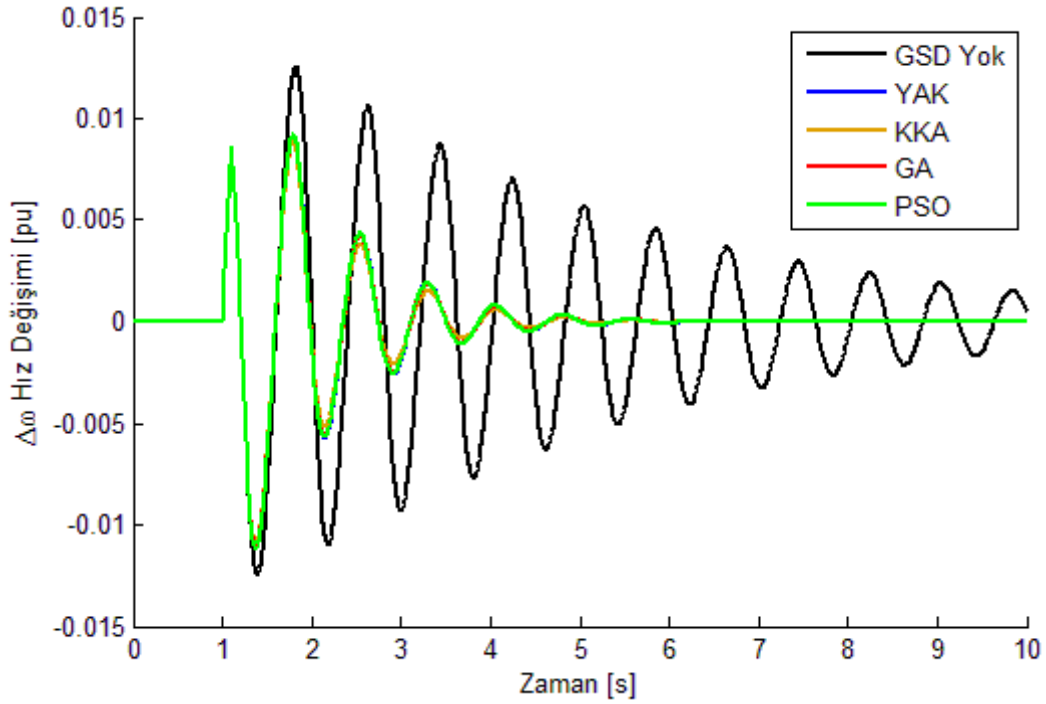
Şekil E.5 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.6, Q=0.4$ orta endüktif yük durumunda geçici hal kararlılığı.



Şekil E.6 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.6, Q= - 0.4$ orta kapasitif yük durumunda geçici hal kararlılığı.



Şekil E.7 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.4, Q= 0.2$ hafif endüktif yük durumunda geçici hal kararlılığı.



Şekil E.8 : $w_1 = 50, w_2 = 1, P=0.4, Q= - 0.2$ hafif kapasif yük durumunda geçici hal kararlılığı.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Abdulvehhab Ağın

Doğum Yeri ve Tarihi: Bursa/1988

E-Posta: agin@itu.edu.tr

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi