



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GERİLİM KONTROLÜNDE GÜÇ SİSTEMLERİ KARARLI
KILICISI (GSKK) UYGULAMALARI VE
ALTERNATİFLERİ**

**Elektrik Elektronik Müh. Emrah BAL
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Elektronik Programı**

**Danışman
Prof.Dr. İlhan KOCAARSLAN**

Mayıs, 2012

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GERİLİM KONTROLÜNDE GÜÇ SİSTEMLERİ KARARLI
KILICISI (GSKK) UYGULAMALARI VE
ALTERNATİFLERİ**

**Elektrik Elektronik Müh. Emrah BAL
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Elektronik Programı**

**Danışman
Prof.Dr. İlhan KOCAARSLAN**

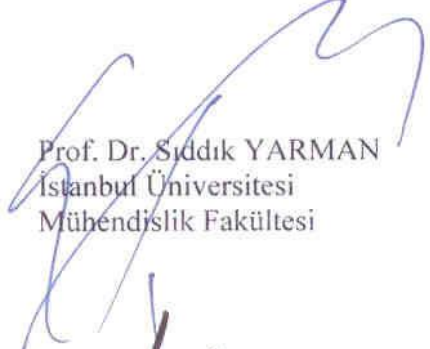
Mayıs, 2012

İSTANBUL

Bu çalışma 21/05/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Elektronik programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi


Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Sıddık YARMAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Ayten KUNTMAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Mukden UĞUR
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Ahmet SERTBAŞ
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde yapmış olduğu çok değerli katkı ve yönlendirmeler ile bana büyük destek veren ve elinden gelen yardımı esirgemeyen çok değerli hocam Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, çalışmalarımnda bugünlere gelmemi sağlayan tüm aileme, annem Sevinç BAL'a, babam Tuncay BAL'a, nişanlım Kezban MATARACI'ya ve araştırmalarım süresince bana büyük bir sabırla katlanan çalışma arkadaşlarım K. Koray GÜMÜŞ'e ve D. Çağdaş ATILLA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs, 2012

Emrah BAL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİL LİSTESİ.....	IV
TABLO LİSTESİ.....	VI
SEMBOL LİSTESİ.....	VII
ÖZET.....	X
SUMMARY	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1. KARARLILIK.....	3
2.2. ROTOR AÇISI KARARLILIĞI	5
2.2.1. Güç Açısı Bağıntısı.....	6
2.2.2. Küçük İşaret Kararlılığı.....	8
2.2.3. Geçici Hal Kararlılığı.....	8
2.3. GERİLİM KARARLILIĞI.....	10
2.4. FREKANS KARARLILIĞI.....	10
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	11
3.1.SENKRON GENERATÖRLER.....	11
3.1.1. Senkron Generatör Modeli	16
3.1.2. Senkron Makinelerin Dinamik Davranışları.....	16
3.1.3. Senkron Generatör Modelleri.....	17
3.2. UYARTIM SİSTEMLERİ	21
3.2.1. Uyartım Sistemlerinin Çeşitleri	22

3.2.2. Uyarıcı	25
3.2.3. Otomatik Gerilim Regülatörü (AVR)	25
3.2.4. Gerilim Transdüseri ve Yük Kompanzatorü	25
3.2.5. Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (GSKK)	26
3.2.6 Sınırlayıcı ve Koruma Devreleri	28
3.3. BENZETİMDE KULLANILAN SENKRON GENERATÖRÜN MODELENMESİ	29
3.3.1 Klasik Model (Hareket Denklemi Modeli).....	32
3.3.2. Geçici Hal Reaktansı Arkasındaki Değişken Gerilim Modeli-AVR siz	36
3.3.3. Geçici Hal Reaktansı Arkasındaki Değişken Gerilim Modeli-AVR ile	38
3.4. SÜRÜ ZEKASI.....	40
3.5. YAPAY ARI KOLONİSİ (ARTIFICIAL BEE COLONY, ABC) ALGORİTMASI	41
3.5.1. Gerçek Arıların Yiyecek Arama Davranışları	41
3.5.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması	45
3.6. PARÇACIK SÜRÜSÜ OPTİMİZASYONU (PSO)	53
3.6.1. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) Algoritması.....	54
3.6.2. Gelişmiş PSO Algoritması	56
3.6.3. PSO'nun Adımları	57
3.6.4. PSO Performansını Etkileyen Faktörler.....	57
3.6.5. PID Kontrol Parametrelerinin PSO ile Ayarlanması.....	59
4. BULGULAR	62
4.1. GÜÇ SİSTEMİ MODELİNİN KONTROLÖRSÜZ BENZETİMİ.....	62
4.2. PSS'Lİ GÜÇ SİSTEM MODELİ BENZETİMİ.....	65
4.3. PID KONTROL YÖNTEMİ İLE GÜÇ SİSTEM MODELİ BENZETİMİ	73
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	82
KAYNAKLAR.....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	87

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Güç sistemlerinde kararlılığın sınıflandırılması	4
Şekil 2.2	: İki senkron makineden oluşan sistem[2]	6
Şekil 2.3	: Sistemin tek hat şeması[2].....	6
Şekil 2.4	: Generatör ve motor gerilimleri arasındaki ilişkiyi gösteren fazör diy.[2]... 7	
Şekil 2.5	: Farklı rotor açısı davranışları [2]	9
Şekil 3.1	: Senkron generatör rotor döner manyetik alanı ve endüklediği gerilim	13
Şekil 3.2	: Rezistans ihmal edildiği durumda senkron generatör eşdeğer dev [17]....	18
Şekil 3.3	: Uyarım kontrol sisteminin fonksiyonel blok diyagramı [2]	24
Şekil 3.4	: Uyarım kontrol sisteminin tipik bir modeli	24
Şekil 3.5	: Generatörün elektriksel çıkış momenti-açı ilişkisi [3]	30
Şekil 3.6	: Sonsuz baraya X_e reaktansı üzerinden bağlı senkron generatör [3]	32
Şekil 3.7	: Senkron generatörde mekanik güç-açı değişimi blok diyagramı [3].....	34
Şekil 3.8	: Senkron generatörde mekanik güç-açı değişimi blok diyagramı [3].....	35
Şekil 3.10	: Geçici hal reaktansı arkasındaki değ. gerilim modeli (AVR'siz) [3]	36
Şekil 3.11	: Geçici hal reaktansı arkasındaki değ. gerilim modeli (AVR'li) [3]	39
Şekil 3.12	: Arılarda dans	43
Şekil 3.13	: Yiyecek arama çevrimi	44
Şekil 3.14	: ABC algoritmasının akış diyagramı	51
Şekil 3.15	: Arama noktasının hareket prensibi [22]	55
Şekil 3.16	: PSO adımları	58
Şekil 3.17	: 3 boyutlu arama uzayındaki bir parçacık.....	60
Şekil 4.1	: Güç sistemi modeli	63
Şekil 4.2	: Kontrolsüz sistemin elde edilen benzetim sonuçları	64
Şekil 4.3	: PSS Modeli [32]	65
Şekil 4.4	: PSS'li Güç Sistem Modeli.....	65
Şekil 4.5	: CPSS'li sistemin elde edilen benzetim sonuçları	66
Şekil 4.6	: PSO-PSS'li sistemin elde edilen benzetim sonuçları	67
Şekil 4.7	: PSO ile belirlenen 'Kstab', 'T1' parametrelerinin parçacık har.....	68
Şekil 4.8	: PSO ile belirlenen 'T2', 'Tw' parametrelerinin parçacık har.....	68
Şekil 4.9	: ABC-PSS'li sistemin elde edilen benzetim sonuçları	69
Şekil 4.10	: ABC ile belirlenen 'Kstab', 'T1' parametrelerinin parçacık har.....	70
Şekil 4.11	: PSO ile belirlenen 'T2', 'Tw' parametrelerinin parçacık har.....	70
Şekil 4.12	: CPSS, ABC-PSS ve PSO-PSS için çıkış gerilimi eğrisinin karşı.....	71
Şekil 4.13	: CPSS, ABC-PSS ve PSO-PSS için çıkış momenti eğrisinin karşı.....	72
Şekil 4.14	: CPSS, ABC-PSS ve PSO-PSS için güç açısı eğrisinin karşı.....	72
Şekil 4.15	: CPSS, ABC-PSS ve PSO-PSS için açısal hız eğrisinin karşı.....	73
Şekil 4.16	: PID kontrolörlü Güç Sistem Modeli.....	74
Şekil 4.17	: PID kontrolörlü sistemin benzetim sonuçları	75
Şekil 4.18	: PSO-PID kontrolörlü sistemin elde edilen benzetim sonuçları	76
Şekil 4.19	: PSO ile belirlenen 'Kp', 'Ki', 'Kd' parametrelerinin parçacık har.	77
Şekil 4.20	: ABC-PID kontrolörlü sistemin elde edilen benzetim sonuçları	78
Şekil 4.21	: ABC ile belirlenen 'Kp', 'Ki', 'Kd' parametrelerinin parçacık har.	79
Şekil 4.22	: K-PID, ABC-PID ve PSO-PID için çıkış gerilimi eğrisinin karşı.....	79

Şekil 4.23	: K-PID, ABC-PID ve PSO-PID için çıkış momenti eğrisinin karşı.	80
Şekil 4.24	: K-PID, ABC-PID ve PSO-PID için güç açısı eğrisinin karşı.	80
Şekil 4.25	: K-PID, ABC-PID ve PSO-PID için açısal hız eğrisinin karşı.	81

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	: ABC algoritmasının temel adımlar	46
Tablo 3.2	: ABC algoritmasının genel adımları	52
Tablo 4.1	: Simülasyon parametreleri [32].....	63
Tablo 4.2	: Çalışma Durumları [32]	63
Tablo 4.3	: Kontrolörsüz sistemin için IAE değerleri	64
Tablo 4.4	: C-PSS Parametreleri [32].....	65
Tablo 4.5	: C-PSS’li sistemin IAE değerleri	66
Tablo 4.6	: PSO-PSS Parametreleri.....	66
Tablo 4.7	: PSO-PSS’li sistemin IAE değerleri	67
Tablo 4.8	: ABC-PSS Parametreleri.....	69
Tablo 4.9	: ABC-PSS’li sistemin IAE değerleri.....	69
Tablo 4.10	: K-PID Parametreleri [11].....	74
Tablo 4.11	: K-PID kontrolörlü sistemin IAE değerleri.....	75
Tablo 4.12	: PSO-PID Parametreleri	75
Tablo 4.13	: PSO-PID kontrolörlü sistemin IAE değerleri	76
Tablo 4.14	: ABC-PID Parametreleri	77
Tablo 4.15	: ABC-PID kontrolörlü sistemin IAE değerleri	78

SEMBOL LİSTESİ

D	: Sönüm katsayısı
delta	: Güç/yük açısı
$d\omega$: Senkron generatörün açısal hızı
E'	: Transient reaktans gerisindeki transient iç emk
E_f	: Uyarım emk'sı (uyarım gerilimi V_f ile orantılı)
E_{fd}	: Generatör alan gerilimi
E_d'	: Yuvarlak rotorlu generatörde geçici hal iç emk d eksenine bileşeni (çelik rotorgövdesi q eksenine akısıyla orantılı)
E_q'	: Geçici hal iç emk q eksenine bileşeni (alan sargısı akısıyla orantılı)
E_d''	: Geçici hal öncesi iç emk q bileşeni (d eksenine damper sargısı ve alan sargısındaki toplam akı ile orantılı)
E_q''	: Geçici hal öncesi iç emk q bileşeni (q eksenine damper sargısı ve q eksenine çelik rotor gövdesindeki toplam akı ile orantılı)
E_G	: Generatör iç gerilimi
E_M	: Motor iç gerilimi
E_{T1}	: Generatör uç gerilimi
E_{T2}	: Rotor uç gerilimi
H	: Atalet (eylemsizlik) sabiti
I_d, I_q	: Armatür akımı d ve q eksenine bileşenleri
J	: Eylemsizlik momenti
K_1	: Senkronlama moment katsayısı
K_2	: Alan akımı değişimi ile elektriksel moment değişiminin ilişkisini belirten katsayı
K_3	: Empedans faktörü parametresi
K_4	: Yük açısı değişimi ve K_3 yoluyla alan akı değişimi arasındaki bağlantıyı yapan katsayı
K_5, K_6	: SMIB sistemine alan devresi dinamiklerinin ilavesiyle oluşan linearizasyon sabitleri
K_A, K_a, K_{ae}	: Gerilim regülatörü içerisindeki yükseltici bloğu kazanç sabiti
K_p, K_i, K_d	: PID kontrolörün oransal, integral ve türevsel kazanç sabitleri
K_S	: Senkronlama momenti katsayısı
Kstab	: PSS'in kazanç sabiti
t	: Zaman
T1, T2, T3, T4	: PSS içerisindeki dinamik kompanzatörün zaman sabitleri
T3	: Yüklü durumdaki alan zaman sabiti
T_A, T_a, T_{ae}	: Gerilim regülatörü içerisindeki yükseltici bloğu zaman sabiti
TB, TC	: Gerilim regülatörü içerisindeki TGR'ye ait zaman sabitleri
T_e	: Generatörden alınan elektriksel çıkış moment
T_m	: Generatöre verilen mekanik giriş momenti
TR	: Gerilim transdüseri zaman sabiti
Tw	: PSS içerisindeki sinyal temizleyici bloğunun zaman sabiti

T_{d0}' , T_{d0}''	: Açık devre d eksen geçici ve geçici hal öncesi zaman sabitleri
T_{q0}' , T_{q0}''	: Açık devre q eksen geçici ve geçici hal öncesi zaman sabitleri
V_d , V_q	: Generatör çıkış geriliminin d ve q bileşenleri
V_b	: Sonsuz bara gerilimi
V_C	: Gerilim transdüserinin çıkışı
V_{ERR}	: Gerilim hata sinyali
V_F	: Uyarım sistem stabilizatörünün çıkış işareti
$+V_{pss}$, $-V_{pss}$: PSS içerisindeki sınırlayıcı bloğu katsayıları
V_R	: Gerilim regülatörü çıkış işareti
V_{ref}	: Referans gerilim değeri
V_{RMAX} , V_{RMIN}	: Yükseltici çıkışında kullanılan doyma limitleri
V_S	: PSS'in çıkış işareti, stabilize edici sinyal
V_T , V_t	: Senkron generatör çıkış gerilimi
X_e , x_e	: Generatörün sonsuz baraya bağlandığı reaktans
X_G	: Generatör endüktif reaktansı
X_L	: İletim hattı endüktif reaktansı
X_M	: Motor endüktif reaktansı
X_T	: Toplam endüktif reaktans
X_d , X_d' , X_d''	: d eksen senkron, geçici hal ve geçici hal öncesi reaktansları
X_q , X_q' , X_q''	: q eksen senkron geçici hal ve geçici hal öncesi reaktansları
ω	: Generatörün açısal hızı
ω_0	: Generatör milinin açısal dönüş hızı, senkron hız
ω_e	: Elektrik açısal dönüş hızı
ω_m	: Mekanik açısal dönüş hızı
ω_n	: Doğal frekans
ω_S	: Senkron açısal hız
δ	: Güç (rotor) açısı (sonsuz baraya göre)
δ_0	: Salınım yapan güç/yük açısının ilk değeri
δ_1	: Salınım yapan güç/yük açısının yeni kararlı hal değeri
δ_m	: Salınım yapan güç/yük açısının maksimumu
$\Delta\omega$: Açısal hız değişimi, Rotor hız sapması
$\Delta\delta$: Güç/Yük açısı değişimi
ΔT_e	: Elektriksel çıkış momenti değişimi
ΔT_m	: Mekanik giriş momenti değişimi
ΔU_{pss}	: PSS çıkış işareti
ζ	: Sönüm katsayısı
fitness_i	: i. kaynağın kalitesini
failure_i	: i. kaynağın geliştirilememe sayısı
x_{ij}	: j. Parametrenin i. kaynağının değeri
x_j^{min} , x_j^{max}	: j. Parametrenin alt ve üst değerleri
v_{ij}	: j. Parametrenin i. kaynağının x_{ij} komşuluğundaki değeri
SN	: Yiyecek kaynağı
D	: ABC için Optimize edilecek parametre sayısı
p_i	: i. kaynağın nisbi seçilme olasılığı
θ_i^k	: k. iterasyon i. parçacığının geçerli hızı
θ_i^{k+1}	: k. iterasyon i. parçacığının yeni hızı,
c_1	: Ayarlanabilir kuramsal katsayı (özgüven katsayısı),
c_2	: Ayarlanabilir sosyal katsayı (sürüye olan güven katsayısı)

rand _{1,2}	: [0,1] aralığında rasgele sayı,
s _i ^k	: k. iterasyon i. parçacığın geçerli konumu,
p _{best_i}	: i. parçacığın kişisel en iyi değeri
g _{best}	: Sürünün en iyi değeri
s _i ^{k+1}	: k. iterasyon i. parçacığın yeni konumunu göstermektedir.
ω	: Atalet katsayısı,
ω _{max}	: Başlangıç atalet katsayısı
ω _{min}	: Son atalet katsayısı
iter _{max}	: Yapılacak toplam iterasyon sayısı
iter	: O anda yapılan iterasyon

ÖZET

GERİLİM KONTROLÜNDE GÜÇ SİSTEMLERİ KARARLI KILICISI (GSKK) UYGULAMALARI VE ALTERNATİFLERİ

Hızla gelişen teknolojiyle birlikte enerji, günümüzün en önemli konularından birisi haline gelmiştir. Artan enerji talebi beraberinde enerji kalitesi kavramını da getirmiştir. Enerji kalitesi, kesintisiz elektrik enerjisi anlamına gelmekle birlikte şebeke gerilim ve frekans değerlerinin belli sınırlar dahilinde olması demektir. Bu koşulları sağlamak için güvenilir bir güç sistemine sahip olunması gerekmektedir.

Güç sistemlerinin güvenilir sınırlar dahilinde çalışabilmesi için bu sistemlerin enerji üretiminde bağımlı oldukları generatörlerin senkronizmada kalması ve çalışmaya devam etmesi gerekmektedir. Bu açıdan bakıldığında kararlılık, senkron generatörlerin rotor açalarına bağlıdır. Bu çalışmada generatörlerin rotor açısı kararlılığını koruyarak generatör uyarım kontrol sisteminin dinamik performansının artırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla sistemleri kontrol eden elemanların parametrelerinin optimizasyonu için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Son yıllarda biyologlar ve bilgisayar uzmanlarının “Yapay Yaşam” alanı kapsamı altında hayvan sürülerin davranışlarının nasıl modellenebileceği ve aralarındaki iletişimin mantığını üzerinde çalışmalar yapmaktadırlar. Üstelik “Sürü zekası” (Swarm Intelligence) adı verilen bu yaklaşımların optimizasyon problemleri, robotbilim ve kontrol teorisi alanında başarılar göstermeleri bu konu üzerindeki çalışmaları arttırmıştır.

Bu çalışmada literatürde çok kullanılan geleneksel güç sistemi kararlı kılıcısı (CPSS) ve PID kontrolörün parametreleri “Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO)” ve “Yapay Arı Kolonisi (ABC)” yöntemleriyle belirlenmiştir.

Belirlenen parametrelerin kontrol performansı tek makineli sonsuz baraya bağlı sistem (SMIB) modeli üzerinde yapılan benzetim çalışmalarıyla geleneksel güç sistem kararlı kılıcısı (CPSS) ve PID kontrolör ile “Matlab/Simulink” ortamında karşılaştırılarak test edilmiştir.

SUMMARY

APPLICATIONS OF POWER SYSTEM STABILIZER (PSS) AND ITS ALTERNATIVES IN VOLTAGE STABILITY CONTROL

Energy has become one of the most important topics along with rapidly developing technology. By the increasing of energy demands have brought the concept of energy quality. The quality of energy is the meaning of electric supply uninterruptibility. In accordance with the voltage and frequency must be kept between close tolerances. It is required a reliable power system to yield these conditions.

Power systems are devoted to synchronous generators for electric energy production. All synchronous generators must be kept in synchronism for proper system working. From this point of view power system stability is related to rotor angles of synchronous generators. In this thesis, it is focused on using the stability of the generator rotor angle and increasing dynamic performance of generator excitation systems. For this purpose, various methods have been developed for optimization of control components system parameters. In recent years, biologists and computer experts are working modeling of behaviour of animal swarms and the logic of communication between them under the "Artificial Life" area. Moreover, studies about this approaches that called "Swarm intelligence" has increased with demonstrating success in the field of optimization problems, robotics and control theory studies.

In this study, parameters of conventional power system stabilizer (CPSS) that are commonly used and PID controller were determined by means of "Particle Swarm Optimization (PSO)" and "Artificial Bee Colony (ABC) methods.

Control performance of determined parameters were tested by comparing CPSS and PID controller. the model of Single Machine Infinite Bus System is created in Matlab/Simulink.

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun enerji ihtiyacı ve tüketimi endüstri devriminden bu yana sürekli artmaktadır. Günümüzde modern toplumun enerji ihtiyacının büyük bir kısmı elektrik enerjisi olarak karşılanmakta ve endüstriyel olarak gelişmiş toplumların elektrik enerjisi ihtiyaçları her geçen on yıl ile birlikte ikiye katlanmaktadır. Bu büyük artışı karşılamak amacıyla elektrik enerjisi üretimindeki eğilim büyük ve karmaşık enterkonnekte şebekelerin kurulması yönündedir. Enterkonnekte enerji iletim şebekelerinin kurulmasıyla yüzlerce kilometre uzaktaki iki generatör paralel çalışabilmektedir [1].

Enterkonnekte bağlantıların gelişmesinden ve yeni teknolojilerin kullanılmasından dolayı güç sistemlerinin karmaşıklığı sürekli artmaktadır. Mali ve düzenleyici sınırlamalar sistemlerin kararlılık sınırlarına yakın çalışmasını gerektirmektedir. İşte bu iki faktör yeni kararlılık problemleri meydana getirmektedir. Sistem güvenliğini geliştirmek, ekonomik tasarımı kolaylaştırmak ve daha esnek sistem çalışması sağlamak için özel kontrol yardımları kullanılmaktadır [2].

Güç sistemleri oldukça kompleks sistemlerdir ve yüksek nonlineerlik özelliğine sahiptirler. Dinamik yük değişimleri ve kontrolör etkileriyle sistemin enerji üretim kapasitesini etkileyen küçük salınımlar oluşmaktadır. Enerji üretim birimi kontrollerinden uyarım kontrol sistemlerinin önemli bir parçası olan geleneksel güç sistemi kararlı kılıcılar (PSS) bu küçük salınımların sönümlemesinde kullanılırlar. Bu şekilde aynı zamanda güç üretim sistemlerinin en önemli elemanı olan senkron generatörlerin de kararlılığı arttırılmaktadır. Bu stabilizatörlerin dizaynı için belirli bir çalışma noktası civarında lineerize edilmiş sistem modeli kullanılır. Basit bir yapıya sahip geleneksel güç sistem stabilizatörlerinde sabit parametreler bulunmaktadır[3]. Bu parametrelerin belirlenmesi ve optimize edilmesi büyük önem arz eder. Parametrelerin optimizasyonu konusunda çeşitli yöntemler olmakla birlikte son yıllarda ortaya çıkan ve üzerinde oldukça fazla çalışma yapılan sürü zekasına dayalı yöntemler öne çıkmaktadır.

Hazırlanan tezin genel kısımlar bölümünde elektrik enerji sisteminin kararlılığı üzerinde durulmuş. Senkron generatörlerde normal çalışma durumunda ortaya çıkabilecek kararsızlık durumları açıklamalı olarak anlatılmıştır.

Malzeme ve yöntem bölümünde tez çalışmasında kullanılacak olan senkron generatörün matematiksel modeli çıkartılmış. Senkron generatörlerin uyartım sistemleri anlatılıp gerilim kontrolüne yardımcı olan güç sistem kararlı kılıcıs (PSS) anlatılmıştır. Daha sonra kontrolörlerin parametrelerinin optimizasyonu için kullanılan Yapay Arı kolonisi (ABC) ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) yöntemleri anlatılmıştır.

Bulgular bölümünde parametreleri klasik, ABC ve PSO yöntemleriyle belirlenmiş PSS ve PID kontrolörlü güç sistemi modellerinin benzetimleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve sonuçları grafiksel ve sayısal olarak verilmiştir.

Tartışma ve sonuç bölümünde elde edilen benzetim sonuçlarına göre değerlendirmeler yapılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

Bu bölümde güç sistemlerinin sağlıklı çalışabilmesi için bozucu etkiler karşısında ne gibi kararlılık problemleriyle karşılaştıkları hakkında bilgi verilecektir. Kararlılık kavramı ve çeşitleri incelenecektir.

2.1. KARARLILIK

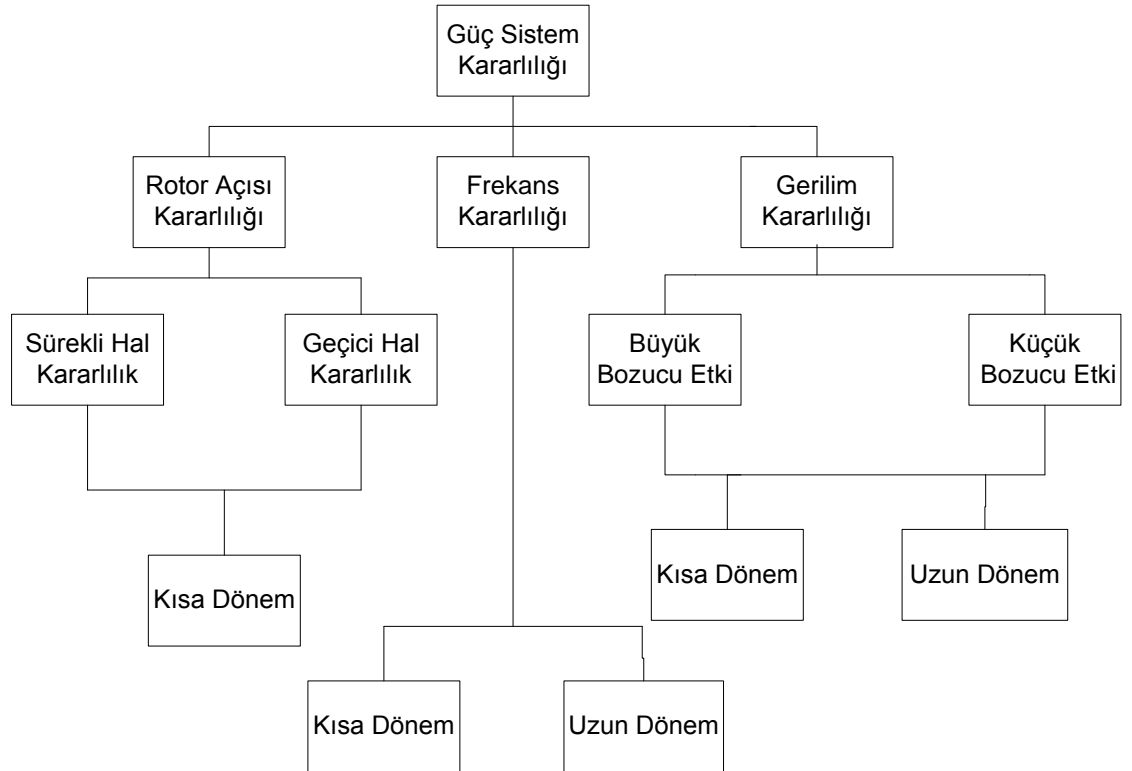
Güç sistemlerinde kararlılık bir bozucu etkiye sahip olan sistemin bozucu etki sonrası tekrar bozucu etki öncesi çalışma koşullarına dönebilme yeteneği olarak tanımlanabilir [4].

Sürekli çalışma koşullarında, sistemde (kayıplar ihmal edildiğinde) mekanik giriş ve elektriksel çıkış enerjileri denge halindedir. Sistem ancak bu şartın sağlanmasıyla kararlı halde çalışabilir. Burada mekanik giriş enerjileri, senkron generatöre ilişkin tahrik sistemlerinin enerjileridir. Elektriksel çıkış enerjileri ise elektriksel yüklerle ilgilidir. Sistemin kararlı çalışabilmesi için gerek şart bu dendedir [4].

Elektrik enerji sistemindeki kararsızlık sistem yapısına ve çalışma moduna bağlı olarak pek çok farklı şekilde açığa çıkabilir. Sistemde oluşan ani yük değişimleri, iletim hatlarındaki kısa devreler gibi bozucu etkiler sonucunda elektriksel ve mekaniksel enerjiler arasındaki denge bozulur. Sistemde tekrar dengeyi sağlamak amacıyla aktif güç, mekanik regülatörler kullanılarak generatöre giriş olarak verilen tahrik gücünde yapılan değişimle ayarlanır. Reaktif güç değişimi ise uyarma devresindeki elektriksel elemanlar tarafından uç geriliminin ayarlanması ile dengelenir. Enerji dengesinin bozulması sonucunda sistem generatörlerinin rotor açılarındaki oluşan salınımlar sistemin kararlılığını belirler. Senkronizmadan çıkan üniteler koruma sistemleri tarafından servis dışı bırakılır [5,6].

Genel olarak, kararlılık problemi senkron çalışmayı sürdürme yeteneği olmalıdır. Elektrik enerji sistemi elektrik gücü üretimi, senkron makinelerle bağlı olduğundan sistemin yeterli çalışması için gerekli koşul bütün senkron makinelerin senkronizmada kalması ve çalışmaya devam etmesidir. Bu açıdan kararlılık, generatör rotor açılarının dinamikleri ve güç açısı bağıntılarından etkilenir.

Kararsızlık sadece senkron makinaların senkronizmadan çıkması olarak nitelendirilemez. Senkronizmada bir kayıp olmasa bile kararsızlık ile karşılaşılabilir. Senkron generatörün bir iletim hattı üzerinden yük olarak asenkron motoru beslediği bir sistemde yük geriliminin çökmesi sebebiyle de kararsızlık meydana gelebilir. Bu sebeple kararlılık problemini daha rahat anlamak için kararlılık çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir [6]. Kararsızlık, bozucunun cinsine, bozucunun etkilediği sistem dinamiğine veya bozucunun ilgili sistem dinamiğine etki ettiği zaman dilimine göre Şekil 2.1'deki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 2.1: Güç sistemlerinde kararlılığın sınıflandırılması

2.2. ROTOR AÇISI KARARLILIĞI

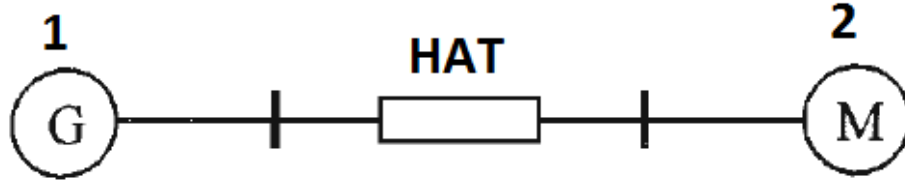
Rotor açısı kararlılığı, güç sistemine bağlı olan senkron makinaların senkron olarak çalışabilme yeteneğidir. Kararlılık problemi, güç sistemindeki elektromekanik salınımların incelenmesini kapsar. Problemin ana ilkesi, senkron generatörlere ait çıkış güçlerinin rotor açısı salınımlarına bağlı olarak değişmesidir.

Senkron makinalar, uyarma ve endüvi sargıları olmak üzere iki temel elemandan müteşekkilirler. Genel olarak uyarma sargısı rotorda, endüvi sargısı ise statorda bulunur. Uyarma sargısı doğru akım ile beslenir. Rotor bir türbin ile döndürüldüğü zaman uyarma sargısının dönen manyetik alanı statorda bulunan üç fazlı endüvi sargısında alternatif gerilim endükler. Stator uçlarına yük bağlandığında akan akımın ve stator uçlarındaki gerilimin frekansı rotorun hızına bağlıdır. İki veya daha çok senkron generatör beraber çalıştığında tüm generatörlerin stator gerilimleri ve akımları aynı frekansa sahip olmalıdır ve her generatörün rotorunun hızı bu frekansla senkronizedir. Bu nedenle, sisteme bağlı bütün senkron generatörlerin rotor hızları senkronizmada olmalıdır [2].

Stator sargılarının fiziksel düzenlemesi sürekli çalışmada rotorla aynı hızda dönen bir manyetik alanını üretilmesini sağlayacak üç fazlı akımların akmasını sağlayacak şekildedir. Generatörde stator alanının elektromanyetik momenti rotorun dönmesini zıt yönde etkiler, böylece mekanik moment dönmeyi devam ettirecek şekilde tahrik makinesi tarafından üretilmelidir. Generatörün elektriksel moment veya güç çıkışı sadece tahrik makinesi tarafından mekanik moment girişini değiştirerek ayarlanır. Mekanik moment girişinin artma yönündeki etkisi statorun döner manyetik alanına bağlı olarak rotoru yeni bir duruma götürmektedir. Tersine olarak, mekanik moment ya da güç girişindeki azalma rotorun hızını yavaşlatacaktır. Sürekli çalışma koşulları altında, rotor alanı ve statorun döner alanı aynı hıza sahiptir. Bununla birlikte, Generatörün elektriksel moment ya da güç çıkışına bağlı olarak bunların arasında bir açısal fark vardır [6].

2.2.1. Güç Açısı Bağıntısı

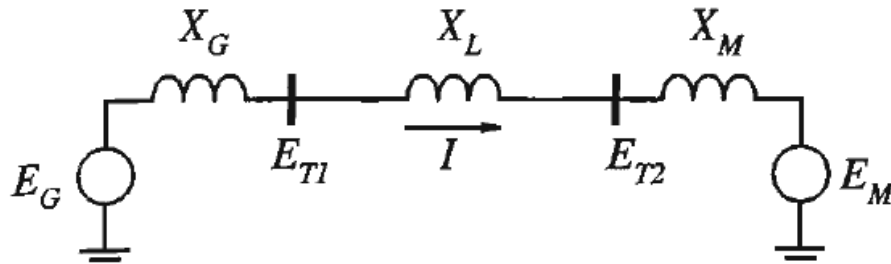
Güç sistemi kararlılığını belirleyen önemli bir özellik senkron makinelerin rotorlarının açısıl konumları ile gücün karşılıklı değişimleri arasındaki bağıntıdır. Bu bağıntı yüksek dereceden doğrusal değildir. Bunu göstermek için Şekil 2.2 deki basit sistemi göz önüne alalım.



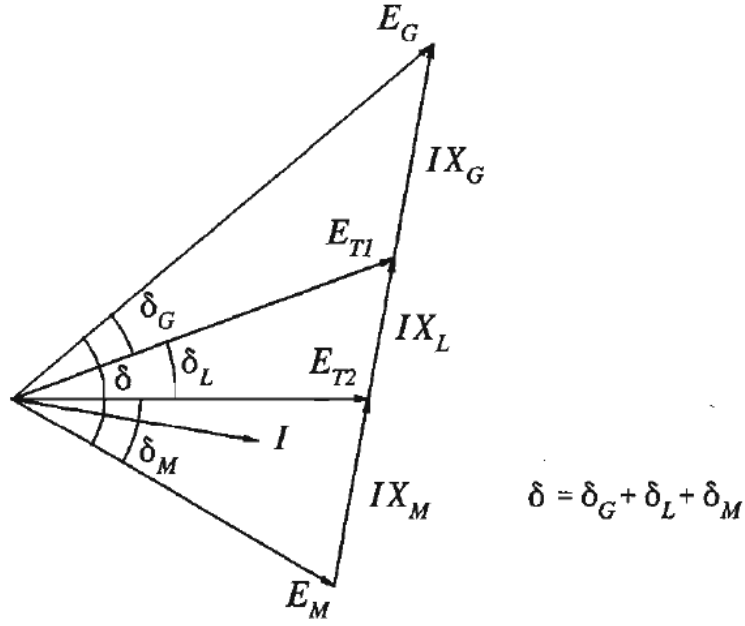
Şekil 2.2: İki Senkron Makineden Oluşan Sistem[2]

Bu, X_L endüktif reaktansına sahip fakat direnci ve kapasitesi ihmal edilen bir iletim hattı ile iki senkron makineden oluşan bir sistemdir ve 1 makinesi bir generatörü göstermekte olup, 2 ile gösterilen motordur. Generatörden motora güç transferi iki makinenin rotorları arasındaki δ açısıl farkının fonksiyonudur. Bu açısıl fark üç elemandan oluşur: generatör iç açısı δ_G (generatör rotorunun, statorun döner alanından ne kadar ileride olduğunu gösteren açı), generatör ve motorun uç gerilimleri arasındaki açısıl fark (generatörün stator alanının motorunkinden ne kadar ileride olduğunu gösteren açı) ve motorun iç açısı (rotorun döner stator alanından ne kadar geri olduğunu veren açı). Her bir senkron makineyi ifade etmede, etkin reaktans arkasındaki iç gerilimi içeren basit model kullanılır. Makine reaktansının değeri inceleme amacına bağlıdır. Sürekli durum analizi için, uyarma gerilimine eşit iç gerilimli senkron reaktansı kullanmak uygundur.

İncelenen sistemin tek-hat şeması şekil 2.3 de, generatör ve motor gerilimleri arasındaki ilişkiyi gösteren fazör diyagramı şekil 2.4 de gösterilmiştir. Generatörden motora iletilen güç, denklem (2.1) ile gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Sistemin Tek Hat Şeması[2]



Şekil 2.4: Generatör Ve Motor Gerilimleri Arasındaki İlişkiyi Gösteren Fazör Diyagramı [2]

$$P = \frac{E_G E_M \sin \delta}{X_T} \quad (2.1)$$

$$X_T = x_G + x_L + x_M \quad (2.2)$$

Güç/açı bağıntısı sinüs biçimindedir (2.1). Otomatik gerilim regülatörlerinin etkilerini içeren daha doğru makine modellerinde, açı ile güçteki değişim sinüzoidal bağıntısından önemli ölçüde sapacaktır. Bununla, beraber genel şekil benzerdir. Açı sıfır olduğunda güç iletimi olmaz. Açı büyütülürken, güç transferi maksimum olur. Maksimum gücün genliği, makine iç gerilimi ile doğru, gerilimler arasındaki makinelerin reaktanslarını ve iletim hatlarının reaktansının toplamı olan reaktansa (2.2) ters orantılıdır. İki makineden daha fazla makine olduğunda, onların bağlı açısız yer değiştirmeleri benzer tarzda güç alışverişini etkiler. Bununla birlikte, güç iletimi ve açısız sapmanın sınır değerleri üretim ve yük dağılımının karmaşık bir fonksiyonudur. Herhangi iki makinenin arasındaki 90° lik açısız sapma (iki makineli sistemin nominal sınır değeri) özel bir öneme sahip değildir.

2.2.2. Küçük İşaret Kararlılığı

Küçük işaret kararlılığı güç sisteminin küçük bozulmalar altında senkronizmayı koruyabilme yeteneğidir. Yük ve üretimdeki ufak değişimlerden dolayı bu tür bozulmalar sürekli oluşabilir. Bu bozulmaların sistem eşitliklerinin doğrusallaştırılması için yeteri kadar küçük oldukları kabul edilir. Küçük işaret kararlılığı problemi iki nedene dayanır. Yeterli senkronizasyon momentinin eksikliğinden dolayı rotor açısı sürekli artar veya yeterli sönüm momenti eksikliğinden dolayı rotor açısı salınımlarının genliği artar. Senkronizasyon momenti otomatik gerilim regülatörleri sayesinde yeterli seviyeye yükseltildiğinden, küçük işaret kararlılığında karşılaşılan genel sorun rotor açısı salınımlarının yetersiz sönümüdür.

Küçük işaret kararlılığını dinamik hal ve sürekli hal kararlılığı olarak ayırabiliriz. Dinamik hal kararlılığı, birkaç saniyelik geçici olay sonrasında (devir sayısı regülatörlerinin devrede olduğu birkaç dakikalık sürede) sistemin bozucu etkiye cevabıdır. Geçici olay sonrası devreye giren hız regülatörleri mekanik giriş enerjisini artırarak veya azaltarak, mekanik güç ile elektriksel güç dengesiin sağlamak isterler. Sürekli hal kararlılığı da beklenen yük değişimleri ve küçük bozucu etkilere sistemin birkaç dakika ve daha uzun sürede verdiği cevaptır. Senkron makinelerin bazılarında oluşabilecek üretim değişikliği veya yükte oluşabilecek bir değişim karşılansılabilecek küçük bozucular olarak kabul edilir. Kararlılık koşulu, küçük bozucular geçici veya kalıcı olsa da sistemin bir süre sonra tekrar işletme koşullarında çalışmayı sürdürmesidir.

Küçük bozucu etki sebebiyle, sisteme ait tüm durum değişkenlerinde oluşan farklar çok küçükse, sistemin bozucu etki sonrasında çalışma noktası başlangıç çalışma noktası yakınlarındadır. Bu durumda, doğrusal olmayan bu sistem davranışı doğrusal bir matematiksel model gibi incelenebilir. Doğrusallaştırılan sistem eşitlikleri yardımıyla sistem matrisi elde edilir. Sistem matrisinden elde edilen özdeğerlerin imajiner eksenindeki konumları ile sistemin küçük işaret kararlılığı analiz edilir [6].

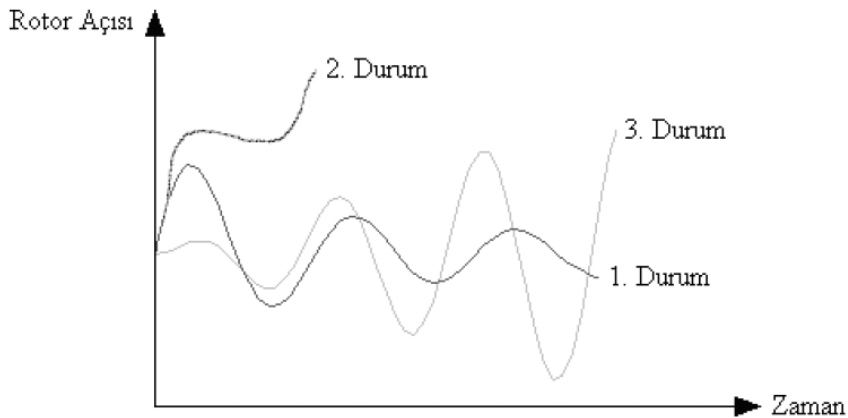
2.2.3. Geçici Hal Kararlılığı

Geçici hal kararlılığı, güç sisteminin büyük bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra senkronizmayı koruma yeteneğidir. Ani yük değişimleri, enerji iletim hatlarındaki kısa

devreler gibi bozucu etkiler ile senkronizmanın ani kaybı söz konusu olabilir. Genellikle faz-toprak, iki faz-toprak ve üç faz toprak kısa devreleri ele alınır. Geçici hal kararlılığı analizinde bozucu etkiden sonraki birkaç saniyelik süre incelenir. Bu zaman aralığında, tahrik sistemlerinin senkron generatöre giris olarak verdigimekanik gücün sabit olduğu yani zaman sabiti yüksek mekanik regülatörlerin devreye girmediği kabul edilir [5].

Bozucu etki öncesi ve sonrasında, durum degiskenlerinde olusan farklar ihmal edilemeyecek kadar büyük olduklarından sistemin matematiksel modeli küçük isaret kararlılığı analizindeki gibi dogrusal esitliklerle ifade edilemez. Bu sebeple geçici hal kararlılığı analizi için sistemin dogrusal olmayan esitliklerden meydana matematiksel modeli olusturulur ve çözüm bilgisayar yardımıyla yapılır. Bozucu etki sonrası yeni çalışma durumunun kararlılığı, rotor açısının zamana göre degisimine bakılarak elde edilir. Eğer tek makinalı sistemler ele alınıyorsa kararlılık analizi esit alan kriteri ile de yapılabilir [6].

Enerji sistemi büyük bir bozucu etkiye maruz kaldığında sistemdeki senkron generatörlerin rotor açılarının ilk salınımları oldukça önemlidir. Sistemin senkronizmada kalma yeteneği ya da kararlı olarak çalışması, ilk salınımdan sonra salınımların genliklerinin giderek azalması ile mümkündür. Bozucunun türünü, yerini ve süresini içeren darbenin etkisi, geçici olay sırasında enerji iletim sisteminingüçlü senkronizasyon yeteneği, türbin-generatör ve iletim sistemi parametreleri, rotor açısının ilk salınıma ilişkin geçici olayları en çok etkileyen etmenlerdir [5]. Sekil 2.3’de farklı rotor açısı davranışları ele alınmıştır.



Şekil 2.5: Farklı rotor açısı davranışları [2]

Sekil 2.3'deki birinci duruma göre rotor açısı salınımlarının genlikleri zamana bağlı olarak azalmaktadır bu sebeple birinci durum kararlı durumdur. İkinci durumda senkronizma kaybından dolayı rotor açısı sürekli artmaktadır. Bu duruma ilk salınım kararsızlığı denir. İlk salınım kararsızlığı yetersiz senkronizasyon momenti nedeniyle meydana gelir. Üçüncü durumda ise sistem ilk salınıma göre kararlı olmasına rağmen zaman ile salınım genlikleri büyümektedir. Genellikle en çok karşılaşılan kararsızlık üçüncü durumdaki kararsızlıktır.

2.3. GERİLİM KARARLILIĞI

Sistemin normal çalışmada veya bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra tüm bara gerilimlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde kalma yeteneği gerilim kararlılığı olarak tanımlanabilir. Gerilim kararlılığı problemi, iletim hatları üzerinden enerji akışı olduğunda hatların endüktif reaktansları sebebiyle oluşan gerilim düşümüne dayanır. Gerilim kararlılığı için gerek koşul sisteme ait her baraya giren reaktif gücün artması durumunda bara geriliminin genliğinin artmasıdır. Bu durumda gerilim-reaktif güç duyarlılığı pozitifdir. Sistemin en az bir barası için gerilim-reaktif güç duyarlılığı negatif ise gerilim kararsızlığı söz konusu olur. Gerilim kararsızlığına neden olan ana faktör güç sisteminin reaktif güç talebini karşılayamamasıdır [2]. Problemin temeli, çoğunlukla endüktif reaktansla üzerinde aktif ve reaktif güç akışı olduğunda oluşan gerilimdeki düşmedir.

2.4. FREKANS KARARLILIĞI

Frekans kararlılığı sistemde üretilen ve talep edilen güç arasındaki dengesizliğe sebep olan hızlı değişimlerin ardından kararlı frekansı devam ettirebilme yeteneğidir.

Frekans kararlılığı iki kısımda incelenir. Kısa dönem kararlılık yük atımı, generatör korumaları ve koruma cihazlarından etkilenir ve bozucudan sonraki birkaç saniyeyi kapsar. Uzun dönem kararlılık türbin gibi diğer faktörlerden etkilenir ve bozucudan sonraki birkaç dakikayı kapsar. [2,7,8]

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1.SENKRON GENERATÖRLER

Senkron generatörlerin yapıları ve kapasiteleri çok büyüktür. Büyük güçlerde enerji üretirler. İmalatı diğer endüksiyon makinelerine göre pahalı olmasına rağmen büyük güçlerde yüksek verimle çalışmaları avantajlarıdır[9].

Tarihi süreç içerisinde yeni kurulan güç sistemlerinde ve senkron generatörlerde, üretilen MW başına maliyeti azaltmak amacıyla güç artırımına gitmek genel bir eğilim olmuştur. Ancak yakıt gideri ucuz temin edilebilen küçük işyerlerinde küçük çaplı güç tesisleri de ekonomik olabilmektedir. Genellikle kullanılan senkron generatörler 100-1300 MW arası güç değerlerinde olmaktadır[10].

Genel olarak bir senkron generatör iletim hattına bir yükseltici transformatör üzerinden bağlanır. Generatör ve transformatör arasındaki bağlantı, küçük bir ünite olması durumunda kablolarla, büyük güçlerde ise, birkaç adet tek fazlı ekranlanmış bara üzerinden yapılır. Genellikle generatör trafosu olarak tank tipi trafo kullanılır ve dışarıda bir yere yerleştirilir. Transformatör ise yüksek gerilim kabloları veya kısa havai hatlar üzerinden ikincil baraları besler.

Senkron generatörler temel olarak yüksek hızlarda çalışan buhar ve gaz türbinleri “turbogeneratörler” veya düşük hızlarda sürülen su türbinleri olarak basitçe sınıflandırılabilir. Merkezkaç kuvvetini düşürmek amacıyla yüksek hızda çalışan turbogeneratörler çapları küçük, aksel uzunlukları ise büyük olarak imal edilirler. Tipik olarak iki veya dört elektriksel kutba sahiptirler ve 50 Hz’lik şebeke için sırasıyla 3000 veya 1500 devir/dk ile sürülmeleri gerekir. Buna karşılık düşük hızlı su türbinlerinde kullanılan generatörler tipik olarak 500 devir/dk veya daha düşük devirlerle sürülürler. Çok fazla sayıda elektriksel kutbasahiptirler, çapları büyük aksel

uzunlukları küçüktür. Manyetik kutup sayısı güç sisteminin gerektirdiği hıza ve nominal frekansına bağlıdır.

Tüm generatörler stator ve rotor adı verilen iki ana manyetik parçadan oluşurlar. Her ikisi de manyetik çelikten imal edilir. Stator gövdesi ve iç oluklar ince tabakalar halindeki ferromanyetik metallerin birleştirilmesinden meydana gelmiştir. Sisteme güç veren ve yük akımını taşıyan armatür sargısı, stator iç yüzeyinde eşit aralıklarla açılmış oluklara yerleştirilmiş üç özdeş faz sargısından oluşur. Bu sargılar faz eksenleri arasında $2\pi/3$ radyan (120°) elektriksel açı olacak şekilde kutupların üzerine eşit olarak dağıtılmış ve rotor milinin hareketine karşı yalıtılmıştır[9].

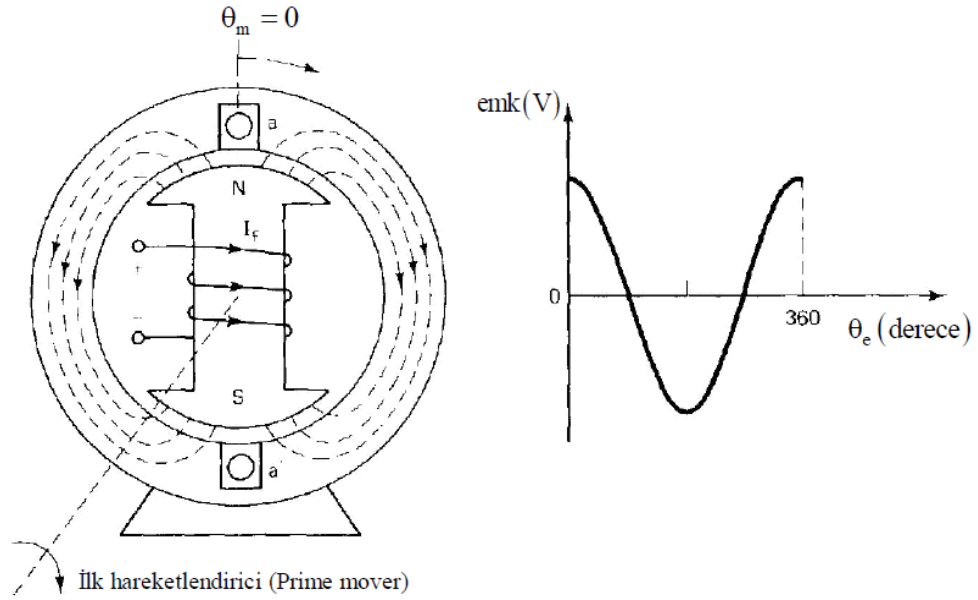
Rotor tipleri, rotor kesitine göre çıkık ve yuvarlak olarak ikiye ayrılırlar. Çıkık kutuplu yapı (yüksek kutup sayısı ve geniş çaplı) düşük hızlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Bu tip senkron makineler hidrolik türbinlerin düşük hızlarını karşılamak için kullanılırlar. Silindirik veya yuvarlak rotorlu yapı ise, santrifüj gücünün kabul edilebilir limitler içinde tutulabilmesi için küçük çaplı yapı zorunluluğu olan yüksek hızlı uygulamalarda kullanılmaktadır. İki ve dört kutuplu silindirik rotorlu senkron generatörler buhar türbinlerindeki yüksek hız gereksinimlerini karşılarlar. Uzun silindirik rotorlarda alan sargısı için kutupların her iki yanında eksene paralel oluklar bulunmaktadır.

Rotor buna ilaveten kısa devre edilmiş damper veya amortisör adı verilen sargıları da içerir. Bu sargılar rotor mekanik osilasyonlarının sönümlenmesi için kullanılmaktadır. Yüksek hızlı yuvarlak rotorlu generatörlerde damper sargıları genellikle iletken kama formunda uyartım sargısı ile aynı şekilde oluklara yerleştirilir. Düşük hızlı generatörlerde ise kutup yüzeyindeki eksenel oluklara yerleştirilir[10].

Güç sistem simülasyonlarında elde edilen deneyimler sonucunda çoğu senkron generatörün, doğru bir şekilde modellenmesi, eşdeğer ideal makine devresine alan sargısı yanında bir veya iki takım damper sargısı ilave edilmesiyle mümkün olmaktadır. Eşdeğer makine modelindeki damper sargıları, fiziksel olarak amortisör sargılarını veya rotor kutup gövdelerinde sönümleyici eddy akımlarını temsil ederler[9].

DC akımla beslenen rotor uyarım sargısı, uyarım akımı büyüklüğü ile orantılı olarak bir dönen manyetik akı üretir. Bu dönen manyetik akı üç fazlı stator armatür sargısının her bir fazı üzerinde bir elektromotor kuvvet (emk) endükler. Bu endüklenen emk ise güç sistemine AC akım akışı sağlar.

Şekil 3.1’de ise senkron generatörden gerilim üretilmesi gösterilmiştir. Basitleştirmek amacıyla burada tek bir stator sargısı gösterilmiştir. Gerçekte generatörlerde üç faza ait çok sayıda bobin stator üzerindeki oluklara dağılmış durumdadır. Her bobinde ise birçok sarım bulunmaktadır.



Şekil 3.1 Senkron generatör rotor döner manyetik alanı ve endüklediği gerilim

Bu AC armatür akımları kendi armatür reaksiyonlarını üreterek birleşik etkisi sabit olan fakat rotorla aynı hızda dönen bir manyetik akı oluştururlar. Uyarım akısı ve armatür reaksiyonu akısı birlikte yeni bir akı meydana getirirler. Bu birleşik akı da rotora göre durağan, statora göre ise senkron hızla dönmektedir. Eri akımları nedeniyle stator gövdesinde oluşacak demir kayıplarının önlenmesi için stator gövdesinin shaft yönünde aksel olarak parçalı biçimde lamine olarak yapılması gerekmektedir. Bununla beraber manyetik akı rotora göre durağan olduğu için rotor gövdesi komple çelikten yapılır. Bazı nedenlerle rotor hızı senkron hıza göre farklılık gösterince, akı rotora göre durağan olmadığından damper sargılarında akımlar endüklenir. Lenz yasasına göre bu akımlar

kendilerini meydana getiren akı değişimine karşıdırlar. Bu nedenle senkron hıza yeniden ulaşılmasına ve rotor osilasyonlarının sönümlemesine katkıda bulunurlar [10].

Üç fazlı senkron makineler enerji üretiminde yaygın olarak kullanılırlar. Birkaç makine birlikte çalışırken senkron hızda yani sabit hızda çalışırlar. Yani rotor bir mekanik güç kaynağına bağlıdır ve analizleri basitleştirme açısından sabit hızla döndürüldüğü düşünülür). Rotor hızı ile üretilen gerilimin frekansı direkt olarak bağlantılıdır. Bu ilişki (3.1)'de gösterilmiştir. Buna göre generatör dönüş hızı ile üretilen elektiriğin frekansı doğru orantılıdır. Yani dönme hızı artarsa frekans da artar ya da tersi olur. Generatörün mekanik hızı ile elektrik frekansı senkronize olduğundan senkron generatör olarak isimlendirilmiştir.

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \quad (3.1)$$

f : üretilen frekans (Hz)
 f p : rotordaki çift kutup sayısı
 n : rotor hızı (dev/dk)

Benzer ilişki (3.2) mekanik açı ile (rotor dönüş açısı) üretilen gerilimin açısı arasında da vardır. Örneğin dört kutuplu bir makinede rotor bir kez döndüğünde elektriksel açı iki tam dönüş yapmış olacaktır.

Mekanik dönüş hızı rad/s cinsinden yazılırsa (2.2) ifadesi (3.3) deki gibi yazılabilir. AC gerilim üretmek için kullanılan senkron generatörün kutup sayısı üretilecek gerilimin frekansı ve rotor mil hızına göre belirlenir. Buna göre hidroelektrik santrallerde rotor hızı düşük olduğundan kutup sayısı da fazla olmaktadır.

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m \quad (3.2)$$

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m \quad (3.3)$$

θ_m : kutup başının taradığı açı (radyan)

θ_e : elektriki olarak taranan açı (radyan)

ω_m : mekanik açısal dönüş hızı (rad/s)

ω_e : elektriki açısal dönüş hızı (rad/s)

Gerilimin endüklendiği armatür sargıları statorda, gerilimi endükleyen alan sargısı ise rotor üzerindedir. Alan sargısı dönen kısımda olduğu için alan sargısının DC akımla beslenme problemi değişik şekillerde çözülmelidir. Bunun için değişik yöntemler vardır. Klasik yöntem fırça-bilezik sistemi ile olmakla beraber, dönen mekanizma içerisinde yerleşik, statik besleme sistemleri ile de sağlanmaktadır. Armatür sargısı alan sargısına göre daha karmaşıktır ve daha büyük akım ve gerilim değerlerini taşır. Bundan dolayı elektrik ve mekanik açıdan daha fazla korumaya alınmalıdır.

Rotor üzerindeki uyarım alan sargısından geçen DC akıma “ I_f ” uyarım alanı akımı denir. Uyarım akımı genellikle uyarıcı adı verilen küçük bir DC generatörden sağlanır. Uyarıcı generatör ile aynı mil üzerinde veya ayrı da olabilir. Uyarım alanı beslemesi için gereken DC uyarım akımı farklı yöntemlerle elde edilebilir. Rotor üzerindeki uyarım alan sargısının beslemesi için, bir uyarım tipinde rotor miline yerleştirilen bir çift bilezik ve fırça düzeneği kullanılırken, diğer bir uyarım sistemi yapısında ise çıkış geriliminden enerjilenen statik yarıiletken “solid state” doğrultucular kullanılır. Diğer bir uyarıcı tipi olan “fırçasız uyarıcı” tipinde ise, ana rotora bağlı farklı bir rotor üzerine yerleştirilen AC sargıdan elde edilir AC gerilim rotor üzerine yerleştirilmiş yarı iletken doğrultucular ile DC akıma çevrilir. Bu sistem kendi kendine uyarılan bir sistemdir ve dışarıdan güce gereksinim duymaz. Fırçasız uyarım sistemleri 700 Kw’a kadar yapılırlar ve 1000 MVA gücündeki türbini kontrol edebilirler. Fırça ve doğrultucuların olmaması sistem güvenilirliğini artırır. Alan akımı için tipik gerilim seviyeleri 125V-500V arasındadır.

Uyarım akımı ayarlanarak stator sargısı üzerinde endüklenen gerilim ayarlanabilir. Bunun için uyarım kontrol sistemlerinden yararlanılır. Böylece generatör çıkışında gerilim kontrolü sağlanmış olur.

3.1.1. Senkron Generatör Modeli

Büyük bir güç sistemi modellenirken her bir bileşenin tüm detaylarıyla temsil edilmesi pratik değildir. Bu yüzden oluşturulan sistem modelleri üzerinde doğruluk sınırları ölçüsünde basitleştirmeler yapılmaktadır. Yapılan simülasyonların çoğunda bu basitleştirilen modeller kullanılmaktadır. Analizlerin doğruluk sınırları ölçüsünde oluşturulan sistem modelleri üzerinde basitleştirmeler yapılarak simülasyon yapılmaktadır.

Pratikte, elimizdeki problemin frekans cevap aralığının önemine göre değerlendirilerek, gerekli doğruluk derecesine sahip olan uygun modeller seçilebilir. Modellerde basitleştirmeler yapılarak hesaplamalarda harcanan efor minimize edilebilir. Verilen çalışma zamanı için model seçiminde doğruluk derecesi yüksek modeller ve efor tasarrufu sağlayan basit modeller arasında uygun bir tercih yapılmalıdır. Bununla beraber generatör ve enerji ağının basit bir modeli kullanılarak geçici hal şartlarında senkron generatörlerin temel dinamik davranışları hakkında bilgi edinilebilir [9].

Modelleme, istenen performans gereksinimlerinin değerlendirilmesi, ilave kontrol ve koruma fonksiyonlarının koordinasyonu ve tasarımı ve güç sistemlerinin işletimi ve planlamasıyla ilgili sistem kararlılık çalışmaları için gereklidir. İstenen modelin detayları yapılacak çalışmanın amacına bağlıdır [2] Buna göre senkron generatörün modeli inceleyeceğimiz çalışma amacına yani generatörün dinamik davranış tipine göre de değişmektedir.

3.1.2. Senkron Makinelerin Dinamik Davranışları

Senkron generatörlerin muhtemel arıza ve sistem şartlarının değişmesi durumlarında daha uyumlu çalışmaları üzerine yapılan senkron generatörlerin dinamik davranışları ile ilgili çalışmalar üç gruba ayrılabilir [9].

Geçici hal kararlılığı çalışmaları; Şiddetli geçici bozucu etkilerin meydana getirdiği büyük salınımlarda generatörlerin senkronizmada kalma kabiliyetini incelenir.

Dinamik hal kararlılığı çalışmaları; Bazı çalışma durumlarındaki kararlılık ve küçük sinyal davranışı incelenir. Bu tip çalışmalarda genellikle karmaşık nonlinear modelden türetilen lineerleştirilmiş model kullanılır.

Uzun dönem dinamik enerji dengesi çalışmaları; Genellikle uzun bir periyot içerisinde senkronlama salınımları dışındaki çalışmalardır. Bu tip çalışmalarda senkronlama çalışmalarında kullanılan nonlineer generatör modellerinin yüksek bir frekans doğruluğuna sahip olması gerekmez. Bunun yerine daha yavaş çalışan bileşenler daha önem olacaktır.

3.1.3. Senkron Generatör Modelleri

Senkron generatör davranışını modelleyebilmek amacıyla genel olarak basitten karmaşığa doğru beş farklı model geliştirilmiştir. Model numaraları modelin içerdiği ve çözülmesi gereken diferansiyel denklem takımlarının sayısını göstermektedir. Bu modellerin hepsinde generatör, uygun bir reaktans gerisindeki geçici hal öncesi (subtransient) ya da geçici hal emk şeklinde tanımlanmıştır [10].

3.1.3.1. Model 6 – ($\dot{E}_d'', \dot{E}_q'', \dot{E}_d', \dot{E}_q', \omega, \delta$)

Bu modelde generatör geçici hal öncesi reaktansların gerisindeki geçici hal öncesi emk'larla modellenmiştir. Bu ilişki (3.4) ve (3.5) 'deki stator gerilim denklemlerinde tanımlanmıştır.

$$V_q = -RI_q + X_d''I_d + E_q'' \quad (3.4)$$

$$V_d = -RI_d + X_q'' + E_d'' \quad (3.5)$$

$$T_{d0}'' \dot{E}_q'' = E_q' - E_q'' + I_d(X_d' - X_d'') \quad (3.6)$$

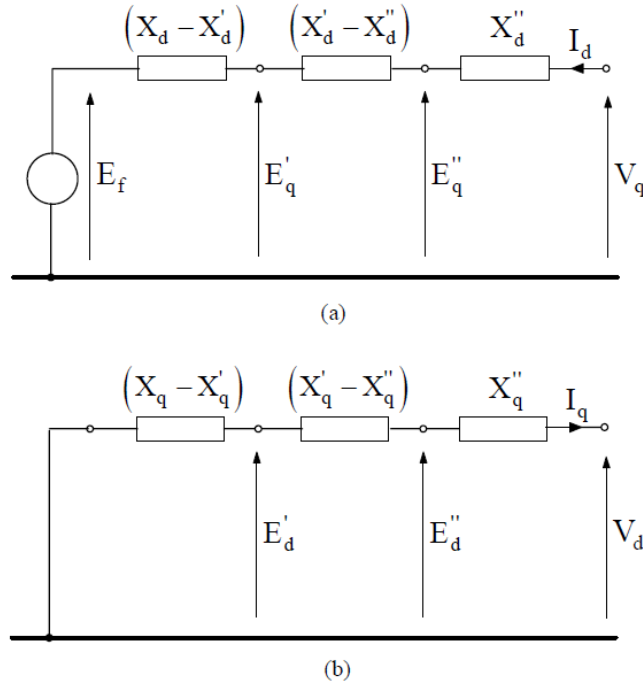
$$T_{q0}'' \dot{E}_d'' = E_d' - E_d'' + I_q(X_q' - X_q'') \quad (3.7)$$

$$T_{d0}' \dot{E}_q' = E_f - E_q' + I_d(X_d - X_d') \quad (3.8)$$

$$T_{q0}' \dot{E}_d' = -E_d' + I_q(X_q - X_q') \quad (3.9)$$

- V_d, V_q : generatör çıkış geriliminin d ve q bileşenleri
 R : generatör armatür (stator) sargı direnci
 I_d, I_q : armatür akımı d ve q eksen bileşenleri
 X_d, X_d', X_d'' : d eksen senkron, geçici hal ve geçici hal öncesi reaktansları
 X_q, X_q', X_q'' : q eksen senkron geçici hal ve geçici hal öncesi reaktansları
 E_q'' : geçici hal öncesi iç emk q bileşeni (q eksen damper sargısı ve q eksen çelik rotor gövdesindeki toplam akı ile orantılı)
 E_d'' : geçici hal öncesi iç emk d bileşeni (d eksen damper sargısı ve alan sargısındaki toplam akı ile orantılı)
 E_q' : geçici hal iç emk q eksen bileşeni (alan sargısı akısıyla orantılı)
 E_d' : yuvarlak rotorlu generatörde geçici hal iç emk d eksen bileşeni (çelik rotor gövdesi q eksen akısıyla orantılı)
 E_f : uyarım emk'sı (uyarım gerilimi V_f ile orantılı)
 T_{d0}', T_{d0}'' : açık devre d eksen geçici ve geçici hal öncesi zaman sabitleri
 T_{q0}', T_{q0}'' : açık devre q eksen geçici ve geçici hal öncesi zaman sabitleri

Şekil 3.3'de senkron generatöre ait eşdeğer devre diyagramları görülmektedir. (3.6), (3.7), (3.8) ve (3.9) ifadelerinin sağ tarafları bu eşdeğer devreler üzerinden Kirchhoff gerilim yasalarına göre çıkarılabilir.



Şekil 3.2: Rezistans ihmal edildiği durumda senkron generatör eşdeğer devreleri (a) d-ekseni (b) q-ekseni [17]

(3.6-9) ifadeleri rotor devresi akılarıyla bağlantılı olan emk'lardaki değişimi göstermektedir. Bunlara rotor açı ve hız değişimini içeren (3.10) ifadesi ilave edilmelidir.

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{M}(P_m - P_e - D\Delta\omega) \quad (3.10)$$

$$\Delta\omega = \omega - \omega_s = \frac{d\delta}{dt} \quad (3.11)$$

ω : generatörün açısal hızı [radyan]

ω_s : senkron açısal hız ($= 2\pi f$) [radyan]

$\Delta\omega$: rotor hız sapması [radyan]

δ : güç (rotor) açısı (sonsuz baraya göre)

M : eylemsizlik sabiti

P_m : generatör birincil hareketlendirici (türbin) tarafından sağlanan mekanik güç

P_e : elektromanyetik hava-aralığı gücü

D : sönüm katsayısı

(3.3) ve (3.4) diferansiyel denklemleri damper sargılarının etkisini içermektedir. Hareket denkleminde bulunan sönüm katsayısı, rüzgar etkisi ve sürtünme nedeniyle oluşan mekanik sönümlemeyi içerir. Bu da ihmal edilebilir ($D \approx 0$).

Generatör hava aralığı gücü ise (3.12) ifadesiyle hesaplanır. (3.12) denkleminde armatür gerilim değerlerinin yerine (3.13) ifadesi yazılırsa güç denkleminin başka bir ifadesi olan (3.14) elde edilmiş olur.

$$P_E = [V_d I_d + V_q I_q + (I_d^2 + I_q^2)R] \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d'' \\ E_q'' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & X_q'' \\ -X_d'' & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$P_e = (E_d'' I_d + E_q'' I_q) + (X_d'' - X_q'') I_d I_q \quad (3.14)$$

3.1.3.2. Model 5 – $(\dot{E}_d'', \dot{E}_q'', \dot{E}_q', \omega, \delta)$

Bu modelde q-ekseni üzerindeki rotor edi akımları ihmal edilerek $X_q' = X_q$ ve $E_d' = 0$ farzedilir. Böylece model 6'yı temsil eden denklem kümesindeki (3.8) ifadesi iptal edilir.

3.1.3.3. Model 4 – $(\dot{E}_d', \dot{E}_q', \omega, \delta)$

Bu modelde damper sargılarının etkisi ihmal edilerek (3.6) ve (3.7) denklemleri kaldırılır. Generatör, X_d' ve X_q' geçici hal reaktanslarının gerisindeki E_q' ve E_d' emk'ları ile temsil edilir. Böylece generatör denklemi (3.15) ifadesiyle gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & X_q' \\ -X_d' & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

(3.12) ifadesindeki E_q' ve E_d' emk'larındaki değişimler (3.8) ve (3.9) diferansiyel denklemleri ile hesaplanır. (3.16) ile verilen hava aralığı gücü ifadesinde denklemin ikinci kısmı geçici hal salınım gücünü verir.

$$P_e = (E_d' I_d + E_q' I_q) + (X_d' - X_q') I_d I_q \quad (3.16)$$

Bu basitleştirilmiş model elektromekanik dinamiklerin analizinde yeterli bir doğruluk sağlamaktadır [14]. Bu modelin en büyük dezavantajı ise sönüm katsayısının tam olarak değil, yaklaşık olarak hesaplanabilmesidir.

3.1.3.4. Model 3 – $(\dot{E}_q', \omega, \delta)$

Model 4'te d eksenini geçici hal emk'sı 'Ed'' sabit tutularak (3.9) denklemi iptal edilir. Bu modelde generatör yalnızca (3.6), (3.10) ve (3.11) ifadeleri ile tanımlanır. Damper sargılarının etkisi ihmal edilir. Ed' sabit kabul edilir. Rotor gövdesi ilave bir sargı ile gösterilse bile, rotor gövdesindeki edi akımları tarafından üretilen sönüm etkisi de ihmal edilir. Eğer q ekseninde rotor gövdesini temsil edecek bir sargı bulunmuyorsa $E_d'=0$ ve $X_q'=X_q$ olur. Böylece (3.16) ifadesi (3.17) ifadesine indirgenir.

$$P_e = E_q' I_q + (X_d' - X_q') I_d I_q \quad (3.17)$$

3.1.3.5. Model 2 – Klasik Model ($\dot{\omega}, \dot{\delta}$)

Senkron generatörün klasik modeli, güç sistem dinamiklerinin basitleştirilmiş analizinde yaygın olarak kullanılır. Geçici halde ne d-ekseni armatür akımı I_d , ne de iç emk E_f uyarım gerilim değişimini tam olarak temsil eder. Generatör, hareket denklemi (3.10-11) ve geçici hal reaktansı X_d' 'nin gerisindeki sabit emk E' ile temsil edilir.

Bu model (3.8) denklemi ile de açıklanabilir. Buradaki zaman sabiti T_{d0}' birkaç saniye mertebesinde ve bağıl olarak oldukça uzundur. E_f ve I_f deki değişimler oldukça küçük olduğundan E_q' 'de çok fazla bir değişim göstermeyecektir. Bu da E_q' nün yaklaşık olarak sabit alınabileceği anlamına gelir. E_d' 'de zaten sabit kabul ediliyordu. Böylece her iki geçicivhal emksı E' 'nın genliği ve rotora göre pozisyonuda sabit olarak kabul edilir. Rotor geçici hal salınımı ihmal edilirse ($X_q' = X_d'$) generatör iki eşdeğer devre yerine tek bir eşdeğer devre ile temsil edilebilir. Böylece ortaya sonsuz baraya bağlı bir generatör modeli çıkmış olur. Aynı şekilde (3.15) ifadesinden elde edilen cebrik ifadeler (3.18), tek bir denklem ile gösterilebilir (3.19).

$$I_t = I_q + jI_d \quad V_t = V_q + jV_d \quad E' = E_q' + E_d' \quad (3.18)$$

$$\bar{V}_t = (\bar{E}_q' + \bar{E}_d') - jX_d'(\bar{I}_q + j\bar{I}_d) = \bar{E}' - jX_d'\bar{I}_t \quad (3.19)$$

3.2. UYARTIM SİSTEMLERİ

Uyarım sistemleri genel olarak bir uyarıcı ve bir gerilim regülatöründen oluşur. Bir uyarım sisteminin ana görevi senkron generatöre DC alan akımı sağlamaktır.

Güç sistemleri açısından bakılırsa, uyarım sistemleri etkili bir gerilim kontrolü sağlamalı ve güç sisteminin kararlılığını arttırmalıdır. Geçici hal kararlılığını arttırmak için bozucu etkilere karşı hızlı cevap verebilme kabiliyeti olmalı ve küçük sinyal kararlılığını arttırmak için generatör alanını modüle etme yeteneğine sahip olmalıdır [2].

Uyarım sistemleri güç sistemlerinin performansının arttırılmasına sürekli olarak artan bir şekilde katkıda bulunmuşlardır. İlk uyarım sistemleri, generatör çıkışındaki istenen

gerilim ve reaktif güç dengesini sağlamak için manüel olarak kontrol edilmiştir. İlk zamanlar çok yavaş olan otomatik gerilim kontrolü temelde ikaz operatörünün rolünü üstlenmiştir. Küçük sinyal kararlılığını ve geçici hal kararlılığı arttırmak için 1920'li yıllarda sürekli ve hızlı çalışan regülatörler keşfedilmiştir. Uyarım sistemlerinin değiştirilmesine olan ilgi sayesinde, kısa sürede hızlı cevaba sahip uyarıcı ve regülatörler endüstriyel kazandırılmıştır. 1960'lı yıllarda uyarım sistemlerinin rolü artmıştır. 1960'ların başlarında alan gerilimi kontrolü ve sistemdeki salınımların sönümlenmesi için çıkış gerilimi hata sinyaline ilaveten yardımcı stabilize edici sinyallerin kullanılmasına başlanmıştır. Uyarım kontrolünün bu bölümü PSS olarak isimlendirilir. Modern uyarım sistemleri yüksek tavan gerilimleri sayesinde ani cevap verme kapasitesine sahiptir. Bu yüksek alan gücüne sahip uyarıcıların ve ilave stabilize edici sinyallerin kullanımı, tüm sistemin dinamik performansının arttırılmasına tam bir katkı sağlamıştır [2].

Uyarım sisteminin görevini tam olarak yerine getirilebilmesi için aşağıdaki performans gereksinimlerini sağlaması gerekmektedir; [2,6]

- Güç sisteminin kararlılığı için yeterli performansa karşılık gelen sistem tepkisine sahip olmalı
- Sınırlama ve koruma fonksiyonları generatörün ve diğer cihazların zarar görmelerini engelleyecek özellikte olmalı
- İşletmede esneklik sağlanması için gerekli özelliklere sahip olmalı
- İstenen güvenilirlik özelliklerine sahip olmalı ve gerekli dayanıklılık, dahili hata bulma ve yalıtım kapasitesine sahip olmalıdır.

IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) bünyesinde kurulan komiteler tarafından uyarım sistem modelleri üzerindeki standartlaşma çalışmaları 1960'ta başlamış ve ilk model setleri komite raporunda yayınlanmıştır [12]. Bu çalışma daha sonra genişletilerek pratik modeller geliştirilmiştir [13]. Bu raporlar da tekrar güncelleştirilerek yenilenmiştir [14].

3.2.1. Uyarım Sistemlerinin Çeşitleri

Uyarım sistemleri gelişen teknolojiyle birlikte değişmiştir ve son olarak uyarım gücünün primer kaynağına göre üç grupta sınıflandırılmıştır [13, 14].

- DC uyarım sistemleri; uyarım gücü kaynağı olarak komitatörlü bir doğru akım generatörü kullanırlar.
- AC uyarım sistemleri; senkron generatör alan sargısı için gerekli olan DC akımın üretilmesinde duran veya dönen doğrultuculu alternatör kullanırlar.
- Statik uyarım sistemleri; uyarım gücü kaynağı olarak transformatörleri veya yardımcı generatör sargıları ve doğrultucuları kullanırlar.

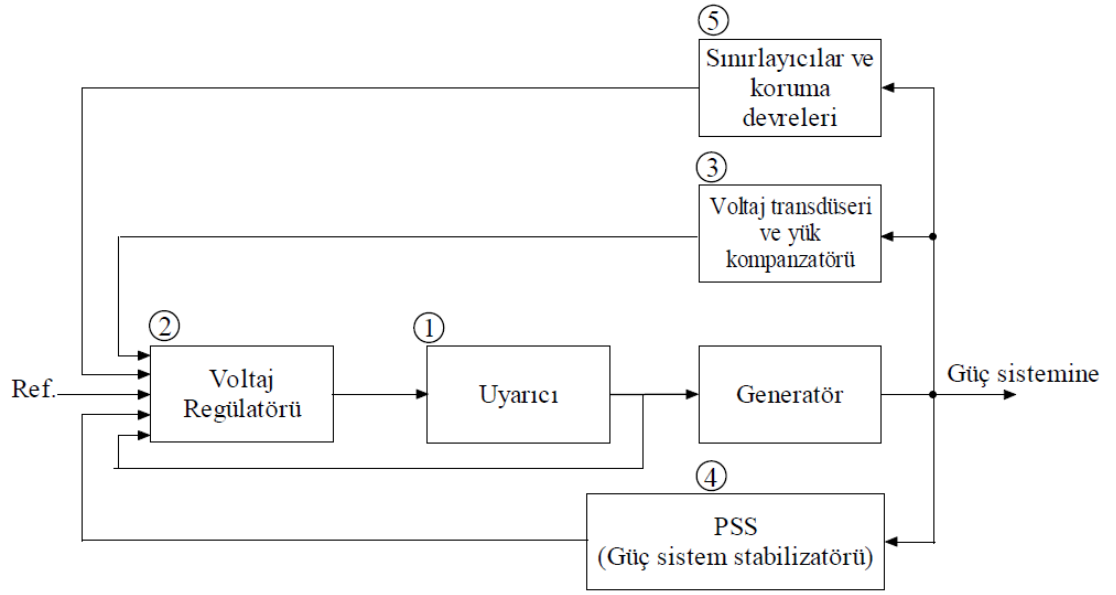
Birinci ve ikinci sıradaki AC ve DC tip uyarıcılar dönen uyarıcılar olarak isimlendirilebilir. Generatörle aynı şaft üzerindedirler ve ana kuvvet mili (şaft, prime mover) tarafından sürülürler. DC tip uyarım sistemlerinin çoğunda primer uyarım gücü, alan sargısı senkron makine rotoruyla aynı mil üzerine yerleştirilmiş bir DC generatörden sağlanır. DC generatör ana uyarıcı işlevi görür ve bir pilot uyarıcı ile de ayrıca uyarılır. AC ve statik tip uyarım sistemleri, faz kontrolü ile kontrol edilirler. Tristör içeren kontrollü doğrultuculardan oluşan, hızlı cevaba sahip elektronik regülatörler kullanırlar. Modern uyarım sistemlerinin çoğu AC dönen veya AC duran tiptedir [14].

Literatürde uyarım sistemi, uyarıcı, gerilim regülatörü ve yükseltici gibi kavramlar arasında bir kargaşa olabilmektedir. Gerilim regülatörü, uyarım sisteminin en büyük parçasıdır. Karşılaştırma ve yükseltici bloklarını, aynı zamanda geçici kazanç azaltım bloğu (TGR) ve/veya uyarım sistem stabilizatörü (ESS) 'nü de içerir. ESS ve/veya TGR, regülasyon ve kararlılık sağlayan alt sistemlerdir.

Uyarım sisteminin gerilim regülatörü dışında kalan kısmı, regülatörün çıkış işareti V_R ' yi işleyen ve uyarıcı tipine göre değişen bloklardan oluşur. DC, AC ve ST tipi olarak isimlendirilen uyarım sistemleri aynı isme sahip olan uyarıcıları da içermektedirler.

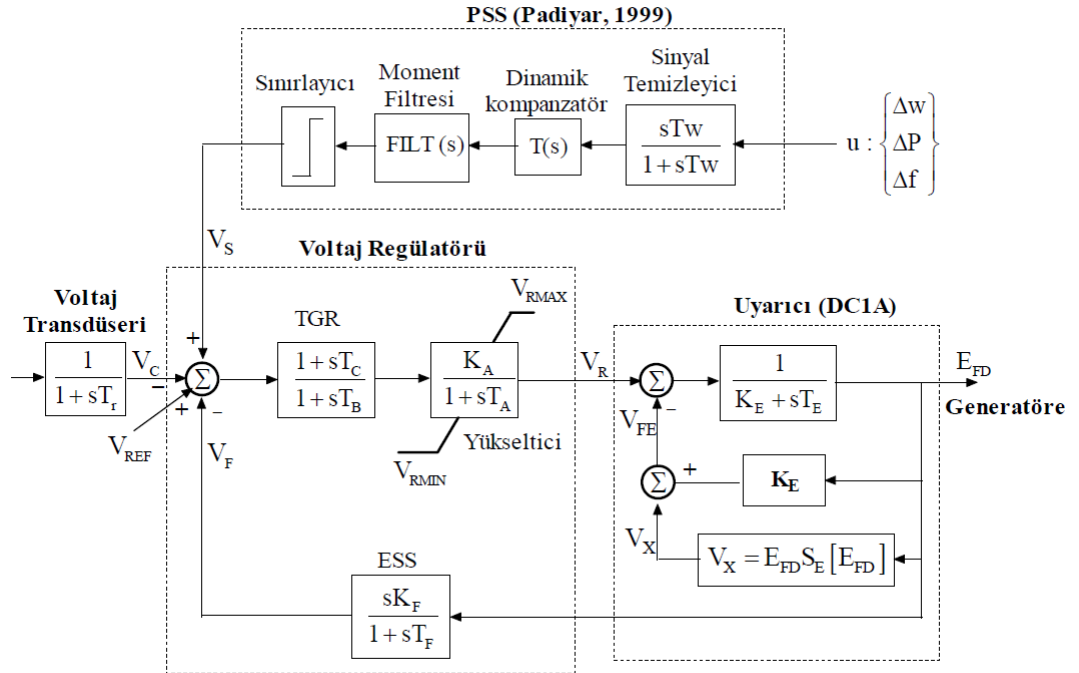
Uyarım sistemleri hakkında toplanan komitenin standart olarak belirlediği uyarım sistem modelleri her biri kendine özgü farklılıklar içermektedir. Yapılan bu tez çalışmasında uyarım sistem modeli olarak basitleştirilmiş model kullanıldığından burada bu ayrıntılara değinilmeyecektir.

Şekil 3.3'de büyük bir senkron generatöre ait tipik bir uyarım kontrol sistemi fonksiyonel blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.3: Uyarım kontrol sisteminin fonksiyonel blok diyagramı [2]

Şekil 3.4’de ise uyarım kontrol sistemi bileşenlerinin blok diyagramları gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Uyarım kontrol sisteminin tipik bir modeli

Şekil 3.4 deki uyarım kontrol sisteminde ana giriş, gerilim transdüserinin çıkışı olan ‘V_C’ dir. Toplam noktasında ‘V_C’ işareti ve stabilize edici sinyallerden ESS ’nin çıkış

işareti ' V_F ' çıkarılır, referans gerilim değeri ' V_{REF} ' ve PSS 'in çıkış işareti ' V_S ' ise toplanır.

V_F ve V_S işaretleri stabilize edici sinyallerdir. Kararlı hal durumunda bu iki stabilize edici sinyal sıfır değerini alır. Yani sadece $V_{ERR} = V_{REF} - V_C$ çıkış gerilim hata sinyali kalır. Sonuçta elde edilen sinyal regülatör tarafından yükseltilir. Gerilim regülatörü ile ilgili ana zaman sabiti ' T_A ', kazanç ise ' K_A ' dır. Regülatöre ait yükseltici üzerindeki sınırlayıcı doyma ve yükselticinin limitlerini tanımlar. ' T_B ' ve ' T_C ' ise regülatör içerisindeki TGR 'ye ait zaman sabitleridir. Gerilim regülatörü çıkışı V_R uyarıcıyı kontrol etmek için kullanılır. ' K_E ' uyarıcının kazancı olduğu gibi bu değere bağlı olarak DC uyarıcının kendinden veya bağımsız uyarmalı olduğu anlaşılır. ' T_E ' ise DC uyarıcının zaman sabitidir. Generatör alan gerilimi ' E_{fd} ' ile çarpılan ' V_X ' terimi uyartım gerilimindeki nonlineer fonksiyonu tanımlar. Uyartım geriliminden ' K_F ' kazancı ve ' T_F ' zaman sabiti yoluyla türetilen ' V_F ' sinyali de uyartım sisteminin kararlılığının artırılmasında kullanılır. Sonuç olarak gerilim hata sinyali ile gerekli alan gerilimi ' E_{fd} ' oluşturulmuş olur [17].

3.2.2. Uyarıcı

Senkron makinenin alan sargısına DC güç sağlar. Uyartım sisteminin güç kısmını oluşturur. DC, AC ve Statik tip olmak üzere genel olarak üç grupta incelenebilirler. Uyartım sistemleri uyarıcı tipine göre isimlendirildiğinden aynı şekilde gruplandırılmaktadır. Şekil 3.4 'de DC1A tipi bir uyarıcı modeli [14] gösterilmiştir.

3.2.3. Otomatik Gerilim Regülatörü (AVR)

Uyarmanın kontrolü için uygun şekil ve seviyede kontrol işaretlerini kuvvetlendirir ve işler. Bu hem regülasyonu hem de uyarma sistemi kararlı kılıcı fonksiyonu içerir.

3.2.4. Gerilim Transdüseri ve Yük Kompanzatörü

Generatör uç gerilimini hisseder doğrultur ve filtreler ve onu istenen uç gerilimini gösteren referans değerle karşılaştırır. Ek olarak, generator ucundan elektriksel olarak uzak bazı noktalarda gerilim sabit tutlmak istenirse, yük kompanzasyonu sağlanabilir. Bazen yük kompanzasyonu ile generatör içindeki veya dışındaki bir noktadakerilimi kontrol etmek için kullanılır.

3.2.5. Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (GSKK)

En ekonomik elektromekanik sönüm kontrolüdür. Generatörlerde elektromekanik osilasyonlarının sönümlenmesinde ve güç sistemlerinde kararlılığının artırılmasında yaygın olarak kullanılır.

Güç sistemi kararlı kılıcısı (Power System Stabilizator: PSS), güç sistem osilasyonlarının sönümlenmesi için, regülatöre ilave giriş sinyali sağlar. PSS'in giriş sinyali olarak rotor hız değişimi yaygın olarak kullanılır. Ayrıca bara frekansı, hızlandırıcı güç (mekanik giriş gücü ile elektriksel güç arasındaki fark) ve elektriksel güç pratikte kullanılan giriş sinyalleri arasındadır [15].

Güç sistemleri karmaşık nonlineer sistemlerdir ve sık sık yetersiz sönümlenme nedeniyle düşük frekanslı güç osilasyonları oluştururlar. Bazen de düşük frekans ve küçük genlikteki bu osilasyonlar uzun bir zaman periyodu için mevcuttur ve güç transfer kapasitesinde azalmaya sebep olurlar. Yüksek kazançlı AVR'ler, güç sistemi dinamik limitlerindeki artırıcı etkisine rağmen bazen de negatif bir sönümlenme etkisi gösterebilirler. Sonuç olarak özellikle büyük birleşik sistemlerde kararsızlığa neden olurlar. Bu problemin üstesinden gelebilmek için, uyarım sistemine yardımcı, stabilize edici bir sinyal ilave edilir. PSS 'ler bu ilave stabilize edici sinyali sağlarlar.

Şekil 3.4'de uyarım kontrol sistemi girişine yardımcı sinyal üreten bir sinyal temizleyici, moment filtresi, dinamik kompanzator ve sınırlayıcı bloklarından oluşan PSS 'e ait blok diyagram modeli görülmektedir.

Burada sinyal temizleme devresi PSS 'in giriş sinyalindeki DC bileşeni süzen bir yüksek geçiren filtredir. Bu kısmın eksikliği durumunda hızda meydana gelen kalıcı değişiklikler generatör çıkış gerilimini etkileyecektir.

Dinamik kompanzator ise (3.20) ifadesinde verildiği gibi iki adet faz ileri-faz geri kontrol bloğundan oluşmaktadır.

$$T(s) = \frac{K_{stab}(1 + sT_1)(1 + T_3)}{(1 + sT_2)(1 + sT_4)} \quad (3.20)$$

Burada 'Kstab' PSS kazancı, T1, T2, T3 ve T4 de zaman sabitleridir. Bu katsayılar moment sönümlenmesi sağlayabilmek için faz kompanzasyonu gereksinimlerine göre belirlenir. Fakat statik tipteki uyarıcılar için tek bir faz ileri faz geri (lead-lag) kontrol bloğu daha uygun olmaktadır.

PSS içerisindeki moment filtresi bloğu ise bir band söndüren filtredir. Bu filtrenin transfer fonksiyonu da (3.21) ifadesiyle verilmiştir.

$$FILT(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.21)$$

AVR işleyişine ters etki yapmasın diye PSS çıkışı negatif ve pozitif alt limitlerle sınırlandırılmalıdır. Bu işlem PSS modelinde çıkışa konulan bir sınırlayıcı blok ile gerçekleştirilir.

PSS'in temel fonksiyonu generatör rotor osilasyonlarına sönümlenme etkisi ilave etmektir. Bu da uyarıma ilave edilen stabilize edici 'V_s' sinyali ile sağlanır. Bu sinyal uyarım kontrol sisteminde gerilim hata sinyaline ilave edilir. PSS, sönümlenme sağlamak için rotor hız değişimine karşın bir elektriksel moment bileşeni üretmelidir. Pratikte generatör ve uyarıcının transfer fonksiyonlarının kazanç ve faz karakteristikleri frekansa bağlıdır. PSS 'in transfer fonksiyonu, uyarım girişi ve elektriksel moment arasındaki faz gecikmesini kompanze edecek uygun bir faz kompanzasyon devresi olmalıdır. Tam bir kompanzasyon sağlanabilmesi için ideal olarak PSS'in faz karakteristiği, uyarıcı ve generatörün faz karakteristiklerinin tam tersi özellikte olmalıdır. Böylece PSS tüm osilasyon frekanslarında sadece sönümlenme momenti üretir. Generatörler genellikle basitlik ve sadelik açısından amortisör sargıları ihmal edilerek modellenirler. Ancak amortisör sargıları generatörün faz karakteristiklerini önemli ölçüde etkilediğinden, PSS parametrelerinin hesabında mutlaka dikkate alınmalıdır [16].

Hızlı uyartım ve yüksek gerilim değişim aralığına sahip modern uyartım sistemlerinde, PSS kullanımıyla senkronlama momenti ve sistem geçici hal cevabı üzerinde negatif sönümlenme oluşmaktadır. Ancak buna rağmen sistem performansında önemli ölçüde bir artış sağlanmaktadır. PSS, hafif sönümlenme içeren sisteme, faz-ilerlemeli hız sinyali sayesinde ilave bir sönümlenme sağlamaktadır. Böylece uyartım sistemi ve uyartım sistem kontrolünün, rotor aı kararlılığı üzerinde önemli etkilere sahip olduğu görülmektedir. Modern yaklaşımlarda yüksek kazançlı ve hızlı cevaba sahip bir uyarıcı ve PSS kombinasyonu kullanılır. Hatta artık bu iki sistemi bir arada kullanmak iyi bir performans açısından zorunluluktur [17]. Bu şekilde hem geçici hal kararlılığın iyileştirilmesi sağlanmakta hem de küçük sinyal kararlılık karakteristikleri iyileştirilmektedir.

3.2.6 Sınırlayıcı ve Koruma Devreleri

Modern bir uyartım kontrol sistemi basit bir gerilim regülatöründen çok daha kapsamlı bir sistemdir. Performans gereksinimlerinin karşılanmasına yardımcı olan birçok kontrol, sınırlayıcı ve koruma fonksiyonları içerir. Herhangi bir uyartım sistemi, uyarıcının tipine ve kullanıldığı uygulama alanının gereksinimlerine göre, bu fonksiyonların tümünü veya bir kısmını içerebilir. Kontrol fonksiyonları, özel değerleri istenen seviye için regüle ederler. Sınırlama fonksiyonları ise değerlerin belirli sınırları (kapasite limitleri vs.) aşmalarını önlerler. Herhangi bir sınırlayıcı arızalanırsa, koruma fonksiyonları uygun bileşen veya üniteleri devreden çıkarırlar [2].

Uyarıcı ve senkron generatör pek çok koruma ve kontrol fonksiyonları içerirler. Yaygın olarak kullanılan fonksiyonlar; alan akımı sınırlayıcı, maksimum uyartım sınırlayıcı, çıkış gerilimi sınırlayıcı, V/Hz sınırlayıcı ve uyartım alt limit sınırlayıcıdır. Devrelerine ve çıkış sinyallerine göre farklılık gösterirler. Uyartım sistemlerinin farklı bölgelerine toplam sinyal veya tek sinyal olarak uygulanırlar. Kolaylık açısından gruplandırılarak şekil 3.3’de tek bir blok olarak gösterilmişlerdir.

Bu devreler normal şartlar altında herhangi bir faaliyet göstermezler. Ayrıca bunlar geçici hal ve küçük sinyal kararlılığı çalışmalarında genellikle modellenmezler. Uzun dönem kararlılığı ve gerilim kararlılığı çalışmalarında önemlidirler. Pratikte bu sınırlama fonksiyonlarının uygulamaları cihazın üreticisine, markasına, modeline ve

kullanım şartlarına göre değişim gösterir. Bundan dolayı bu sınırlayıcı modelleri temel şartlara göre belirlenmelidir. Bu yüzden Şekil 3.4’de sınırlayıcıların modelleri gösterilmemiştir [2].

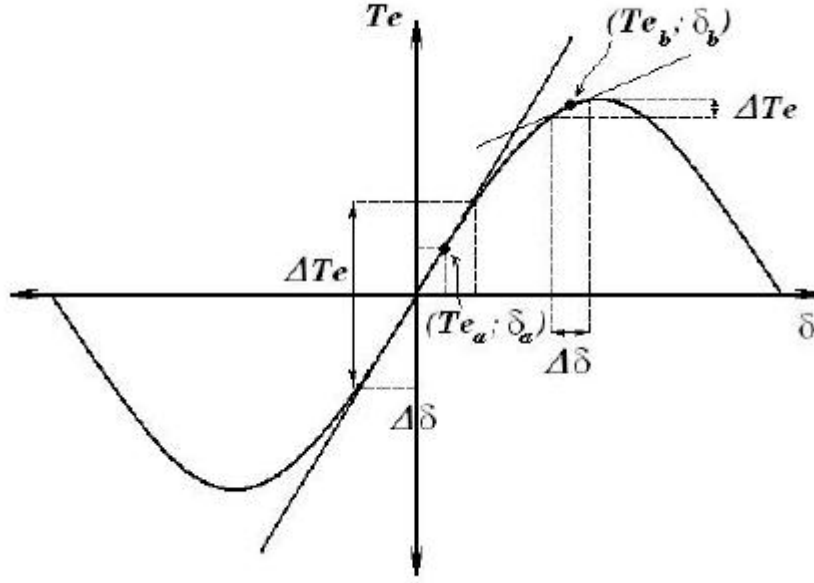
3.3. BENZETİMDE KULLANILAN SENKRON GENERATÖRÜN MODELLENMESİ

Güç sistemi ve buna ait alt sistemler nonlinear sistemlerdir. Aslında en basit Şekilde ifade edilen tek makine sonsuz güçlü bara (SMIB) sistemde nonlinear bir sistemdir. Bu yüzden her çalışma durumu için sistem cevabı farklı olduğu gibi bir çalışma durumunda uygulanan farklı bozucu etkiler karşısında da sistem cevabı farklı olacaktır. Sistemdeki nonlinearliğin ihmal edilmediği durumdaki güç sistem kararlılığına geçici hal kararlılığı adı verilir. Buna karşın hata minimize edilecek Şekilde sistem cevabı tahmin edilerek sistemdeki nonlinear karakteristiklerin ihmal edildiği durumdaki güç sistem kararlılığına ise küçük sinyal kararlılığı denir. Küçük sinyal kararlılığı, kapsam olarak küçük bozucu etkiler sonrasında sistemin senkronizmada kalma kabiliyetini içerir [3].

Bozucu etkinin küçüklüğünün derecesi sistemin nonlinearlik derecesine ve çalışma durumuna göre tanımlanır. Fakat lineerize edilmiş bir sistem için bozucu etkinin yeterince küçük olup olmadığı konusunda kesin bir cevap yoktur. Bunun tahmini için ustalık ve tecrübe gerekmektedir. Kesin emin olabilmek için de linerizasyon yapılmış detaylı model ile nonlinear olan detaylı model arasında karşılaştırma yapılması gerekir.

Pratik olarak, bir güç sisteminde ayarlı transformatörlerden, yük ve üretimdeki değişmelerden kaynaklanan küçük bozucu etkiler düşünöldüğünde küçük sinyal kararlılığı oldukça önemlidir.

Generatör elektriksel çıkış momenti ve yük açısı arasındaki ilişki düşünölrse lineer analizin geçerli olabileceği koşullar belirlenebilir. Şekil 3.5’de gösterilen üretilen elektriksel çıkış momenti ve yük açısı arasındaki nonlinear ilişki tek makineli sistemin bir alt modelini temsil eder.



Şekil 3.5: Generatörün elektriksek çıkış momenti-açı ilişkisi [3]

Bu nonlinear altsistem $Te - \delta$ eğrisinin tanjantı şeklinde (Te_a, δ_a) çalışma noktasında lineerize edilmiş bir model ile gösterilebilir. Çalışma durumuna bağlı olarak ΔTe ve/veya $\Delta \delta$ aralığı makul bir yaklaşımdır. Her çalışma noktası (Te_i, δ_i) için farklı bir lineer yaklaşım (tanjant) bulunmaktadır. Buradan nonlinear bir modelden lineerize edilmiş bir modelin nasıl oluşturulabileceği gösterilebilir. Belirlenen bir çalışma noktasındaki nonlinear fonksiyonun eğimi (tanjantı) lineerize edilmiş modeldir. Böylece fonksiyonun eğimi için genel bir ifade çıkarılmalı ve her çalışma noktasında bu eğim hesaplanmalıdır. Nonlinear bir modelin herhangi bir δ açısı için matematiksel ifadesi (3.18) ile ve lineer yaklaşımı da (3.19) ifadesiyle verilmiştir.

$$Te = T_{\max} \sin \delta \quad (3.22)$$

$$\frac{dTe}{d\delta} = T_{\max} \cos \delta \quad (3.23)$$

(3.24) eşitliğine göre δ_a yük açısı değerindeki lineer model ifadesi (3.25) ifadesi şeklinde yazılabilir.

$$\frac{\Delta Te}{\Delta \delta} \approx \frac{dTe}{d\delta} \quad (3.24)$$

(3.25)

$$\Delta Te = \left[\frac{dT_e}{d\delta} \right]_{\delta_a} \Delta\delta \approx [T_{max} \cos \delta_a] \Delta\delta$$

Burada $\Delta Te = Te - Te_a$; elektriksel moment değişimi, $\Delta\delta = \delta - \delta_a$; yük açısı değişimi, $\left. \frac{dT_e}{d\delta} \right|_{\delta_a}$ ise (Te_a, δ_a) alışma noktasındaki tanjant yani eğimdir. Belirli bir çalışma noktasında tanjantı bulmak için genelleştirilmiş denklemini hesaplamak, bu çalışma noktası için lineer modelin katsayılarını hesaplamak demektir. Bu hesaplanan katsayılar, çalışma noktası civarında küçük bozucu etkilere karşı gerçek sistem davranışının nasıl olacağı hakkında bilgi verir.

Sistemin ΔTe ve $\Delta\delta$ civarındaki küçük bozucu etkilere karşı cevabı hakkında tahmini bilgi edinebilmek amacıyla, lineerize edilmiş modelin (Te_a, δ_a) noktası için hesaplanan katsayılar diğer bir çalışma noktası (Te_b, δ_b) için kullanılamaz. Farklı eğimler farklı küçük sinyal karakteristiklerini tanımlamaktadır.

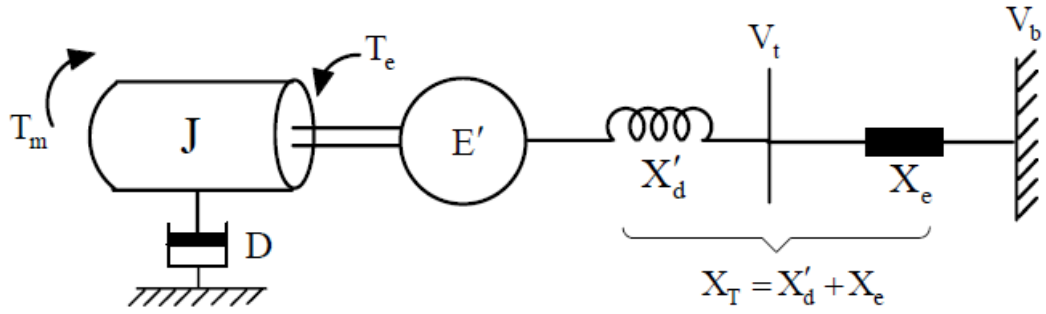
Genel olarak birçok değişkene sahip nonlinear denklemlerden oluşan modeller lineerize edildiğinde oluşan lineer model pek çok katsayıya sahip olacaktır. Ve bu da durum uzay matrisi şeklinde düzenlenebilir. Bu katsayıları içeren matrislerin yorumuna dayanan birçok güçlü lineer sistem analiz teknikleri mevcuttur. Bunların en önemlilerinden birisi de sistemin özdeğerleridir. Detaylı (yüksek dereceli) bir sistem birçok sayıda zdeğer içerebilir. Bu zdeğerler, kompleks bir düzlem $(\sigma, j\omega)$ üzerinde gösterilebilirler. Kompleks düzlem üzerindeki özdeğerlerin tip ve pozisyonları sistemin küçük sinyal karakteristikleri hakkında özel detaylar sunar. Her bir zdeğer veya kompleks konjuge zdeğer çifti sistemin küçük sinyal cevabının bir modu hakkında bilgi verir. Pratik olarak birçok sayıda özdeğere sahip olan sistemin zaman cevabı da bu küçük sinyal modlarının bir kombinasyonu olacaktır.

Enerji iletim sistemine bağlı bir senkron makinenin küçük sinyal karakteristiklerini veya küçük sinyal kararlılığını etkileyen faktörleri incelemek için sistem modelleri üzerine lineerizasyon teknikleri uygulanmalıdır. Lineerize edilen modelin katsayıları da zdeğer vs. gibi yöntemlerle yorumlanmalıdır. Basitlik açısından genellikle tek makine sonuz

bara (SMIB) sistemi üzerinde inceleme yapılmaktadır. Uygulamalarda enerji iletim hattının rezistansı genellikle ihmal edilir ve hat tümüyle reaktif olarak düşünülür.

3.3.1 Klasik Model (Hareket Denklemi Modeli)

Geçici hal kararlılığı için de kullanılan bu model basit bir kullanıma sahip olduğundan lineerizasyon ve analiz işlemleri hakkında temel bir fikir vermek amacıyla kullanılmaktadır. Hareket denklemi modeli olarak da isimlendirilen bu modelde makine sabit bir gerilim E' ve sabit bir reaktansla X_d' temsil edilmektedir. Şekil 4.5 'de gösterilen sisteme ait denklemler (4.39) ve (4.40) ifadeleriyle verilmiştir [3].



Şekil 3.6: Sonsuz baraya X_e reaktansı üzerinden bağlı senkron generatör [3]

$$T_e = \frac{E'V_b}{X_T} \sin\delta \quad (3.26)$$

$$J \frac{d^2\delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} + T_e = T_m \quad (3.27)$$

$d\delta/dt = \Delta\omega$ ifadesi (3.27) eşitliğinde yerine koyulursa (3.28) ifadesi elde edilir.

$$J \frac{d}{dt} \Delta\omega + D \Delta\omega + T_e - T_m = 0 \quad (3.28)$$

Böylece (3.27) ifadesiyle gösterilen ikinci derece diferansiyel denklemini, (3.29 ve 3.30) ifadeleriyle gösterilen iki birinci derece denklemlerle ifade etmiş oluruz.

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega = \frac{1}{J} (T_m - T_e - D\Delta\omega) \quad (3.29)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (3.30)$$

Artık dinamik modele ait denklemler (3.22), (3.25) ve (3.26) olmuştur. Bu modeldeki tek nonlineer ifade (3.22) eşitliğidir. Bu eşitliğin ' $\delta=\delta_0$ ' çalışma noktasındaki lineerizasyonu (3.27) ifadesiyle gösterilmiştir. Lineerize edilmiş ifadedeki eğimi temsil eden kısım "senkronlama moment katsayısı" olarak isimlendirilir. Bu ifade de (3.28)'de gösterilmiştir.

$$T_e = \left[\frac{E'V_b}{X_T} \cos\delta_0 \right] \Delta\delta \quad (3.31)$$

$$K_S = \frac{E'V_b}{X_T} \cos\delta_0 \quad (3.32)$$

(3.29) eşitliğinde T_m yerine ΔT_m kullanılırsa verilen çalışma noktası civarındaki küçük değişimler için lineer modele ait sistem dinamikleri (3.33) ve (3.34) denklemleri gibi ifade edilebilir.

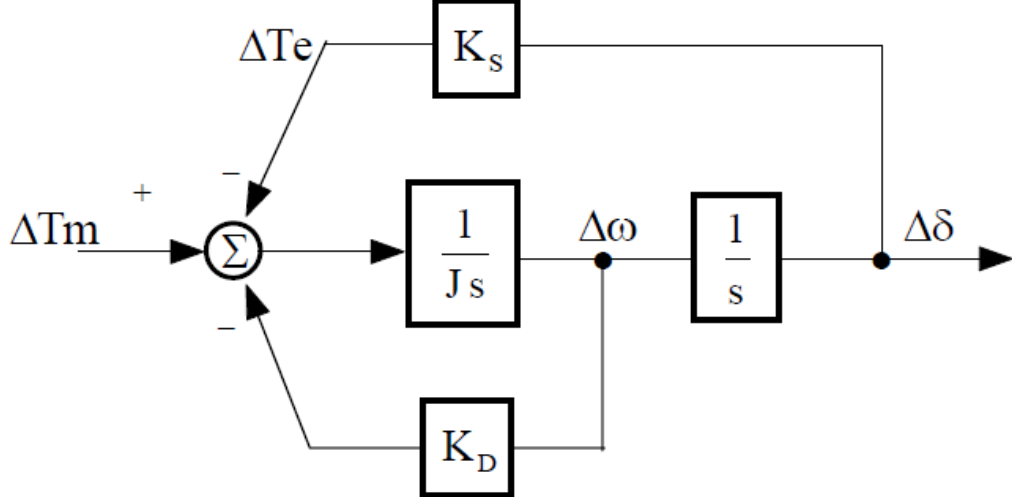
$$\frac{d}{dt} \Delta\omega = \frac{1}{J} (\Delta T_m - K_S \Delta\delta - K_D \Delta\omega) \quad (3.33)$$

$$\frac{D}{dt} \Delta\delta = \Delta\omega \quad (3.34)$$

(3.33) eşitliğinde (3.34) eşitliğinden farklı olarak kullanılan " $K_D = D$ " sönümlenme momenti katsayısı, " K_S " ise senkronlama momenti katsayısıdır. Bu denklemler " $dx(t)/dt = Ax(t) + Bu(t)$ " gibi durum uzay matrisi formunda düzenlenirse (3.35) eşitliği elde edilir. Bu eşitliğin blok diyagram olarak gösterimi ise şekil 3.7'deki gibidir.

(3.35)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{J} & -\frac{K_S}{J} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m$$



Şekil 3.7: Senkron generatörde mekanik güç-açı değişimi blok diyagramı [3]

Sisteme mekanik moment değişimi yoluyla bir bozucu etki uygulanırsa ($\Delta T_m \geq 0$) iki çeşitli moment ortaya çıkar.

- Yük açısı değişimi “ $\Delta\delta$ ” ile ortaya çıkan zıt moment (K_S bloğu çıkışı)
- Açısal hız değişimi “ $\Delta\omega$ ” ile ortaya çıkan zıt moment (K_D bloğu çıkışı)

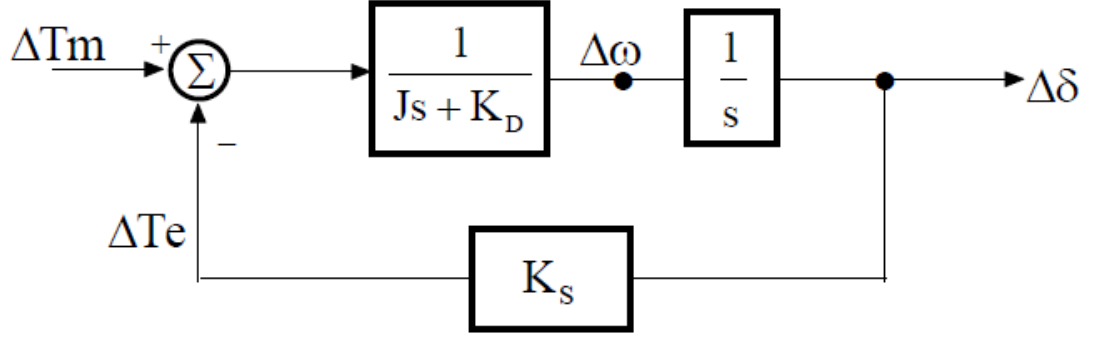
Bunlardan senkronlama momenti olarak isimlendirilen ilki, enerji dönüşümünü (mekanik enerjiden elektrik enerjisine) temsil eden bir momenttir ve yok edilemez özelliğe sahiptir. Mekanik güçte pozitif yönde bir değişim olduğunda, oluşan fazlalık mekanik güç artışı generatör tarafından elektrik enerjisine dönüştürülür ve böylece senkronizasyon korunmuş olur. Senkron makine “ ΔT_m ” mekanik moment artışını yeterli senkronlama momenti ile karşılayamaz duruma gelirse senkronizasyon kaybına uğrar. Mekanik giriş momentinde oluşan artış nedeniyle generatör shaftı hızlanmaya başlar. Senkronlama momenti oluşturma kabiliyeti kararlılık için çok önemlidir.

Sönümlenme momenti olarak isimlendirilen ikinci tip moment ise enerji kaybını (kayıp momenti) temsil eder. Rotor osilasyonları neticesinde oluşur ve zamana göre azalış gösterir. Bu osilasyonlar $\Delta\delta$ ve $\Delta\omega$ de oluşan osilasyonlardır. Şekil 3.7’de gösterilen hareket denklemi modelinde elektrikselsel çıkış momenti tümüyle senkronlama momenti

olarak gösterilmiştir. Sönümlenme momentinin tek kaynağı olarak da mekanik şaft sistemindeki kayıp moment (3.36) ifadesiyle gösterilmiştir.

$$\Delta T_L = K_D \Delta \omega \quad (3.36)$$

Şekil 3.6'daki blok diyagram gösterimi şekil 3.7'deki gibi basitleştirilebilir.



Şekil 3.8: Senkron generatörde mekanik güç-açı değişimi blok diyagramı [3]

Blok diyagramdan (3.37), (3.38) ve (3.39) eşitlikleri çıkartılabilir. (3.38) ve (3.39) eşitlikleri belirli bir çalışma durumu için sistemin küçük bir bozucu etkiye karşı cevabında meydana gelen osilasyonların doğal frekansını ve sönümlenme katsayısını göstermektedir. Bu sonuçlar (3.35) eşitliğinde verilen A matrisinin özdeğerlerinden de elde edilebilir.

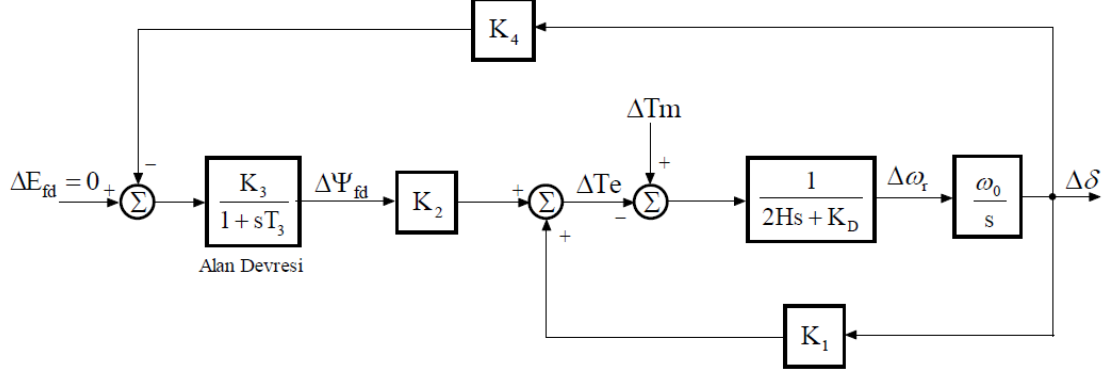
$$\frac{\Delta \delta}{\Delta T_m} = \frac{\frac{1}{s(Js + K_D)}}{1 + \frac{K_S}{s(Js + K_D)}} = \frac{1}{Js^2 + K_D s + K_S} = \frac{\frac{1}{J}}{s^2 + \frac{K_D}{J}s + \frac{K_S}{J}} \quad (3.37)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_S}{J}} \quad (3.38)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \times \frac{K_D}{\sqrt{J K_S}} \quad (3.39)$$

3.3.2. Geçici Hal Reaktansı Arkasındaki Değişken Gerilim Modeli-AVR siz

Nonlinear hareket denklemi modeline alan devresi dinamikleri eklenerek lineerize edilirse şekil 3.8’de görülen küçük sinyal modeli elde edilir [3]



Şekil 3.9: Geçici hal reaktansı arkasındaki değişken gerilim modeli (AVR’siz) [3]

Lineerize edilmiş model üzerindeki katsayılarına ait ifadeler aşağıda verilmiştir.

$$K_1 = \frac{E_{q0}V_b}{X_q T} \cos\delta_0 + \frac{X_q - X'_d}{X'_d} i_{q0} V_b \sin\delta_0 \quad (3.40)$$

$$K_2 = \frac{V_b \sin\delta_0}{X'_{dT}} \quad (3.41)$$

$$K_3 = \frac{X'_{dT}}{X_{dT}} \quad (3.42)$$

$$K_4 = \frac{X_d - X'_d}{X'_{dT}} V_b \sin\delta_0 \quad (3.43)$$

$$T_3 = K_3 T'_{d0} \quad (3.44)$$

Bu denklemlerde kullanılan bazı reaktansların açılımları (3.45) de verildiği gibidir.

$$X_{dT} = X_d + X_e$$

$$X'_{dT} = X'_d + X_e \quad (3.45)$$

$$X_{qT} = X_q + X_e$$

Bu denklemlerle tanımlanan model senkron makineye ait lineer Heffron-Phillips modelinin temelidir. Sistem kararlılığına uyartım kontrolü etkisinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılır.

K1: Senkronlama moment katsayısıdır. Önceden de görüldüğü gibi çalışma durumuna bağlıdır. Fakat buradaki özel durum nedeniyle relüktans (manyetik direnç) moment bileşeni de vardır.

K2: Alan akımı değişimi ile elektriksel moment değişiminin ilişkisini belirten bir katsayıdır. Bu katsayının çalışma durumuna bağlı olarak olduğu açıkça görülmektedir.

K3 (empedans faktörü parametresi) ve T3 (yükü durumdaki alan zaman sabiti); birlikte bozucu etki-alan akı değişimi ilişkisini belirleyerek dinamik cevabı etkilerler. Çalışma durumundan bağımsız olmalarına karşın, alan akı değişiminin hızını tayin ettikleri için makine için oldukça önemli parametrelerdir.

K4: Yük açısı değişimi ve K3 yoluyla alan akı değişimi arasındaki bağlantıyı yapan katsayıdır. Makinede çok etkili bir katsayıdır. Armatür reaksiyonunun demanyetizasyon etkisini temsil eder.

Yük açısını arttırmak (pozitif bir $\Delta\delta$ değişim) stator ve rotor akıları arasındaki karşıtlığın zıt yönde artmasına neden olur. Bu akı değişimi de rotor alanında bir değişiklik meydana getirir. Faraday yasasına göre akı değişimi, endüklenen emk'ya eşit olduğundan, buradan iki önemli sonuç ortaya çıkar.

- Yük açısı değişiminin “ $\Delta\delta$ ” büyük olması, rotor akı değişiminin de büyük olması sonucunu doğurur. Bu da sönümlemede önemli bir etkiye sahip olan alan gerilimi ve alan akımlarının büyük olmasını sağlar.
- Rotor açısında oluşan değişimin sonucu olarak alanın mıknatıslığı gider yani demanyetizasyon oluşur. Demanyetizasyonun etkisi ile üretilen zıt moment azalır. Bu faydalı bir etkidir. Açık değişimi nedeniyle oluşan bu küçük

demanyetizasyon nedeniyle, senkronlama momenti, alan akısının sabit kaldığı farzedilen duruma göre bir miktar azalır.

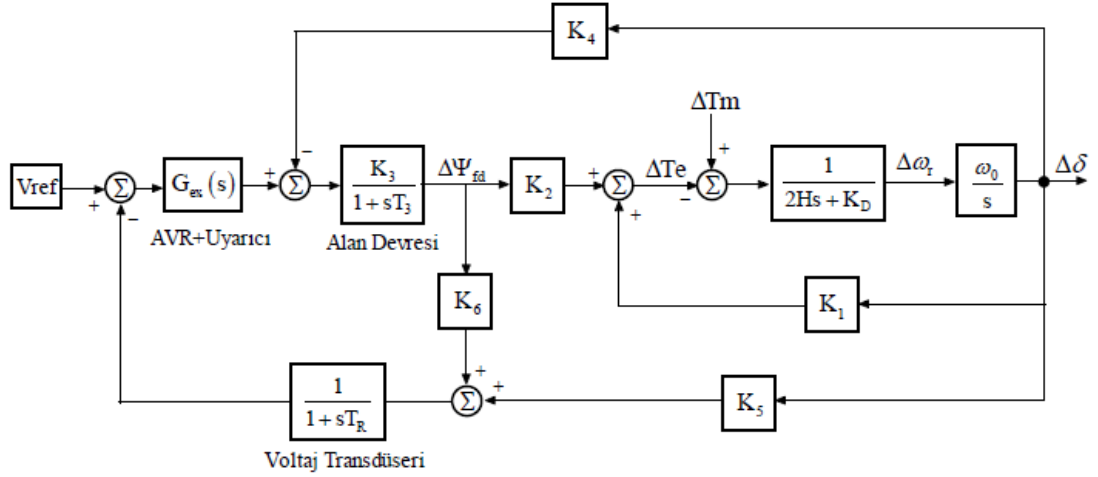
Lineer modele ait tanımlanan bu denklemler ile bu şekilde teorik düşünceler ortaya konmasına karşın, modele ait denklemlere fiziksel açıdan bakmak çok daha faydalı olacaktır. Şekil 3.8 'de görülen sistem bir bozucu etkiye maruz kalırsa yani mekanik giriş momentine küçük bir ΔT_m artışı uygulandığında ne olacağı gözlemlendiğinde, makinede iki yol üzerinden stabilize edici elektriksel karşıt momentlerin üretildiği görülür.

- K1 bloğunun çıkışı, tamamıyla senkronlama momentidir. Ve bu momentin genliği çalışma durumuna bağlıdır.
- K2 bloğunun çıkışı ise, senkronlama ve sönümlenme momenti bileşenlerinden oluşur. Bu iki bileşen de çalışma durumuna bağlıdır.

Bölüm 3.3.2'de SMIB sistemi; elektriksel dinamiklerin hesaba katılmadığı klasik model olarak tanıtılmıştır. Bölüm 3.3.3'de ise SMIB sistemi; alan devresi dinamiklerinin hesaba katıldığı geçici hal reaktansı arkasındaki değişken gerilim modeli olarak tanıtılmıştır.

3.3.3. Geçici Hal Reaktansı Arkasındaki Değişken Gerilim Modeli-AVR ile

Alan devresi dinamiklerinin de temsil edildiği önceki modele, gerilim regülatörü kontrolleri ve uyarıcı modeli de ilave edilir ve lineerizasyon işlemi yapılırsa yeni bir lineer model elde edilir. Bu model hem rotor osilasyonlarının, hem de harici uyartım kontrollerinin alan akı değişimleri ve kararlılık üzerindeki etkilerinin incelenmesine olanak vermektedir. Bu modelin oluşması için öncelikle şekil 4.8 'de gösterilen AVR 'siz modele çıkış gerilim değişimi ' ΔE_{fd} ' dahil edilmelidir. Bu aslında geçici hal reaktansı gerisindeki değişken gerilim modelinin bir parçasıdır. Basitlik açısından AVR 'siz modelden çıkarılmıştır. Ancak sisteme AVR eklendiği zaman çıkış gerilim değişiminin model üzerinde gösterilmesi zorunlu hale gelir. Çünkü AVR generatör çıkış gerilimini geri besleme sinyali olarak kullanmaktadır (Şekil 3.10) [3].



Şekil 3.10: Geçici hal reaktansı arkasındaki değişken gerilim modeli (AVR'li) [3]

Burada yapılan modeli değiştirmek değil modele harici kontrolörler ilave etmektir. Uyarıcı da bu kontrolörlerden birisidir. Modelde DC, AC ve statik tip uyarıcılar kullanılabilir. Fakat birçok modelde uyarıcının basit gösterimleri kullanılmaktadır. Aşağıda sıklıkla kullanılan basitleştirilmiş uyarıcı tipine iki örnek verilmiştir.

$$G_{ex}(s) = K_A \quad (3.46)$$

$$G_{ex}(s) = \frac{K_a}{1 + sT_a} \quad (3.47)$$

Diğer modele ilave olarak kullanılan K_5 ve K_6 katsayıları da (4.44) ve (4.45) ifadeleriyle tanımlanmıştır.

$$K_5 = \frac{X_q}{X_{qT}} \frac{V_{d0}}{V_{t0}} V_b \cos \delta_0 - \frac{X'_d}{X'_{dT}} \frac{V_{q0}}{V_{t0}} V_b \sin \delta_0 \quad (3.48)$$

$$K_6 = \frac{X_e}{X'_{dt}} \frac{V_{q0}}{V_{t0}} \quad (3.49)$$

Karmaşık olan bu model üzerinde yapılabilen simülasyon çalışmaları ile AVR'nin etkisinin detaylı olarak incelenmesi mümkündür. Blok diyagram üzerinde yapılan simülasyonlar, kavramların anlaşılması açısından kolaylık sağlamaktadır. AVR eklenmesi nedeniyle artık alan akı değişimleri hem armatür reaksiyonu hem de alan

gerilim değişimleri nedeniyle oluşmaktadır. K5 ve K6 ifadeleri AVR performansının çalışma şartlarına göre deęiőeceğini göstermektedir. Bundan dolayı AVR'nin ayarlanmasına ihtiyaç vardır. AVR etkisiyle hem senkronlama hem de sönümlenme momentlerinde oluşacak değişim açıkça görülmektedir. Ne tür değişimlerin olacağı, denklemlerin analizi ve simülasyon çalışmaları ile görülebilir [2].

AVR'nin etkisiyle senkronlama momenti artar sönümlenme momenti ise azalır. Sönümlenme momenti negatif olduğunda, osilasyon modu kompleks düzlemin sağ tarafına kayar. Bu da sistem kararlılığını olumsuz yönde etkiler. Bu problemin çözümü için bir güç sistem stabilizatörünün kullanılması önerilmektedir [3].

3.4. SÜRÜ ZEKASI

Sürü terimi kollektif davranış sergileyen balık, kuş kümeleri, karınca, termit ve arı kolonileri gibi hayvan ve böcek toplulukları için kullanılmaktadır. Uzun zaman önce, insanlar doğada bulunan hayvan ve böcek sürülerinin davranışlarını keşfettiler. Kuş sürülerinin havada süzülmesi ve farklı şekil alması, bal arılarının yiyeceklerini saklaması, balı getirmesi ve dağıtması, karıncaların yiyecek araştırması, balık sürülerinin beraberce yüzmesi ve kaçışması bu sürü davranışlarından sadece birkaçıdır. Son yıllarda ise biyologlar ve bilgisayar uzmanları “Yapay Yaşam” alanı kapsamı altında bu sürülerin davranışlarının nasıl modellenebileceği ve aralarındaki iletişimin mantığını üzerinde çalışmalar yapmaktadırlar. Üstelik “Sürü zekası” (Swarm Intelligence) adı verilen bu yaklaşımların optimizasyon problemleri, robotbilim ve askeri uygulamalarda başarılar göstermeleri bu konu üzerindeki çalışmaları arttırmıştır.

Sürü zekası, özerk yapıdaki basit bireyler grubunun kollektif bir zeka geliştirmesidir[18]. Bu ise “Stigmergy”, yani "ortam"daki etmenlerin ortama müdahale ederek iletişim kurmaları ve birbirlerinin hareketlerini düzenlemeleri, ve “Self-Organization” (Kendinden organizasyon) denen iki mekanizma üzerine kuruludur. Stigmergy vasıtasıyla iletişim, bireyler yaptıkları işlerle ortamda değişikliğe sebep olarak, sağlanırken, kendinden organizasyon yardımıyla önceden yapılmış herhangi bir plan olmadan sonuç üretebilmelerini, esnek ve sağlam, merkezi bir yönetim birimi olmadan yapılanmalarını sağlar.

Sürülerin bu özelliklerini ve yaptıkları işleri (Yem bulma, taşımada yardımlaşma, kolektif kümelenme gibi) klasik yapay zeka kavramına yeni bir soluk getirmiştir. Klasik yapay zeka kavramında bulunan insan zekası modelleme odaklı, karmaşık, merkezî, planlı yaklaşımların aksine, sürü zekası basit yapılı, özerk, önceden planlama yapmayan dağınık ajanların kompleks problemlerin çözümünde başarılı olduklarını göstermiştir.

3.5. YAPAY ARI KOLONİSİ (ARTIFICIAL BEE COLONY, ABC) ALGORİTMASI

3.5.1. Gerçek Arıların Yiyecek Arama Davranışları

Gerçek bir kolonide yapılacak işler o iş için özelleşmiş arılar tarafından yapılır. Yani, yapılacak işlere arılar arasında bir iş bölümü vardır ve herhangi bir merkezi otorite olmadan bu iş dağılımını gerçekleştirdikleri için kendi kendilerine organize olabilmektedirler. İş bölümü yapabilme ve kendi kendine organize sürü zekasının iki önemli bileşenidir. Tereshko'nun reaktif difüzyon denklemlerine dayalı olarak önerdiği kollektif zekanın ortaya çıkmasını sağlayan minimal yiyecek arama modelinde temel üç bileşen vardır: yiyecek kaynakları, görevi belirli işçi arılar ve görevi belirsiz işçi arılar. Bu minimal model iki durumda çalışmaktadır: bir yiyecek kaynağına yönelme ve kaynağı bırakma[19]. Bileşenler şu şekilde açıklanabilir.

i) Yiyecek Kaynakları: Arıların nektar, polen veya bal elde etmek için gittikleri kaynaklardır. Bir yiyecek kaynağının değeri, çeşidi, yuvaya yakınlığı, nektar konsantrasyonu veya nektarın çıkarılmasının kolaylığı gibi birçok faktöre bağlı olmasına rağmen basitlik açısından sadece kaynağın zenginliği tek bir kriter olarak alınabilir.

ii) Görevi Belirli İşçi Arılar: İşçi arılar, daha önceden keşfedilen belli kaynaklara ait nektarın kovana getirilmesinden sorumludurlar. İşçi arılar aynı zamanda ziyaret ettikleri kaynağın kalitesi ve yeriyle ilgili bilgiyi kovanda bekleyen diğer arılarla paylaşırlar. Bundan sonra görevi belirli işçi arılar için görevli arılar ifadesi kullanılacaktır.

iii) Görevi Belirsiz Arılar: Bu arılar nektarını toplayabilecekleri kaynak arayışı içersindedirler. Görevi belirsiz iki çeşit işçi arı bulunmaktadır: içsel bir dürtüye veya bir dış etmene bağlı olarak rastgele kaynak arayışında olan kaşif arılar ve kovanda bekleyen

ve görevli arıları izleyerek bu arılar tarafından paylaşılan bilgiyi kullanarak yeni bir kaynağa yönelen gözcü arılar. Kaşif arıların sayısının tüm koloniye oranı %5-10 olmalıdır.

Arılar arasında bilgi paylaşımı kollektif bilginin oluşumunda en önemli husustur. Bir kovan göz önüne alındığında, tüm kovanlarda ortak olan bazı parçalara ayırmak mümkündür ve bu parçalarda en önemlisi ise dans alanıdır. Yiyecek kaynağının kalitesi ve yeri ilgili bilgi paylaşımı dans alanında olmaktadır. Bir arı dans ederken diğer arılar da ona antenleri ile dokunurlar ve bulunduğu kaynağın tadı ve kokusu ile ilgilide bilgi alırlar. Ziyaret ettikleri kaynağa daha fazla arı yönlendirmek için kovandaki çeşitli alanlarda bu dansı gerçekleştirir ve kaynağa geri döner.

Kesin çizgileri olmamakla birlikte genelde kovandaki uçuş yapılan yere yakın bir yerde olan dans alanında yapılan danslar, taşınan bilgiye göre ve canlılığa göre değişmektedir. En önemlisi nektarın tatlılığıdır. Bu üstünlük dans eşik değerini belirler. Ancak bu uyarıcı yeterli değildir. Bunun yanında nektarın çıkarılmasının kolaylığı da bir etkidir. Kovandan olan uzaklık, çiçek nektarının kıvamı, besinin genel durumu, kalitedeki göreceli değişimler, hava koşulları ve günün hangi vaktinin olduğu dansı etkileyen diğer etmenlerdir.

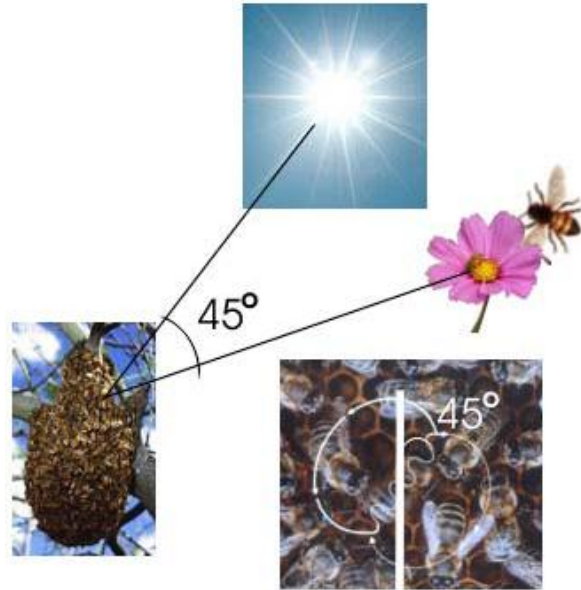
Yiyecek getiricilerin, diğer yiyecek getiricileri uzak noktadaki bir kaynağa yönlendirmek için hedefe ait yön bilgisini vermeleri gerekir. Yön bilgisi alındıktan sonra hedefe ulaşmada güneşten faydalanılır. Bileşik gözleri ile arılar, kendi yörüngeleri ile güneş arasındaki açıyı hesaplayabilmektedir. Güneşin önü kapanmış olsa da polarize gün ışığından yine güneşin konumunu tayin edebilmektedirler. Arılar, bir noktanın uzaklığını enerji tüketimine bağlı olarak hesaplamamakta ve yüklerine göre farklı yükseklikte uçarak enerji tüketimlerini ayarlamaktadırlar.

Kaynağın kovana olan mesafesine göre çeşitli danslar mevcuttur: dairesel dans (round dance), kuyuk dansı (waggle dans) ve titreme dansı (tremble dance). Daire ve kuyruk dansları yiyecek getiricilerin yeniden aktivasyonunda etkilidir. Bu iki dans farklı uzaklıktaki bölgelerin ayırımında kullanılır. Daire dansı ile belirtilen yiyecek kaynağının

kovana olan uzaklığı maksimum 50-100 metre civarında olduğundan bu dans yön ve uzaklık bilgisi vermemektedir.

Titreme dansında, arıların petek üzerinde düzensiz tarzda ve yavaş tempoda bacaklarını titreterek ileri, geri, sağa ve sola hareketleri söz konusudur. Arı, zengin bir nektar kaynağı bulunduğunu, ancak kovana işlenebileceğinden fazla nektar geldiğini ve bundan dolayı nektarı işlemek görevine geçmek istediğini belirtmektedir. Sadece dans alanında değil kovanın başka bölümlerinde de bu dans gerçekleştirilmektedir. Bu dansın amacı kovan kapasitesi ve yiyecek getirme aktivitesi arasındaki dengeyi sağlamaktır.

100 metreden 10 kilometreye kadar olan geniş bir alan içerisinde bulunan kaynaklarla ilgili bilgi aktarımında kuyruk dansı kullanılmaktadır. Bu dans '8' rakamına benzeyen bir dans çeşididir. Dansı izleyen arıların bir titreşim oluşturması ile bu dansı yapan arı, dansına son verir. Her 15 saniyede dansın tekrarlanma sayısı, nektar kaynağının uzaklığı hakkında bilgi vermektedir. Daha az tekrarlanma sayısı daha uzak bölgeleri ifade etmektedir. Yön bilgisi, şekil 3.10'daki gibi '8' rakamı şeklindeki dansın açı bilgisinden elde edilir. Şekilde verilen örnekte dansı izleyen arılar, danstan güneşle yiyecek arasındaki açının 45° olduğunu anlamaktadırlar. Arılar arasında uzak mesafede bulunan kaynakla ilgili bilgi paylaşımı sırasında hızlı dans edilir.

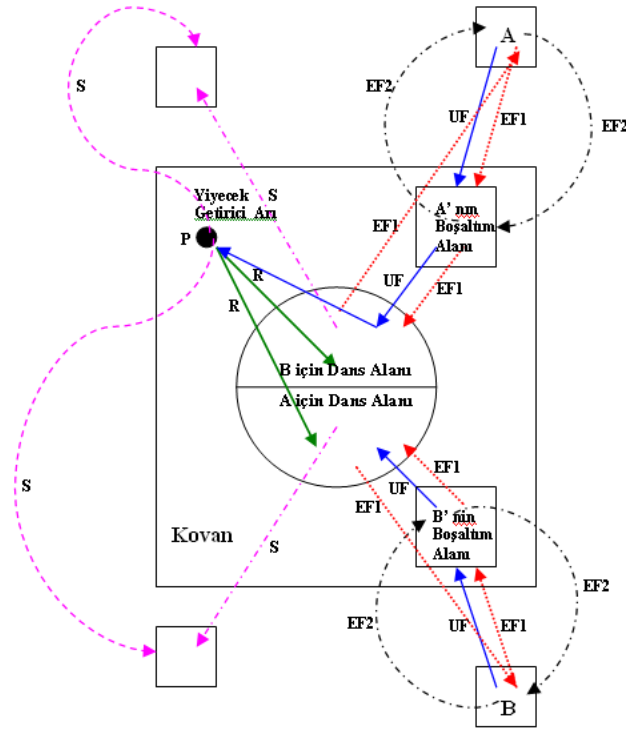


Şekil 3.11: Arılarda dans

Tüm zengin kaynaklarla ilgili bilgiler dans alanında gözcü arılara iletildiğinden, gözcü arılar birkaç dansı izledikten sonra hangisini tercih edeceğine karar verir. Zengin kaynaklarla ilgili daha fazla bilgi aktarımı olduğundan bu kaynakların seçilme olasılığı daha fazladır.

Yiyecek arayıcıların davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için şekil 3.11’de verilen modelin incelenmesi faydalı olacaktır.

A ve B isiminde iki keşfedilmemiş kaynak olduğu varsayılırsa araştırmanın başlangıcında potansiyel bir yiyecek arayıcı görevi belirsiz işçi arı olarak araştırmaya başlayacak ve bu arı kovan etrafındaki kaynakların yerinden habersizdir. Bu durumdaki bir arı için iki olası seçenek söz konusudur:



Şekil 3.12: Yiyecek arama çevrimi

- i) Bu arı kaşif arı olabilir ve iç ve dış etkenlere bağlı olarak yiyecek aramaya başlayabilir (Şekil 3.11’de S ile gösterilmektedir).
- ii) Bu arı, kuyruk danslarını izleyen bir gözcü arı olabilir ve izlediği dansla anlatılan kaynağa gidebilir (Şekil 3.11’de R ile gösterilmektedir).

Bir kaynak bulduktan sonra arı imkanları dahilinde bu kaynağın yerini hafızasına alır ve hemen nektar toplamaya başlar. Böylece bu arı artık görevli arı haline gelmektedir. İşçi arı kaynaktan nektarı aldıktan sonra kovana döner ve bunu yiyecek depolayıcılara aktarır. Nektarını aktardıktan sonra üç seçenek ortaya çıkar:

- 1) Gittiği kaynağı bırakarak bağımsız izleyici olabilir (Şekil 3.11'de UF ile gösterilmektedir).
- 2) Gittiği kaynağa dönmeden önce dans eder ve kovadaki arkadaşlarını da aynı kaynağa yönlendirebilir(Şekil 3.11'de EF1 ile gösterilmektedir) .
- 3) Diğer arıları yönlendirmeden kaynağına gidebilir (Şekil 3.11'de EF2 ile gösterilmektedir).

Tüm arıların eş zamanlı olarak yiyecek arama sürecinde olmadıklarını belirtmek gerekir. Yeni arıların yiyecek aramaya katılma olasılıklarının toplamı arı sayısı ile o anda yiyecek arama sürecinde olan arıların sayılarının farkıyla orantılı olduğu çalışmalarla doğrulanmıştır [21].

Bu durumda arılardaki kendi kendine organize olabilme şu şekilde açıklanabilir:

Pozitif geribesleme: kaynağın nektar miktarı artıkça bu kaynağı seçen gözcü arı sayısı da artmaktadır.

Negatif geribesleme: tükenen kaynak bırakılmaktadır.

Salınımlar: kaşif arılar yiyecek kaynağı bulabilmek için rastgele arama yapmaktadır.

Çoklu etkilişimler: arılar yiyecek kaynakları ile ilgili olarak dans alanında bilgi paylaşımı gerçekleştirilirler.

3.5.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Doğada var olan zeki davranışlar içeren süreçlerin incelenmesi araştırmacıları yeni optimizasyon metotları geliştirmeye sevk etmiştir. Karaboğa, arıların yiyecek arama davranışını modelleyerek Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmasını geliştirmiştir.

Karaboğa'nın ABC algoritmasının temel aldığı bu model de bazı kabuller yapılmaktadır. Bunlardan birincisi her bir kaynağın nektarının sadece bir görevli arı tarafından alınmasıdır. Yani görevli arıların sayısı toplam yiyecek kaynağı

sayısına eşittir. İşçi arıların sayısı aynı zamanda gözcü arıların sayısına da eşittir. Nektarı tükenmiş kaynağın görevli arısı artık kaşif arı haline dönüşmektedir. Yiyecek kaynaklarının yerleri optimizasyon problemine ait olası çözümlere ve kaynakların nektar miktarları ise o kaynaklarla ilgili çözümlerin kalitesine (uygunluk) karşılık gelmektedir. Dolayısıyla ABC optimizasyon algoritması en fazla nektara sahip kaynağın yerini bulmaya çalışarak uzaydaki çözümlerden problemin minimumunu yada maksimumunu veren noktayı (çözümü) bulmaya çalışmaktadır.

Bu modele ait süreç adımları aşağıdaki gibi verilebilir:

- 1) Yiyecek arama sürecinin başlangıcında, kaşif arılar çevrede rastgele arama yaparak yiyecek aramaya başlarlar.
- 2) Yiyecek kaynakları bulduktan sonra, kaşif arılar artık görevli arı olurlar ve buldukları kaynaklardan kovana nektar taşımaya başlarlar. Her bir görevle arı kovana dönüp getirdiği nektarı boşaltır ve bu noktadan sonra ya bulduğu kaynağa geri döner ya da kaynakla ilgili bilgiyi dans alanında sergilediği dans aracılığıyla kovanda bekleyen gözcü arılara iletir. Eğer faydalandığı kaynak tükenmiş ise görevli arı kaşif arı haline gelir ve yeni kaynak arayışına yönelir.
- 3) Kovanda bekleyen gözcü arı zengin kaynakları işaret eden dansları izlerler ve yiyeceğin kalitesi ile orantılı olan dans frekansına bağlı olarak bir kaynağı tercih ederler.

ABC algoritmasının bu süreçleri tablo 3.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1: ABC algoritmasının temel adımlar

1: Başlangıç yiyecek kaynağı bölgelerinin üretilmesi
2: repeat
3: İşçi arıların yiyecek kaynağı bölgelerine gönderilmesi
4: Olasılıksal seleksiyonda kullanılacak olasılık değerlerinin görevli arılardan gelen bilgiye göre hesaplanması
5: Gözcü arıların olasılık değerlerine göre yiyecek kaynağı bölgesi seçmesi
6: Kaynağı bırakma kriteri: limit ve kaşif arı üretimi
7: until çevrim sayısı = Maksimum çevrim sayısı

Yiyecek arayan arılarda görülen zeki davranış ile bu davranışı simule eden ABC algoritmasının temel birimleri takip eden al bölümlerde açıklanmaktadır.

3.5.2.1. Başlangıç Yiyecek Kaynağı Bölgelerinin Üretilmesi

Arama uzayını yiyecek kaynaklarını içeren kovan çevresi olarak düşünürsek, algoritma arama uzayındaki çözümlere karşılık gelen rastgele yiyecek kaynağı yerleri üretmek çalışmaya başlanmaktadır. Rastgele yer üretme süreci her bir parametrenin alt ve üst sınırları arasında rastgele değer üretmek (3.46) eşitliğindeki gibi gerçekleşir.

$$x_{ij} = x_j^{\min} + rand(0,1)(x_j^{\max} - x_j^{\min}) \quad (3.46)$$

Burada $i=1 \dots SN$, $j=1 \dots D$ ve SN yiyecek kaynağı ve D ise optimize edilecek parametre sayısıdır. x_j^{\min} , j. parametrenin alt sınırı, x_j^{\max} ise j. parametrenin üst sınırıdır. Aynı zamanda başlangıç aşamasında her kaynağın geliştirilememe sayısını ifade eden $failur_i$ (i. kaynağın geliştirilememe sayısı) sayaçları da sıfırlanmaktadır.

Başlangıç aşamasından sonra yiyecek kaynaklarının görevli arı, gözcü arı ve kaşif arı süreçlerinden geçilerek, daha iyisi bulunmaya çalışılır. ABC algoritması için durdurma kriteri olarak maksimum çevrim sayısı (MCN) ve kabul edilebilir bir hata değeri veya diğer optimizasyon algoritmaları için kullanılan standart bir durdurma kriteri tanımlanabilir.

3.5.2.2. İşçi Arıların Yiyecek Kaynağı Bölgelerine Gönderilmesi

Daha önceden belirtildiği gibi her bir kaynağın bir görevli arısı vardır. Dolayısıyla yiyecek kaynaklarının sayısı görevli arıların sayısına eşittir. İşçi arı çalıştığı kaynak komşuluğunda yeni bir yiyecek kaynağı belirler ve bunun kalitesini değerlendirir. Yeni kaynak daha iyi ise bu yeni kaynağı hafızasına alır. Yeni kaynağın mevcut kaynak komşuluğunda belirlenmesinin benzetimi (3.47) ifadesiyle tanımlanmaktadır.

$$v_{ij} = x_{ij} + \Phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (3.47)$$

x_i ile gösterilen her bir kaynak için bu kaynağın yani çözümün tek bir parametresi (rastgele seçilen parametresi, j) değiştirilerek x_i komşuluğunda v_i kaynağı bulunur. (3.47) ifadesinde j, [1,D] aralığında rastgele üretilen bir tam sayıdır. Rastgele seçilen j

parametresi değiştirilirken, yine rastgele seçilen x_k komşu çözümünün ($k \in \{1,2,\dots,SN\}$) j. parametresi ile mevcut kaynağın j. parametresinin farkları alınıp $[-1,1]$ arasında rastgele değer alan ϕ_{ij} sayısı ile ağırlandırıldıktan sonra mevcut kaynağın j. parametresine eklenmektedir.

(3.47) ifadesinden de analizildiği gibi x_{ij} ve x_{kj} arasındaki fark azaldıkça, yani çözümler birbirine benzedikçe, x_{ij} parametresindeki değişim miktarı da azalacaktır. Böylece bölgesel optimal çözüme yaklaştıkça değişim miktarı da adaptif olarak azalmaktadır.

Bu işlem sonucunda üretilen v_{ij} 'nin daha önceden belli olan parametre sınırlarını aşması durumunda j. parametreye ait olan alt veya üst sınır değerlerine ötelenmektedir.

$$v_{ij} = \begin{cases} x_j^{min}, & v_{ij} < x_j^{min} \\ v_{ij}, & x_j^{min} \leq v_{ij} \leq x_j^{max} \\ x_j^{max}, & v_{ij} > x_j^{max} \end{cases} \quad (3.48)$$

Sınırlar dahilinde üretilen v_i parametre vektörü yeni bir kaynağı temsil etmekte ve bunun kalitesi hesaplanarak bir uygunluk değeri atanmaktadır.

$$\text{fitness}_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i} & f_i \geq 0 \\ 1 + \text{abs}(f_i) & f_i < 0 \end{cases} \quad (3.49)$$

Burada f_i, v_i kaynağının yani çözümün maliyet değeridir. x_i ile v_i arasında nektar miktarına yani uygunluk değerlerine göre bir aç gözlü (greedy) seçme işlemi uygulanır. Yeni bulunan v_i çözümü daha iyiye görevli arı hafızasından eski kaynağın yerini silerek v_i kaynağının yerini hafızaya alır. Aksi takdirde görevli arı x_i kaynağına gitmeye devam eder ve x_i çözümü geliştiremediği için x_i kaynağıyla ilgili geliştirememeye sayacı ($failure_i$) bir artar, geliştirdiği durumda ise sayaç sıfırlanır.

3.5.2.3. Gözcü Arıların Olasılık Değerlerinin Hesaplanması (Dans Benzetimi)

Tüm görevli arılar bir çevrimde araştırmalarını tamaladıktan sonra kovana dönüp buldukları kaynakları nektar miktarları ile ilgili gözcü arılara bilgi aktarır. Bir gözcü arı dans aracılığıyla paylaşılan bilgidan faydalanarak yiyecek kaynaklarının nektar

miktarları ile orantılı bir olasılıkla bir bölge (kaynak) seçer. Bu ABC'nin çoklu etkileşim sergilediğinin bir örneğidir. Olasılıksal seçme işlemi, algoritmada nektar miktarına karşılık gelen uygunluk değerleri kullanılarak yapılmaktadır. Uygunluk değerine bağlı seçme işlemi rulet tekerleği, sıralamaya dayalı, stokastik örnekleme, turnuva yöntemi yada diğer seleksiyon şemalarından herhangi biri ile gerçekleştirilebilir. Temel ABC algoritmasında bu seleksiyon işlemi rulet tekerleği kullanılarak yapılmıştır. Tekerlekteki herbir dilimin açısı uygunluk değeri ile orantılıdır. Yani bir kaynağın uygunluk değerinin tüm kaynakların uygunluk değeri toplamına oranı o kaynağın diğer kaynaklara göre nisbi seçilme olasılığı olduğunu vermektedir.

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_{i=1}^{SN} fitness_i} \quad (3.50)$$

Burada $fitness_i$, i . 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 özellik ABC'nin pozitif geribesleme özelliğine karşılık gelmektedir.

3.2.5.4. Gözcü Arıların Yiyecek Kaynağı Bölgesi Seçmeleri

Algoritmada olasılık değerleri hesaplandıktan sonra bu değerler kullanılarak rulet tekerleğine göre seçim işleminde her bir kaynak için $[0,1]$ aralığında rastgele sayı üretilir ve p_i değeri bu üretilen sayıdan büyükse görevli arılar gibi gözcü arı da (3.47) denklemini kullanarak bu kaynak bölgesinde yeni bir çözüm üretir. Yeni çözüm değerlendirilir ve kalitesi hesaplanır. Sonra, yeni çözümlerle eski çözümün uygunluklarının karşılaştırıldıkları ve iyi olanın seçildiği aç gözlü seleksiyon işlemine tabi tutulur. Yeni çözüm daha iyi ise eski çözüm yerine bu çözüm alınır ve çözüm geliştirememeye sayacı ($failure_i$) sıfırlanır. Eski çözümün uygunluğu daha iyi ise bu çözüm muhafaza edilir ve geliştirememeye sayacı ($failure_i$) bir artırılır. Bu süreç tüm gözcü arılar yiyecek kaynağı bölgelerine dağılına kadar devam eder.

3.5.2.5. Kaynağı Bırakma Kriteri: Limit ve Kaşif Arı Üretimi

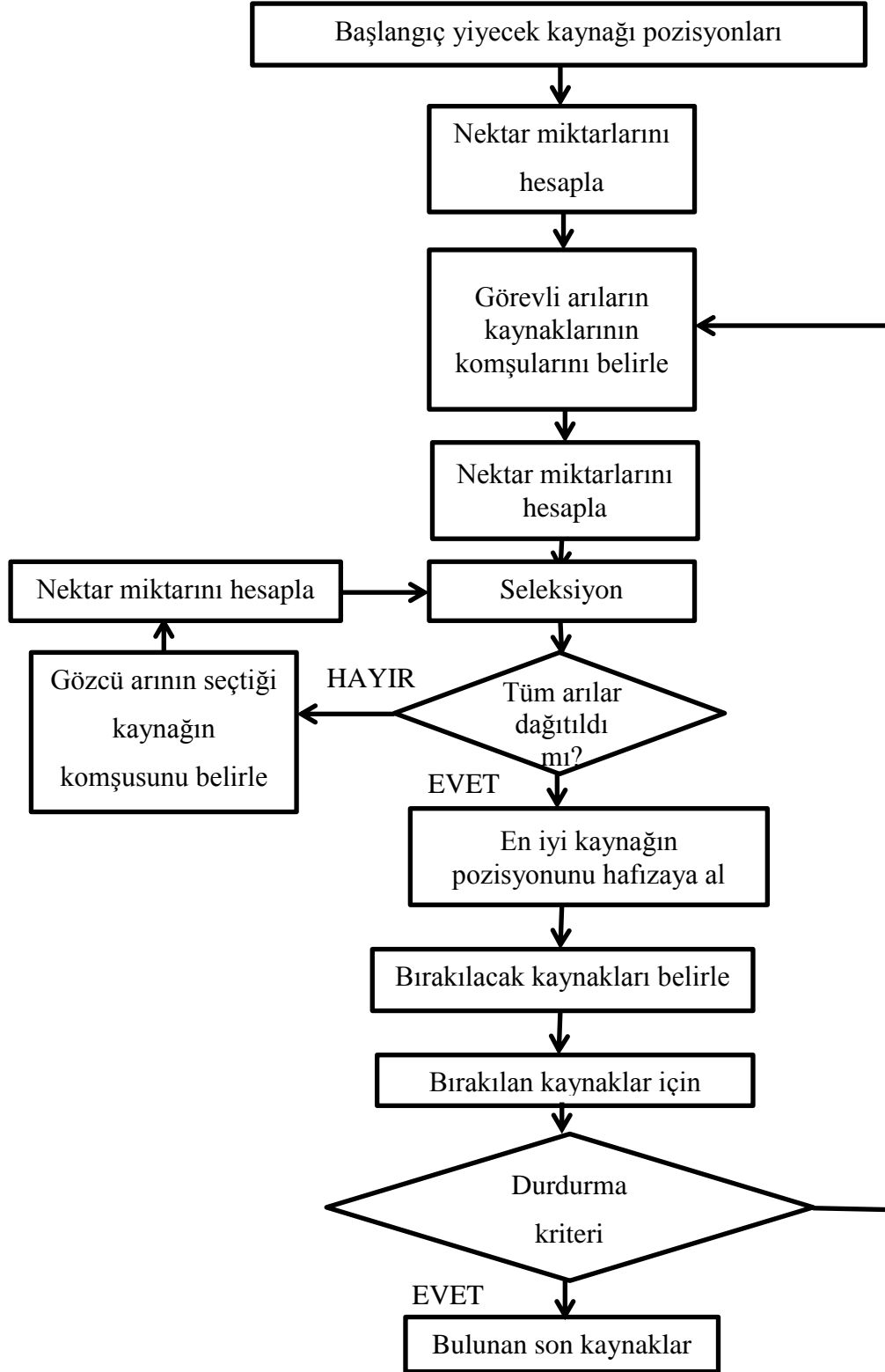
Bir çevrim sonunda tüm görevli ve gözcü arılar arama süreçlerini tamamladıktan sonra çözüm geliştirememeye sayacı ($failure_i$) kontrol edilir. Bir arının bir kaynaktan faydalanıp faydalanmadığı, yani gidip geldiği kaynağın nektarının tükenip tükenmediği çözüm geliştirememeye sayacı belli bir eşik değerinin üzerindeyse, artık bu kaynağın

görevli arısının tükenmiş olan o çözümü bırakıp kendisi için başka bir çözüm araması gerekmektedir. Bu da biten kaynakla ilişkisi olan görevli arının kaşif arı olması anlamına gelir. Kaşif arı haline geldikten sonra, bu arı için rastgele çözüm arama süreci başlar (Denklem(3.46)). Kaynağın tükendiğinin belirlenmesi için kullanılan eşik değeri, ABC algoritmasının önemli bir parametresidir ve “limit” olarak adlandırılmaktadır. Temel ABC algoritmasında her çevrimde sadece bir kaşif arının çıkmasına izin verilir.

Tüm bu birimler arasındaki ilişki ve döngü şekil 3.12'deki gibi bir akış diyagrammı ile şematize edilebilir.

3.5.2.6. *Seleksiyon Mekanizmaları*

ABC algoritması dört farklı seleksiyon işlemi kullanılmaktadır. Bunlar; 1) potansiyel iyi kaynakların belirlenmesine yönelik denklem (3.50) ile olasılık değerlerinin hesaplandığı global olasılık temelli seleksiyon süreci 2) görevli ve gözcü arıların renk, şekil, koku gibi nektar kaynağının türünü belirlemesini sağlayan görsel bilgiyi kullanarak bir bölgede kaynağın bulunmasına vesile olan bölgesel olasılık tabanlı seleksiyon işlemi (Denklem (3.47)) 3) işçi ve gözcü arıların daha iyi olan kaynağı belirlemek için kullandıkları aç gözlü seleksiyon 4) kaşif arılar tarafından denklem (3.46) aracılığıyla gerçekleştirilen rastgele seleksiyon. Bütün bu seleksiyon metotlarının bir arada kullanılmasıyla ABC algoritması hem iyi bir global araştırma hem de bölgesel araştırma yapabilmektedir.



Şekil 3.13: ABC algoritmasının akış diyagramı

3.5.2.7. ABC Algoritmasının Adımları

Genel hatları ile ABC algoritmasının adımları ve her bir adımda yapılan işlemlerin adımları sözde kod olarak tablo 3.2’de yazılmıştır.

Tablo 3.2: ABC algoritmasının genel adımları

1:	Denklem (3.46) aracılığıyla tüm x_{ij} , $i = 1 \dots SN$, $j = 1 \dots D$, çözümlerine başlangıç değerlerinin atanması ve çözüm geliştirememeye sayaçlarının sıfırlanması ($failure_i = 0$)
2:	$f_i = f(x_i)$ fonksiyon değerlerinin ve bu değerlere karşılık gelen uygunluk değerlerinin $fitness_i$ hesaplanması
3:	repeat
4:	for $i=1$ to SN do
5:	(3.48) denklemi kullanılarak x_i çözümünün görevli arısı için yeni bir kaynak üret, v_i ve $f(v_i)$ 'yi hesaplayarak bu çözümün uygunluk değerini hesapla.
6:	v_i ve x_i arasında aç gözlü seleksiyon işlemi uygula
7:	x_i çözümü gelişmemişse çözüm geliştirememeye sayacını bir artır, $failure_i = failure_i + 1$, gelişmişse sıfırla, $failure_i = 0$
8:	end for
9:	Denklem (3.50) ile gözcü arıların seçim yaparken kullanacakları uygunluk değerine dayalı olasılık değerini, p_i hesapla
10:	$t=0$, $i=1$
11:	repeat
12:	if $random < p_i$ then
13:	Denklem (3.47)'i kullanarak gözcü arı için yeni bir kaynak, v_i üret
14:	v_i ve x_i arasında aç gözlü seleksiyon işlemi uygula ve daha iyi olanı seç
15:	x_i çözümü gelişmemişse çözüm geliştirememeye sayacını bir artır, $failure_i = failure_i + 1$, gelişmişse sıfırla, $failure_i = 0$
16:	$t=t+1$
17:	end if
18:	until $t=SN$
19:	if $\max(failure_i) > \text{limit}$ then
20:	x_i 'yi denklem (3.46) ile üretilen rastgele bir çözümle değiştir.
21:	end if
22:	En iyi çözümü hafızada tut
23:	until Durma kriteri

3.6. PARÇACIK SÜRÜSÜ OPTİMİZASYONU (PSO)

Parçacık sürüsü optimizasyonu ile sayısal problemlerin optimizasyonu Eberhart ve Kennedy tarafından öne sürülmüştür [22]. Reynolds'un 1987 yılında yayınladığı [23] kuş sürülerinin sosyal davranışlarını esas alarak oluşturulmuştur. Reynolds [23] kuş sürüsünün sosyal davranışını bilgisayar grafik teknolojisini kullanarak modellemiştir. Yaptığı çalışmada kuşların birlikte hareket ederken izledikleri yolları inceleyerek bütün kuşların tek bir merkezden kontrol ediliyormuş gibi hareket ettiklerinin farkına varmıştır. Bu gözlemden sonra Reynolds [23] sürü davranışının modelini üç temel kural üzerine oturttu: *çarpışmalardan kaçınma*, *hızlarını eşitleme* ve *sürünün merkezine yakın durma*. Reynold [23] bu üç kuralı kullanarak sürüdeki her bir bireyin davranışını basit vektörler ile modellemiştir. Bu karakteristik parçacık sürüsü optimizasyonunun (PSO) en temel fikri olarak kullanılmaktadır. Boyd ve Recharson [24] insanların karar verme ve kültür aktarımının gelişimi ve evrimini incelemiştir. İncelemeleri sonucunda; insanların karar verme aşamasında iki tip bilgi birikimini kullanmakta olduklarını farkettiler:

- Kendi Deneyimleri: Daha önce deneyip sonuçlarını görmüş olduğu durumları göstermektedir.
- Diğer İnsanların Deneyimleri: Diğer insanların bir durumu deneyip sonuçlarını görmesi ve bilgi birikimini bu insanlara aktarması ile oluşan bilgi birikimidir.

Bu iki maddeden yola çıkarak herbir bireyin kararları hem kendi deneyimlerine hem de etrafındaki bireylerin deneyimlerine göre verdiği görülmektedir. Bu durum PSO'nun bir diğer önemli parçasıdır.

Eberhart ve Kennedy [22] bu iki temel fikri birleştirerek kendilerine ait hız ve pozisyon bilgisinden oluşan PSO'yu ortaya çıkarmışlardır. Parçacık sürüsü optimizasyonunda; bir grup rasgele oluşturulmuş birey çözüm uzayında gezinmekte ve en uygun çözümü deneyerek aramaktadır. Herbir birey kendilerinin daha önceki en iyi pozisyonlarını ve sürülerindeki en iyi pozisyonu hafızasında tutmakta ve bir sonraki hamlesini bu değerleri göz önünde bulunarak gerçekleştirmektedir.

Parçacık sürüsü optimizasyonu, popülasyon tabanlı ve her bireyin belirlenmiş bir uyumluluk (fitness) fonksiyonuna göre hareket etmesi özelliklerinden dolayı evrimsel

algoritmalarla benzerlik göstermektedir. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu'nun evrimsel algoritmalarla en temel farkı, en uygun olanın hayatta kalması kuralı yerine sosyal davranışların uygun hale getirilmesini hedef almaktadır. Buna ek olarak, her birey kendi geçmişine ve eşlerinin etkileşimine uyum sağlamaktadır. Aynı zamanda Parçacık Sürüsü Optimizasyonu kolay oluşturulabilir ve optimum sonuca ulaşabilmesi için çok karmaşık bilgilere ihtiyaç duymamaktadır. Parçacık Sürüsü Optimizasyonunun adımları ve çalışma şekli bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

3.6.1. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) Algoritması

Parçacık Sürüsü Optimizasyonu'nda (PSO), sürünün herbir bireyi (parçacık veya zeki birey denilebilir) çözüm uzayında dolaşmaktadır. Herbir parçacık optimizasyon probleminin birer tane aday çözümünü göstermektedir. Herhangi bir parçacığın pozisyonu, kendisinin daha önce ziyaret ettiği en iyi çözüm (kendi deneyimi) ve bütün sürüde ziyaret edilen en iyi konumdan etkilenmektedir. Burada bahsedilen en iyi pozisyon, bundan sonra isim olarak *global en iyi* olarak adlandırılacaktır. Herbir parçacığın performansı (global en iyi değere ne kadar yakın olduğu) uyumluluk (fitness) fonksiyonu kullanılarak hesaplanmaktadır.

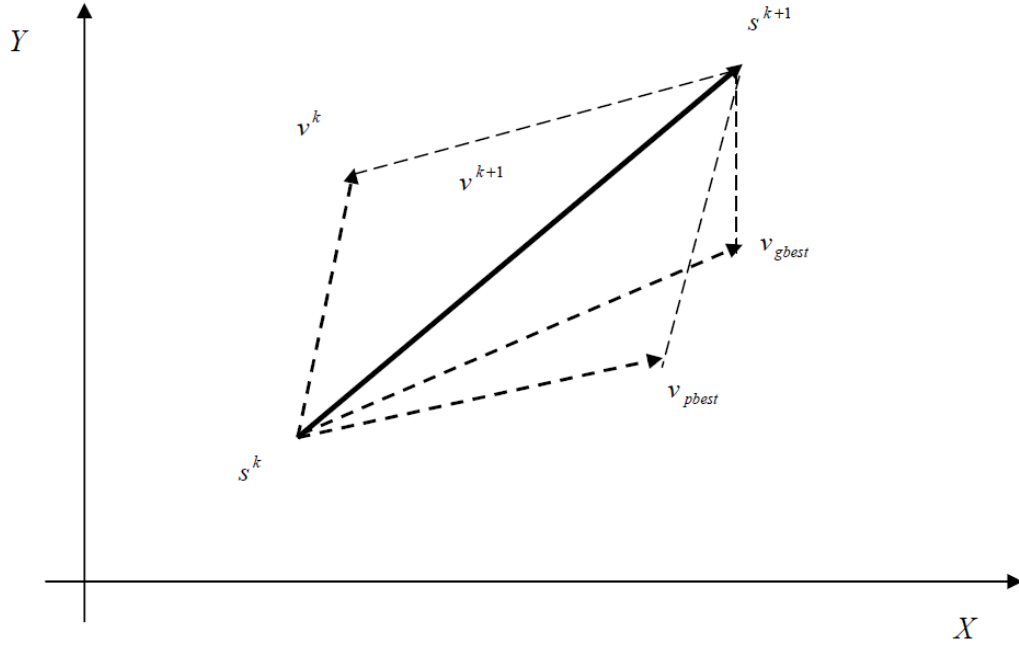
İki boyutlu çözüm uzayında her parçacık XY koordinat düzleminde çözüm aramaktadır. Parçacığın hızı v_x ve v_y (X ve Y eksenleri boyunca hareket) ile tanımlanmaktadır. Her birey kendi en iyi değerini (p_{best}) değişkeni ile tanımlamaktadır. Bu parametre her bir bireyin kendi geçmişinin analogisidir. Her parçacık grubun en iyi değeri olan g_{best} bilgisini ve p_{best} bilgisini hafızasında tutmaktadır. Bu durumda herbir parçacık: kendi geçerli konumu (x, y), kendi geçerli hızı (v_x, v_y), kendi geçerli konumları ile p_{best} ve g_{best} konumları ile arasında olan mesafeyi kullanarak yeni konumunu belirlemektedir.

Herbir bireyin pozisyon ve hızları aşağıda verilen (3.51) ve (3.52) denklemleri kullanılarak hesaplanmaktadır [22].

$$\begin{aligned} \vartheta_i^{k+1} = \vartheta_i^k + c_1 \text{rand}_1 x(p_{best_i} - s_i^k) \\ + c_2 \text{rand}_2 x(g_{best} - s_i^k) \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + \vartheta_i^{k+1} \quad (3.52)$$

Şekil 3.14, parçacık sürüsü optimizasyonu süresince arama noktasının hareketini göstermektedir [22]. Şekil 3.14'de s^k ve s^{k+1} sırasıyla geçerli ve yeni parçacık konumlarını göstermektedir. Aynı şekilde ϑ^k ve ϑ^{k+1} sırasıyla geçerli ve yeni hızlarını göstermektedir. ϑ_{pbest} ve ϑ_{gbest} , p_{best} ve g_{best} konumlarına göre hızları göstermektedir. Bu vektörlerin parçacığın konumunu değiştirmeleri şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Arama noktasının hareket prensibi [22]

Parçacık Sürüsü Optimizasyonu'nun ilk versiyonundaki problem, optimizasyonun ilerleyen adımlarında osilasyona doğru gitmeye meyilli olmasıdır. Hızı belli bir oranda sönmölemek ve kontrol edilemeyen osilasyonların belli bir limit dahilinde tutulmasını sağlayabilmek için, Kennedy [25] 2001 yılında ϑ_{max} parametresini PSO'ya uygulamıştır. Bu durumda Kennedy'nin yazmış olduğu kod parçası:

If $\vartheta^{k+1} > \vartheta_{max}$ then $\vartheta^{k+1} = \vartheta_{max}$
 Elseif $\vartheta^{k+1} < -\vartheta_{max}$ then $\vartheta^{k+1} = -\vartheta_{max}$

Bu kod parçası ile bir noktaya yakınsayamayan parçacıkların belli bir band aralığında osilasyon yapmalarına izin verilmiştir [25].

3.6.2. Gelişmiş PSO Algoritması

PSO'da kullanılan parçacıkların belli bir noktaya yakınsaması ve uygun çözümü bulabilmesi için temel PSO algoritmasında bazı geliştirmelerde bulunulmuştur. Shi ve Eberhart [26] tarafından (1998) *atalet katsayısı* fonksiyonu kullanılarak PSO geliştirilmiştir.

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \times \text{iter} \quad (3.53)$$

Atalet katsayısı kullanılarak parçacığın daha önceki hızının yeni hızına etkisi kontrol altına alınmaktadır. Zamanla azalan bu katsayı sayesinde arama uzayı zamanla daralmakta ve daha uygun çözümlerin bulunması sağlanabilmektedir. Atalet katsayısının kullanılması ile yeni denklem aşağıdaki şekilde olacaktır:

$$\begin{aligned} \vartheta_i^{k+1} = \omega \vartheta_i^k + c_1 \text{rand}_1 \times (p_{\text{best}_i} - s_i^k) \\ + c_2 \text{rand}_2 \times (g_{\text{best}} - s_i^k) \end{aligned} \quad (3.54)$$

Tabloda verilen bütün parametreler Denklem (3.51)'deki ile aynıdır, tek fark bir önceki hız değerinin ω atalet katsayısı ile kontrol edilmesidir. Clerc 'in [27] yayınladığı metot ile parçacıklar *kısıtlama katsayıları* kullanılarak belli değerler arasında tutulmaktadır. Bu kısıtlama faktörü sayesinde:

- Parçacık tanımlı değerlerden uzaklaşmayacak,
- Parçacık arama uzayını daha verimli bir şekilde kullanacaktır.

Clerc'in [27] hazırlamış olduğu yeni hız güncelleme denklemi aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\vartheta_i^{k+1} = X[\vartheta_i^k + c_1 \text{rand}_1 \times (p_{\text{best}_i} - s_i^k) + c_2 \text{rand}_2 \times (g_{\text{best}} - s_i^k)] \quad (3.55)$$

X kısıtlama katsayısıdır ve aşağıdaki gibidir:

$$X = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} \quad (3.56)$$

$$\varphi = c_1 + c_2, \varphi > 4 \quad (3.57)$$

Kısıtlama katsayısı sayesinde optimizasyonun ilerleyen zamanlarında parçacıklar tek bir noktaya yakınlaşmaya başlayacaktır.

3.6.3. PSO'nun Adımları

Şekil 3.14 temel PSO'nun akış diyagramını göstermektedir. Adımlar aşağıdaki gibi gösterilebilir:

Adım 1: Her parçacığın ilk değerlerinin verilmesi

Her parçacığın s_i^0 konumu ve ϑ_i^0 konumları belirlenen aralıkta rasgele verilir. Her parçacık için o anki p_{best} değeri geçerli konumları olarak atanır. En uygun değeri veren p_{best} değeri ise g_{best} değeri olarak atanır.

Adım 2: Her parçacığın hedef fonksiyonda denenmesi,

Hedef fonksiyonu her parçacık için hesaplanır. Eğer, yeni hesaplanan değer p_{best} değerinin vermiş olduğu değerden daha iyi ise, p_{best} değeri ile değiştirilir. Eğer, p_{best} lerin en iyisi g_{best} değerinden daha iyi ise, g_{best} değeri yeni değer ile değiştirilir.

Adım 3: Her arama noktasının güncellenmesi

Bütün parçacıkların konumları (3.51) ve (3.52) denklemleri kullanılarak değiştirilir. Atalet katsayısının veya kısıtlama faktörünün kullanılması durumunda ise; (3.54) veya (3.55) denklemlerinden herhangi biri kullanılır.

Adım 4: Sonlandırma şartlarının kontrol edilmesi

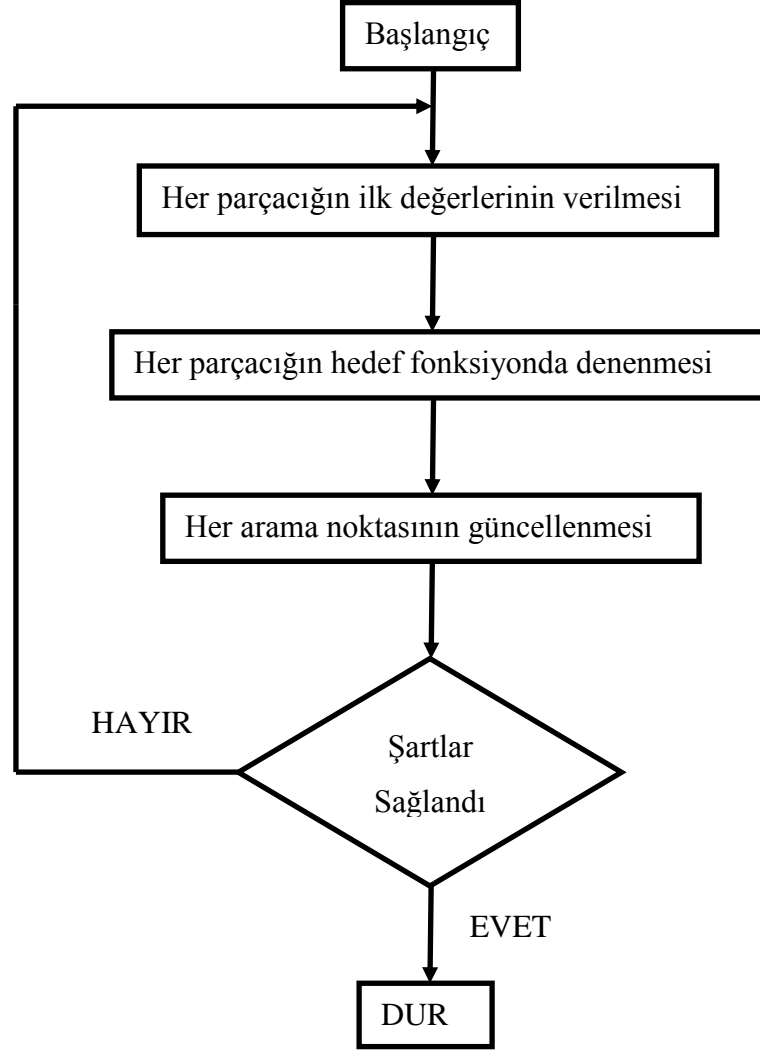
Sonlandırma şartlarına ulaşıp ulaşılamadığı kontrol edilir. Sonlandırma şartlarının karşılanamaması durumunda optimizasyon işlemi Adım 1'den devam eder, şartlar sağlanmış ise, optimizasyon durdurulur.

3.6.4. PSO Performansını Etkileyen Faktörler

Sürü nüfusu ve ilk hızları ile sürü davranışı, PSO performansını etkilemektedirler.

- *Sürü nüfusu ve ilk hızlar:* Sürünün içindeki parçacıkların sayısı algoritmanın süresini büyük oranda artırmaktadır, ancak fazla olması çeşitliliği artıracağından uygun çözümün daha erken iterasyonlarda bulunmasını sağlayacaktır. Bu yüzden, parçacık sayısı sorununun çözülmesi gerekmektedir. Bir diğer ayarlanması gereken önemli faktör ϑ_{max} değerinin ayarlanmasıdır. Bu parametre bir parçacığın maksimum ne kadar uzağa sıçrayabileceğini belirlemektedir. Bu yüzden bu parametrenin çok yüksek değerler alması osilasyonlara neden olacaktır. Aksi

durumda parçacığın hedef fonksiyonun yerel minimumu etrafında sıkışmasına neden olacaktır.



Şekil 3.15: PSO adımları

- *Sürü davranışı*: Sürünün davranışı birbirinden bağımsız her bir parçacığın davranışlarının toplamı olarak gösterilebilir. Her parçacık daha iyi bir çözümün bulunduğu tarafa, rastgele değer almış parametrelerin etkisi ile hareket etmektedir, bunun sonucunda ya iyi sonuç atlanır ya da daha iyi bir sonuç bulunur. Sürü içindeki parçacıkların birbiri ile etkileşimleri parçacığın yolunu kaybetmesini engellemektedir. Bu tip bir davranış geniş arama uzayında ve ancak büyük θ_{max} değerlerinin kullanılmasını gerektirir.

3.6.5. PID Kontrol Parametrelerinin PSO ile Ayarlanması

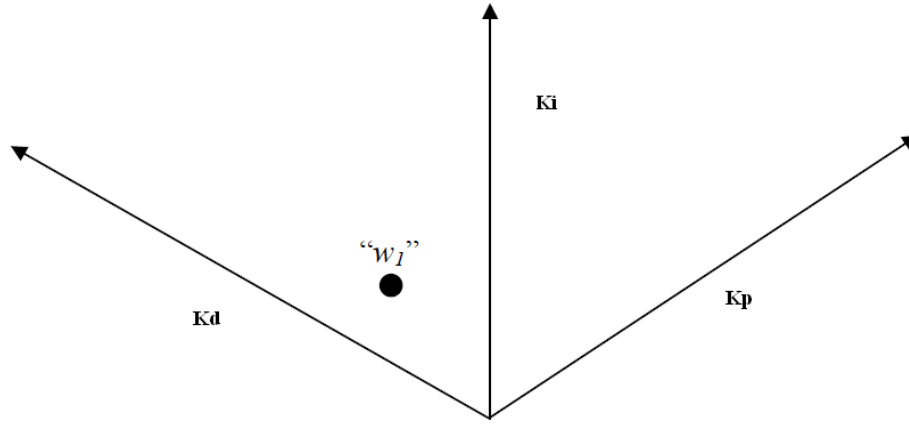
Bu bölümde PID (Proportional-Integrator-Derivative) kontrol parametrelerinin ayarı PSO algoritması kullanılarak yapılacaktır. Bu metot ile PID parametreleri sistemin basamak cevabı kullanılarak hesaplanmaktadır. Basamak cevabı ele alınırken; aşım değeri, yükselme zamanı, oturma zamanı gibi parametreler dikkate alınır [28].

PID kontrol, otomatik kontrolörlerin %90'ında kullanılan en temel kontrolör tipidir [29]. Aynı zamanda PID kontrol enerji tasarrufu uygulamalarında kullanıldığından dolayı, en temel kontrol şeklidir.

PID kontrol ile en uygun çözümün üretilmesi için, PID parametrelerinin uygun değerlerine getirilmesi gerekmektedir. PID kontrol parametrelerinin belirlenmesi genelde kullanıcının uzmanlığına bağlı ve çoğu zaman verimsiz sonuçlar vermektedir. Günümüzde kendi parametrelerini belirleyen dijital PID kontrolörler mühendislik alanında daha çok kullanılmaya başlamıştır [30]. Yeni PID kontrol parametresi ayarlama tekniklerinde PID kontrole bağlı sistem girişi ve çıkışlarını kontrol ederek parametrelerin kontrolünü sağlamaktadır.

3.6.5.1. PSO, Parametre Ayarlama Metodu

Şekil 3.17'de ω_1 parçacığının 3 boyutlu çözüm uzayında uygun çözümü arayışı gösterilmiştir. Çözüm uzayının her eksenini optimize edilmesi gereken her bir PID parametresinin değerini vermektedir. Bu parametreler K_p , K_i , ve K_d parametreleridir. ω_1 parçacığının konumları bir önceki bölümde anlatılan Denklem (3.51) ve (3.52) hız güncelleme denklemleri kullanılarak güncellenir. PI veya PD kontrol için çözüm uzayı 2 boyuta indirilerek arama yapılabilir.



Şekil 3.16: 3 boyutlu arama uzayındaki bir parçacık

3.6.5.2. PID Parametre Ayarı için PSO'nun Kullanımı

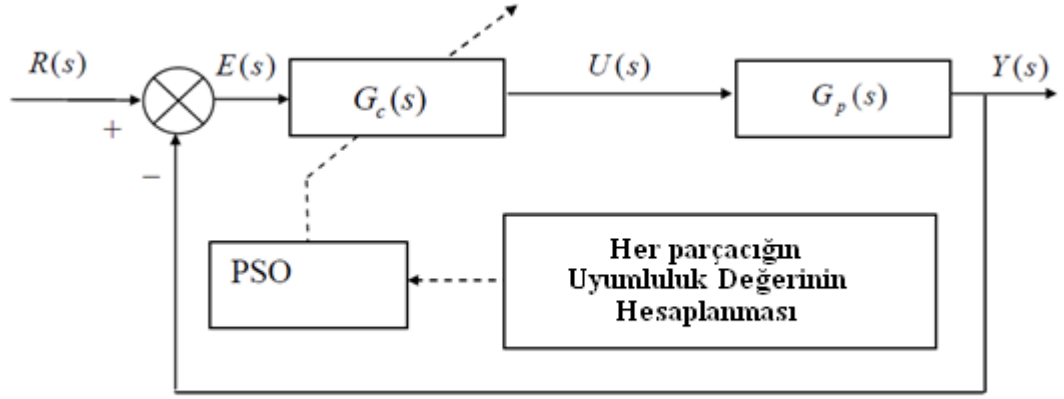
PSO algoritması Eberhart ve Kennedy [22] tarafından 1 boyutlu çözüm uzayında kullanılmıştır. Bu bölümde PID parametrelerinin hesaplanabilmesi için 3 boyutlu çözüm uzayında çalışılacaktır.

n boyutlu bir uzayda i . parçacığın o anki konumunu $s_{i,n}$ ifadesi gösterebilir. Bu parçacığın daha önceki en iyi konumu $p_{best_{i,n}}$ olarak, bir boyutta çalışan bütün popülasyondaki en iyi performansı gösteren parçacık değeri ise g_{best_n} olarak gösterilecektir. Aynı şekilde n . boyuttaki i . parçacığın hızını $v_{i,n}$ göstermektedir. Bu durumda her boyuttaki her bir parçacığın bir sonraki hızları Denklem (3.58) ve (3.59) kullanılarak hesaplanabilir.

$$v_{i,n}^{(k+1)} = X * [v_{i,n}^k + c_1 \text{rand}_1 x (p_{best_{i,n}} - s_{i,n}^k) + c_2 \text{rand}_2 x (g_{best_n} - s_{i,n}^k)] \quad (3.58)$$

$$s_{i,n}^{k+1} = s_{i,n}^k + v_{i,n}^{k+1} \quad (3.59)$$

Şekil 3.16'da gösterilen sistem PSO kontrol algoritmasının PID kontrol sistemine etkisini göstermektedir. Bir önceki bölümde anlatılmış olan PSO adımları ile ITAE (Integral Time Absolute Error), ISE (Integral Square Error), IAE (Integral Absolute Error) uyumluluk fonksiyonu olarak kullanılarak tamamlanmaktadır.



Şekil 3.17: SISO bir sistemde PSO'nun PID kontrole etkisi blok diyagramı

PSO tarafından kullanılabilir olan uyumluluk fonksiyonu örnekleri aşağıda gösterilmiştir:

IAE:

$$F = \int |e(t)| dt \quad (3.60)$$

ISE:

$$F = \int e(t)^2 dt \quad (3.61)$$

ITAE:

$$F = \int t |e(t)| dt \quad (3.62)$$

Olarak gösterilebilir. Birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunan bu uyumluluk fonksiyonlarından hangisinin seçileceğine kullanıcı tarafından karar verilir.

4. BULGULAR

Bu bölümde ‘Matlab Simulink’ programı kullanılarak sistem modelinin ve uygulanan kontrolör yöntemlerinin benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Bu modellerin benztimi ana program ve buna bağlı alt programlar ile yaptırılmıştır. ‘PID’ ve ‘PSS’ kontrol yöntemlerinin parametrelerinin belirlenmesi için iki farklı sürü zekası optimizasyon yöntemi kullanılmıştır.

İlk aşamada sistem modeli belirlenen koşullarda PSS ve PID kontrolör olmadan çalıştırılmış ve sisteme ait sonuçlar sayısal ve grafik olarak verilmiştir. İkinci aşamada ise PID ve PSS kontrolörlü sistemler daha önceden belirlenmiş sistem parametrelerine göre çalıştırılmıştır. Üçüncü aşamada ise ‘Yapay Arı Kolonisi (ABC)’ ve ‘Parçacık Sürüsü Optmizasyonu (PSO)’ ile belirlenen kontrol parametreleri ile sistem modeli çalıştırılmıştır. Son aşamada tüm elde edilen veriler karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

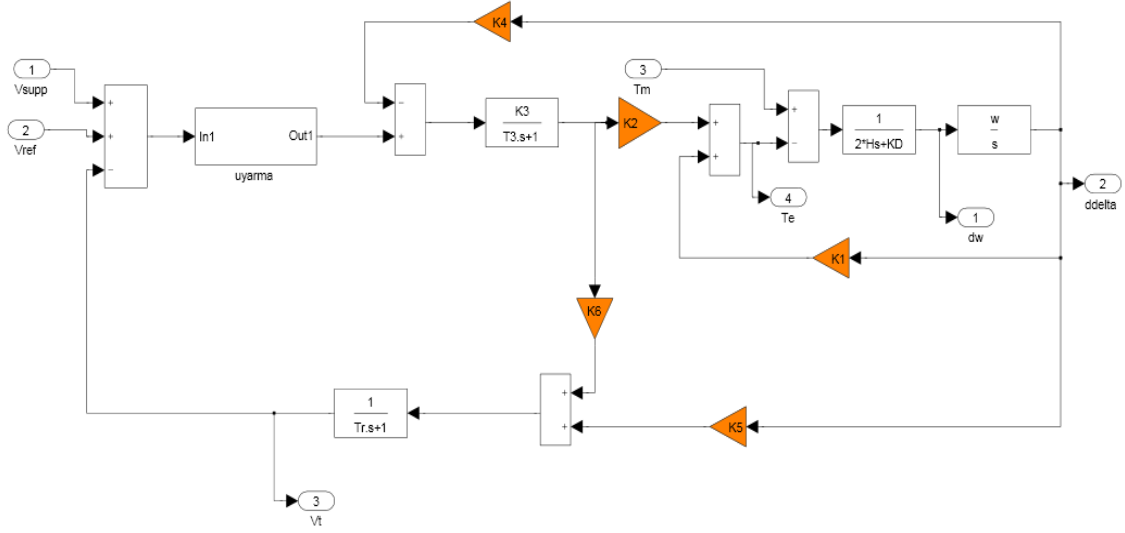
Bu çalışmada tüm benzetim uygulamaları için bozucu etki uygulama yeri olarak mekanik güç “Tm” girişi seçilmiştir. Yapılan analizlerde sistemin 10 saniyelik benzetim kullanılmıştır. Bozucu etkinin uygulanması için 1-1.5 saniye arasında verilmiştir. Bozucu etki 1. saniye sonrasında 0.5 saniyelik bir zaman dilimi (1-1.5 saniyeler arası) içerisinde sisteme uygulanmıştır. Bozucu etki şiddeti ise 0.5 pu olarak seçilmiştir. Yani sisteme kare dalga şeklinde bir bozucu etki uygulanmaktadır.

Bu çalışmada yapılan benzetim uygulamalarında kontrolör performansını sayısal olarak ifade edebilmek için IAE (integral of absolute error) (4.1) [31] yöntemi kullanılmıştır.

4.1. GÜÇ SİSTEMİ MODELİNİN KONTROLÖRSÜZ BENZETİMİ

Şekil 4.1’de kontrolörsüz bir güç sistem modelinin blok diyagramı görülmektedir. Benzetimde kullanılan parametreler tablo 4.1 de verilmiştir [32]. Çalışma durumları

tablo 4.2 de verilmiştir [32]. Senkron generatörlerin sistem modelleri yükleme koşullarına göre farklı çalışma durumu parametreleri içermektedir. Bu çalışma durumlarından 1 nolu çalışma durumu hafif yük koşulunu, 2 nolu çalışma durumu orta yük koşulunu, 3 nolu çalışma durumu ağır yük koşulunu, 4 nolu çalışma durumu ise reaktif yüklü koşulu temsil etmektedir [32].



Şekil 4.1: Güç sistemi modeli

Tablo 4.1: Simülasyon parametreleri [32]

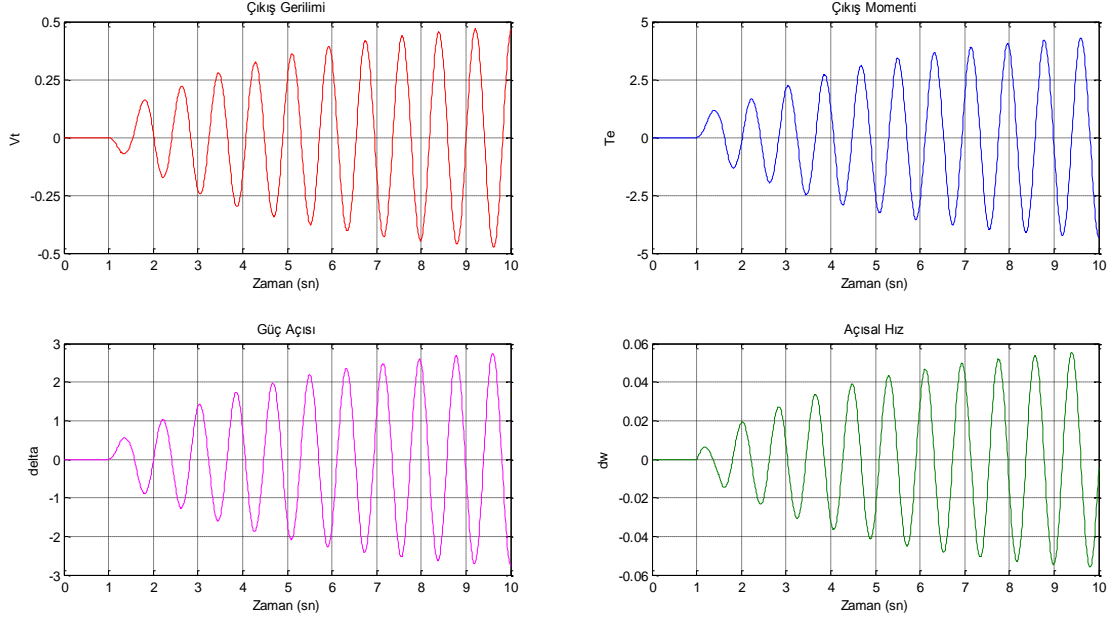
Vref	Kae	Tae	Vrmax	Vrmin	Xe	H	Tdo	KD	f	Tr
0	100	0.02	6 p.u.	-6 p.u.	0.2 p.u.	5	6 sn	0	60 Hz	0.02

Tablo 4.2: Çalışma Durumları [32]

No	P	Q	Xe	K1	K2	K3	K4	K5	K6
1	0,600	0,0361	Xe	1,4336	1,5855	0,2889	2,0294	0,0194	0,2628
2	1,500	0,2303	Xe	1,6117	1,8883	0,2889	2,4170	-0,1524	0,1898
3	1,800	0,3352	Xe	1,5911	1,8987	0,2889	2,4303	-0,1717	0,1866
4	1,000	0,3333	3* Xe	0,7430	1,0776	0,4180	1,3794	-0,1739	0,4561

Bu çalışmada kullanılan sistem modeli benzetiminde 3. çalışma durumu üzerinde çalışılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları şekil 4.2'de gösterilmiştir. Eğrilerde gösterilen çıkış gerilimi, güç açısı, elektriksel çıkış momenti, açısal hız değerleri per unit (p.u) cinsindedir.

Şekil 4.2’de 0-10 saniye benzetim süresi boyunca çıkış gerilimi, güç açısı, elektriksel çıkış momenti, açısal hız parametrelerinin zamana göre değişimleri gösterilmiştir. Sisteme 1-1.5 saniyeleri arasında 0.5 p.u. bozucu etki uygulanmıştır. Burada sistem PSS içermediğinden dolayı 3 nolu çalışma noktasında kararlı hale gelememektedir.



Şekil 4.2: Kontrolösüz sistemin elde edilen benzetim sonuçları

Şekil 4.2’de 0-10 saniye benzetim süresi boyunca çıkış gerilimi, güç açısı, elektriksel çıkış momenti, açısal hız parametrelerinin zamana göre değişimleri gösterilmiştir. Sisteme 1-1.5 saniyeleri arasında 0.5 p.u. bozucu etki uygulanmıştır. Burada sistem PSS içermediğinden dolayı 3 nolu çalışma noktasında kararlı hale gelememektedir.

Burada amaç IAE değerini düşürmektir. IAE değeri ne kadar küçük olursa sistem performansı o kadar iyi anlamına gelmektedir.

Tablo 4.3: Kontrolösüz sistemin için IAE değerleri

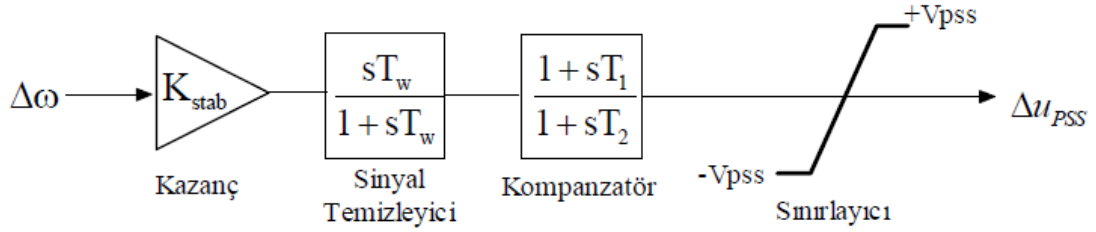
	Vt	Te	delta	dw
IAE Değeri	196.435	1772.51	1137.53	23.069

Kontrolösüz sistem modeli için yapılan hesaplamalarda çıkış gerilimi, elektriksel çıkış momenti, güç açısı ve açısal hız değerlerine ait IAE değerleri ayrı ayrı hesaplanmış ve

Tablo 4.3’de gösterilmiştir. Burada sistem salınımları söndürülemediği için değerler yüksek çıkmıştır.

4.2. PSS’Lİ GÜÇ SİSTEM MODELİ BENZETİMİ

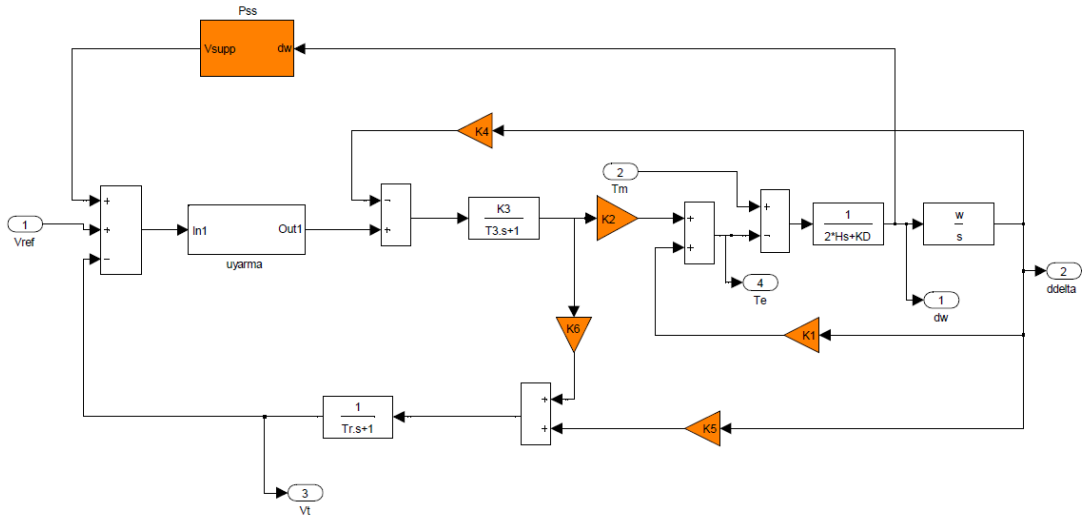
Bu bölümde PSS’li sistem modelinin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Sistem modeli üzerinde daha önce literatürde kullanılmış olan [30] geleneksel bir PSS (C-PSS) modeli denenmiştir. C-PSS, geri besleme üzerinde tasarlanmış faz ileri-faz geri (Lead-Lag) tipi bir kontrolördür. C-PSS’in blok diyagramı şekil 4.3’de, C-PSS parametreleri ise tablo 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: PSS Modeli [32]

Tablo 4.4: C-PSS Parametreleri [32]

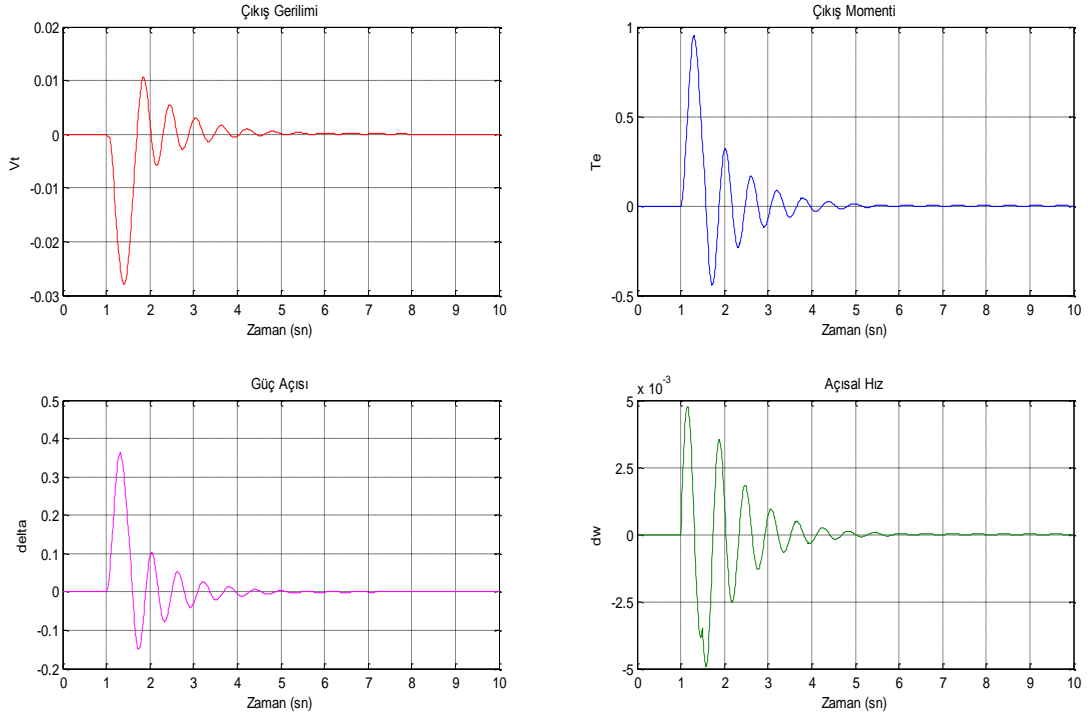
Kstab	Tw	T1	T2	+Vss	-Vss
16	2	0.08	0.027	0.25	-0.25



Şekil 4.4: PSS’li Güç Sistem Modeli

Sistem modelinin çıkış gerilimi, elektriksel çıkış momentini, güç açısı ve açısal hız parametrelerinin zamana göre değişim eğrileri incelenmiştir.

C-PSS'li sistem modelinin sonuçları şekil 4.5'de verilmiştir. Tablo 4.5'de sistem modeline ait sonuçların IAE değerleri verilmiştir.



Şekil 4.5: CPSS'li sistemin elde edilen benzetim sonuçları

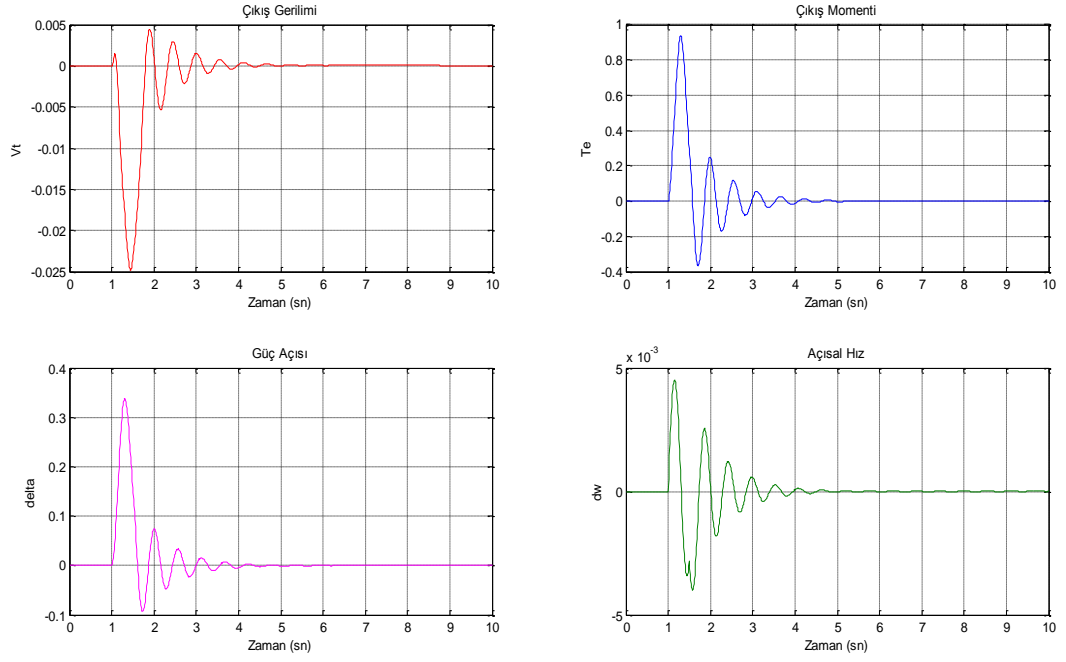
Tablo 4.5: C-PSS'li sistemin IAE değerleri

	Vt	Te	Delta	dw
IAE Değeri	1.716	59.997	21.856	0.469

İkinci aşamada PSS parametreleri PSO yöntemiyle belirlenmiştir (PSO-PSS). Buna göre belirlenen parametre değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir. Bu parametre değerlerine göre sistem modelinin çıkış gerilimi, elektriksel çıkış momentini, güç açısı ve açısal hız grafikleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Sistem modeline ait IAE değerleri tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.6: PSO-PSS Parametreleri

Kstab	Tw	T1	T2	+Vss	-Vss
21,8383	7,3406	0,0501	0,0054	0,25	-0,25

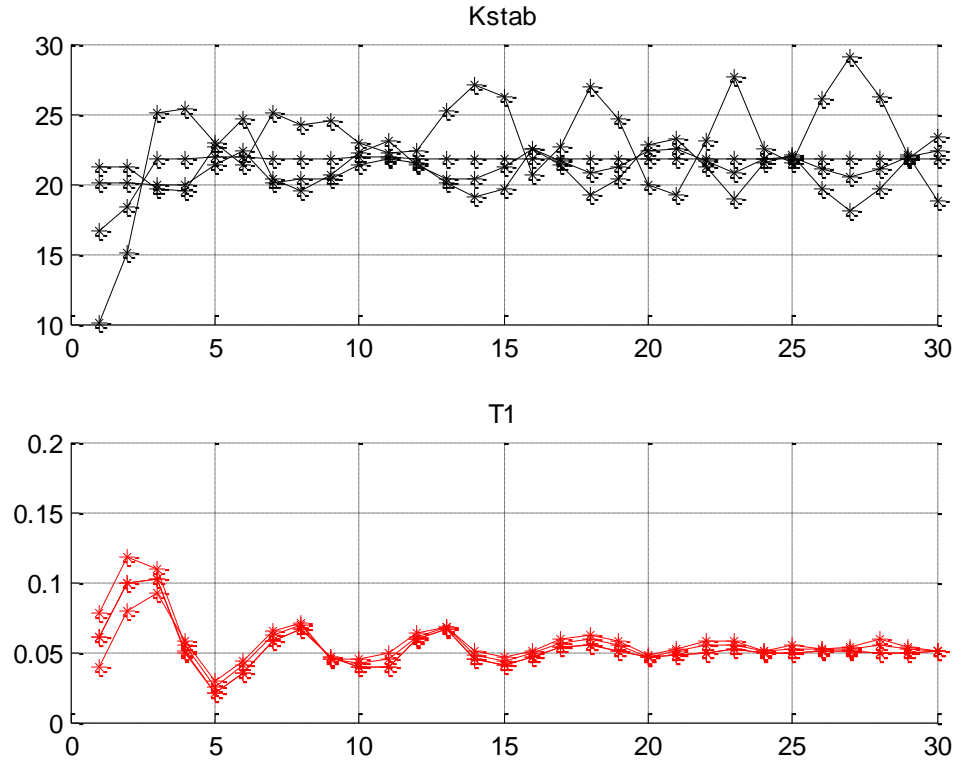


Şekil 4.6: PSO-PSS’li sistemin elde edilen benzetim sonuçları

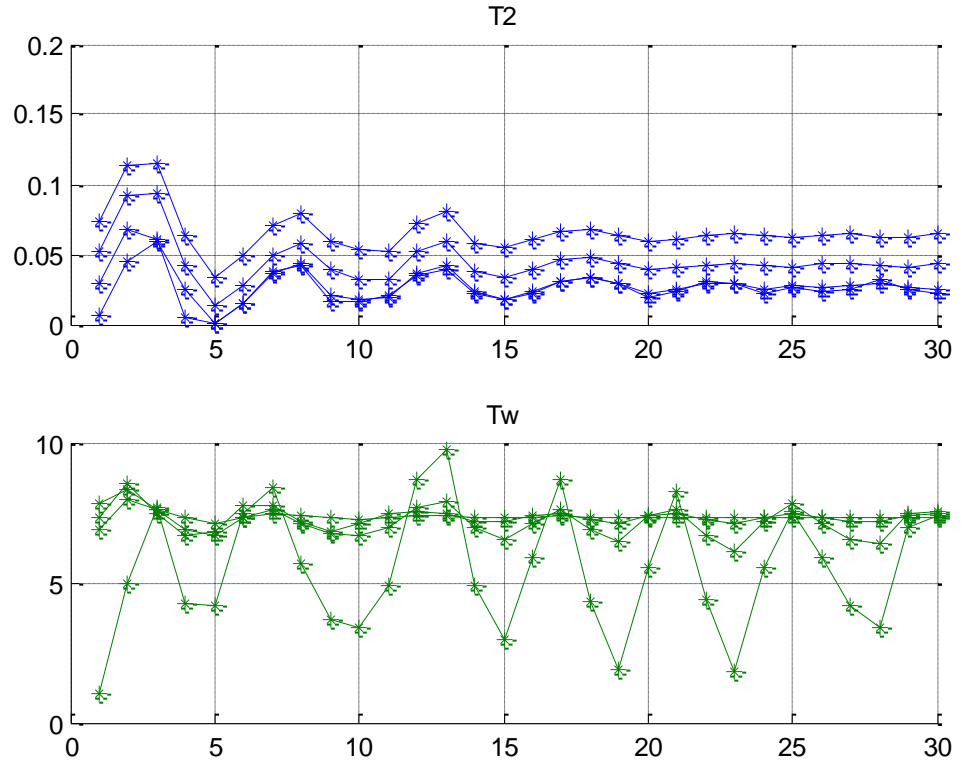
Tablo 4.7: PSO-PSS’li sistemin IAE değerleri

	Vt	Te	Delta	dw
IAE Değeri	1.389	49.593	16.958	0.3498

Kontrolör parametrelerinin değerleri belirlenirken PSO algoritmasında 30 iterasyon sonucunda parçacıkların hareketleri şekil 4.7 ve 4.8’de gösterilmiştir. Grafik eğrilerinden de görüldüğü gibi belli bir iterasyondan sonra parçacıklar birbirlerine yaklaşmışlardır.



Şekil 4.7: PSO ile belirlenen 'Kstab', 'T1' parametrelerinin parçacık hareketleri

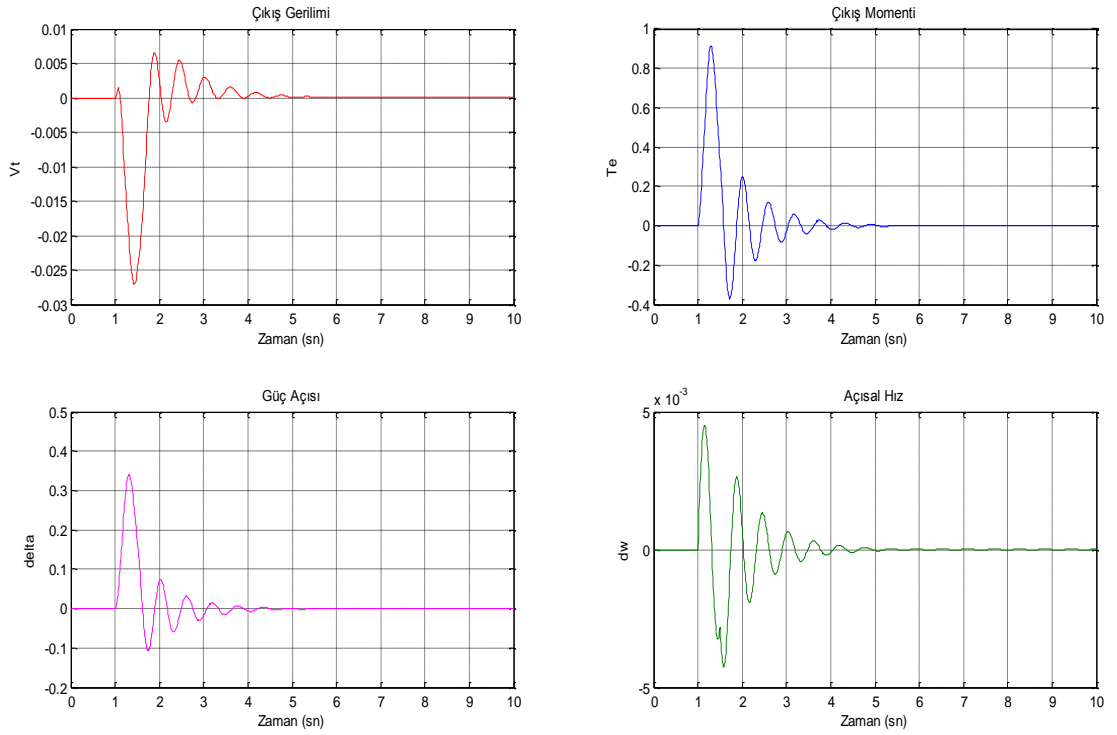


Şekil 4.8: PSO ile belirlenen 'T2', 'Tw' parametrelerinin parçacık hareketleri

Üçüncü aşamada parametreleri ABC yöntemiyle belirlenen PSS kontrolörün (ABC-PSS) değerleri tablo 4.8 de verilmiştir. Bu parametre değerlerine göre sistem modelinin çıkış gerilimi, elektriksel çıkış momenti, güç açısı ve açısal hız grafikleri Şekil 4.9’da verilmiştir. Sistem modeline ait IAE değerleri tablo 4.9’da verilmiştir

Tablo 4.8: ABC-PSS Parametreleri

Kstab	Tw	T1	T2	+Vss	-Vss
20.240	1.068	0.0405	0.0001	0.25	-0.25

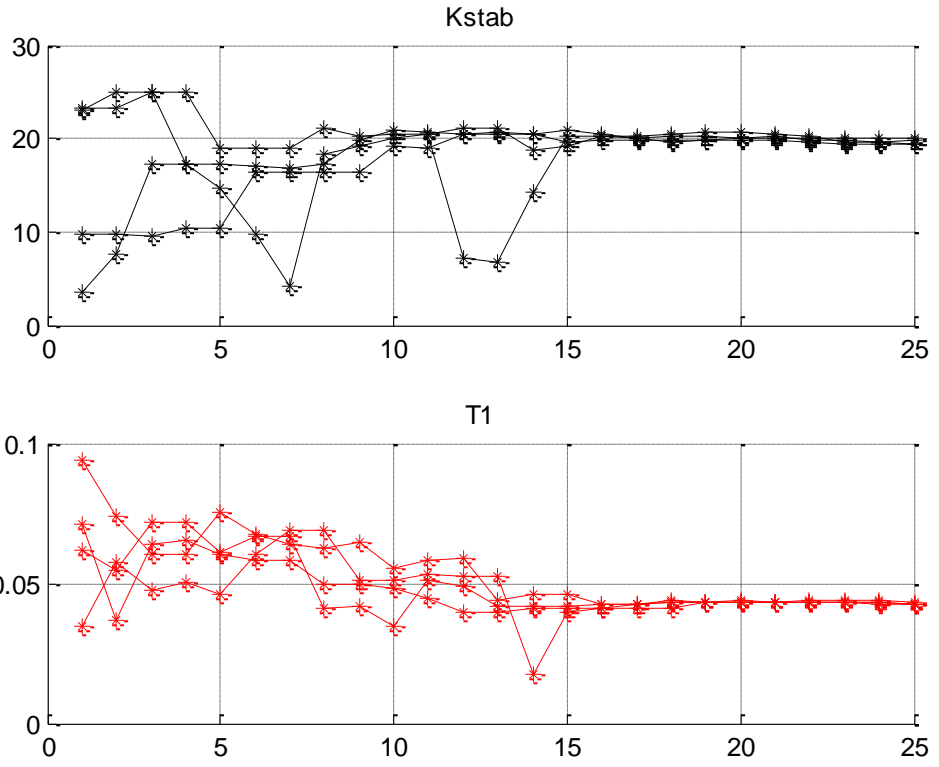


Şekil 4.9: ABC-PSS’li sistemin elde edilen benzetim sonuçları

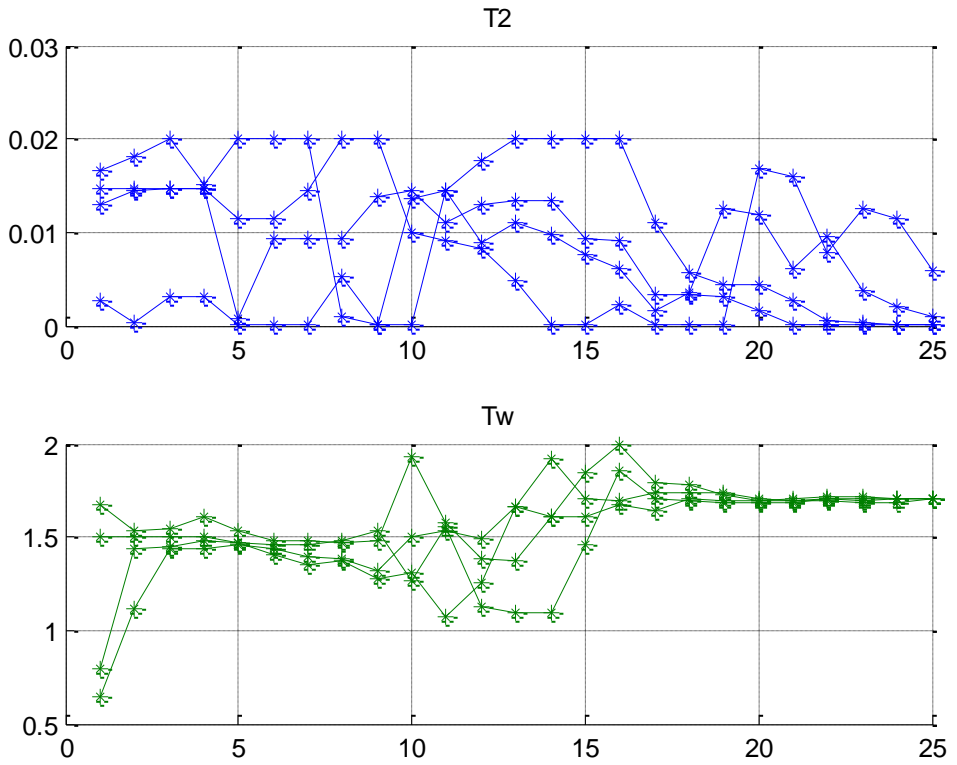
Tablo 4.9: ABC-PSS’li sistemin IAE değerleri

	Vt	Te	Delta	dw
IAE Değeri	1.55	51.317	18.218	0.372

Kontrolör parametrelerinin değerleri belirlenirken ABC algoritmasında 25 iterasyon sonucunda parçacıkların hareketleri şekil 4.10 ve 4.11’de gösterilmiştir. Grafik eğrilerinden de görüldüğü gibi 15. iterasyondan sonra parçacıklar birbirlerine yaklaşmışlardır.



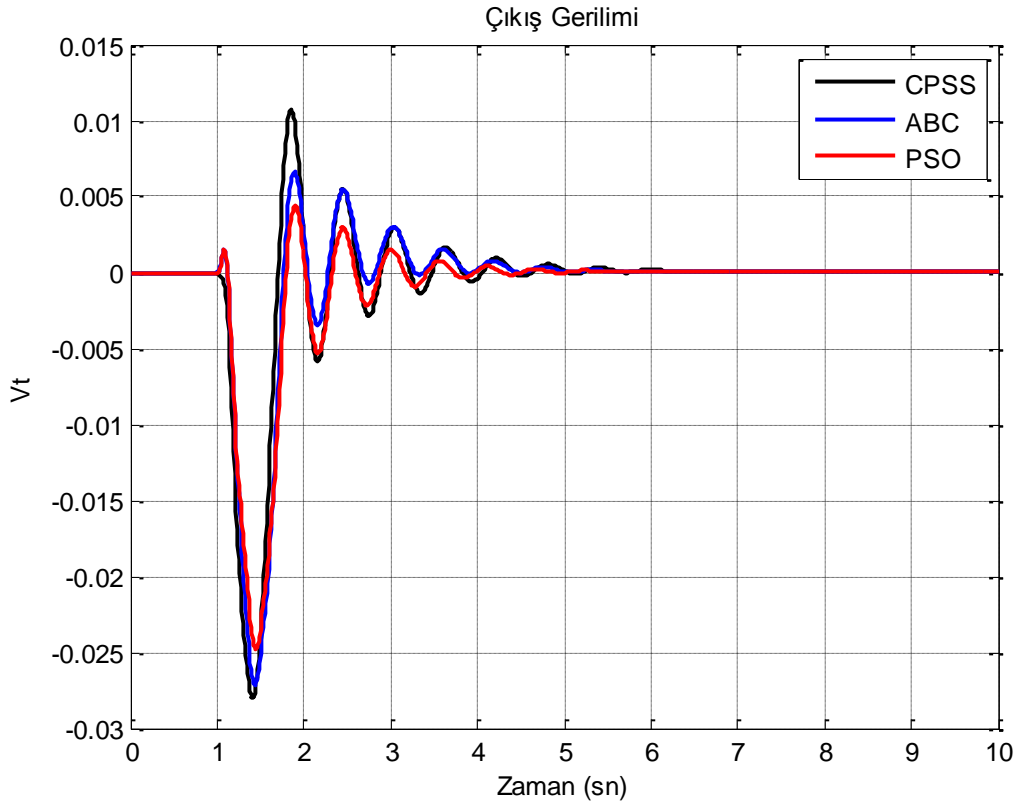
Şekil 4.10: ABC ile belirlenen 'Kstab', 'T1' parametrelerinin parçacık hareketleri



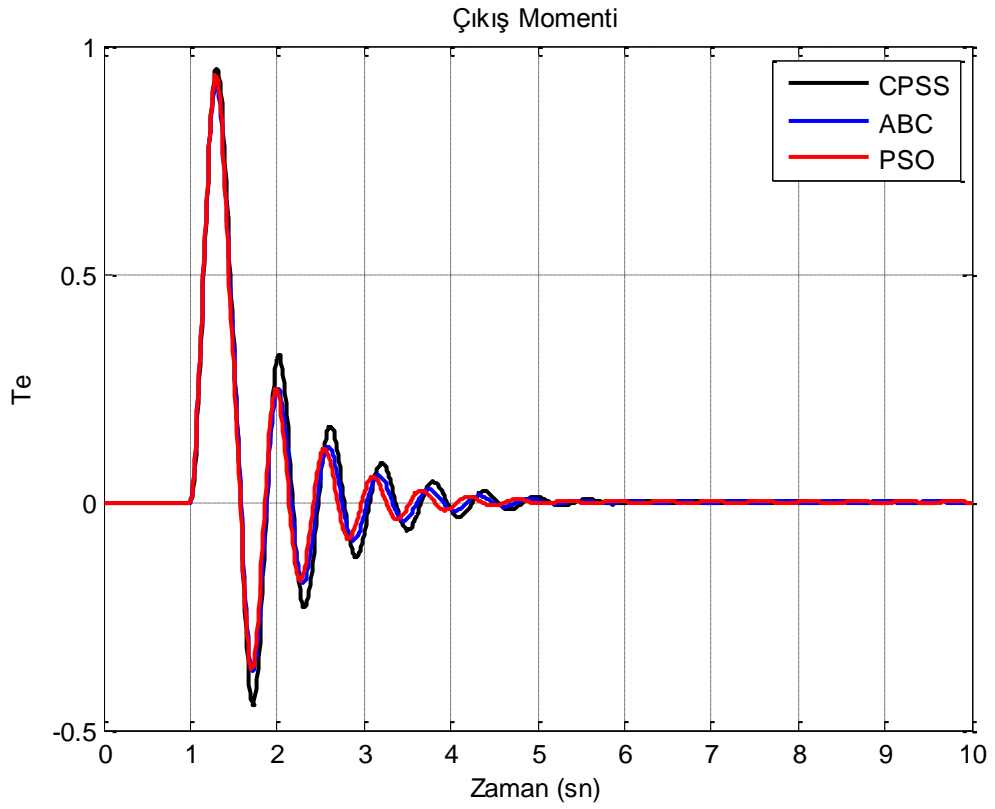
Şekil 4.11: PSO ile belirlenen 'T2', 'Tw' parametrelerinin parçacık hareketleri

PSO ve ABC ile PSS parametreleri belirlenirken en önemli hususlardan biri de uyumluluk fonksiyonunun belirlenmesidir. Bu çalışmada kullanılan uyumluluk fonksiyonu kontrolör performansını da belirlediğimiz IAE yöntemidir. Fakat sistem hatasının ilereyen zamanlarda meydana gelmesinin, sistemin kararsızlığına etkisinin daha fazla olacağı düşünüldüğünden bozucu giriş verildikten 3 saniye sonra IAE değeri 5 ile çarpılmıştır. Uyumluluk fonksiyonu (4.2) denkleminde olduğu gibi formüle edilmiştir.

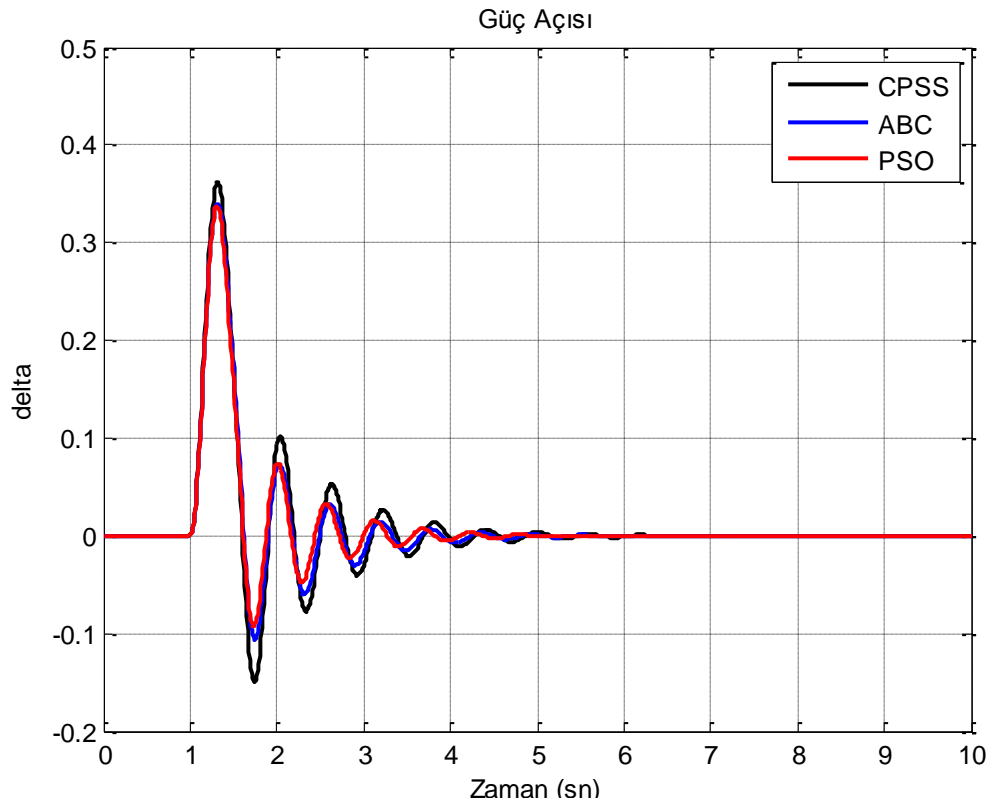
$$F_{\text{hata}} = \begin{cases} \int |e| dt & t < t_{\text{boz}} + 3 \\ 5x \int |e| dt & t \geq t_{\text{boz}} + 3 \end{cases} \quad (4.2)$$



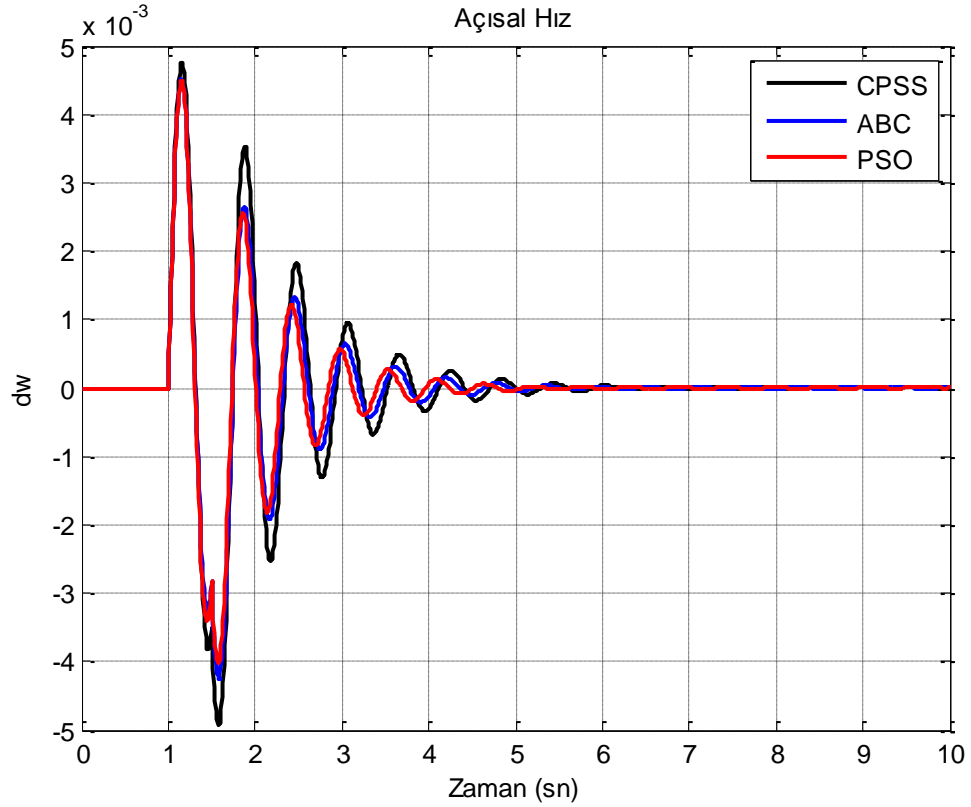
Şekil 4.12: CPSS, ABC-PSS ve PSO-PSS için çıkış gerilimi eğrisinin karşılaştırması



Şekil 4.13: CPSS, ABC-PSS ve PSO-PSS için çıkış momenti eğrisinin karşılaştırması



Şekil 4.14: CPSS, ABC-PSS ve PSO-PSS için güç açısı eğrisinin karşılaştırması

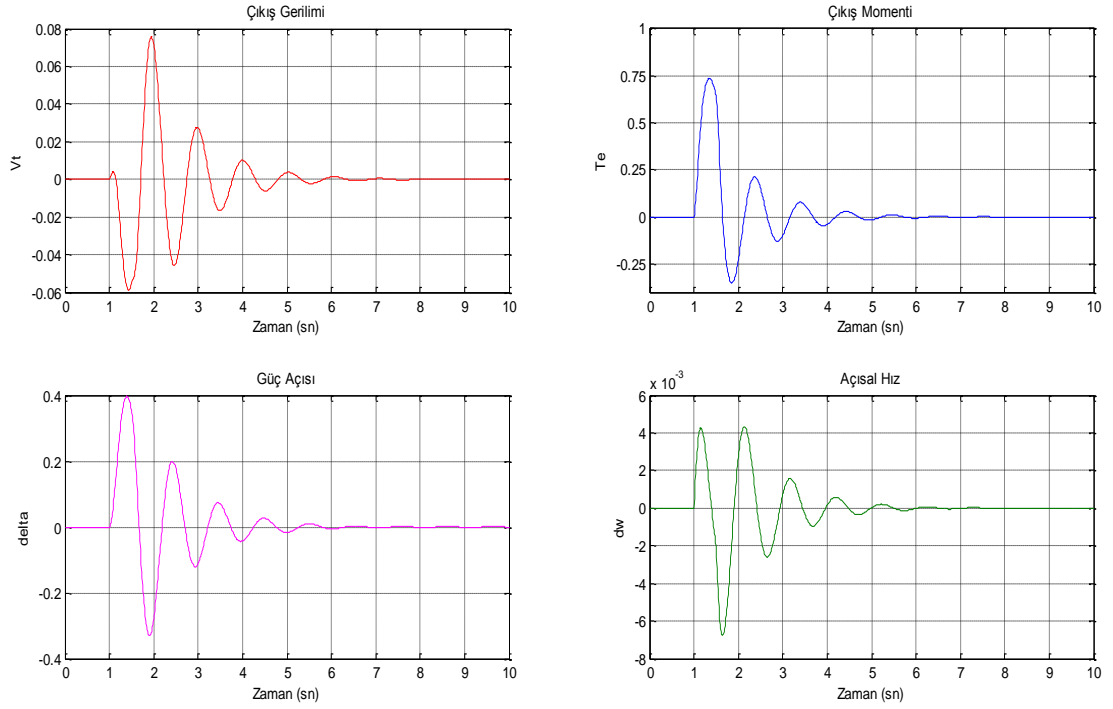


Şekil 4.15: CPSS, ABC-PSS ve PSO-PSS için açısal hız eğrisinin karşılaştırması

ABC ve PSO ile belirlenen PSS parametrelerine ait çıkış gerilimi, çıkış momenti, güç açısı ve açısal hız grafikleri yukarıda verilmiştir (Şekil 4.10-13). Her iki yöntemle belirlenen parametrelerle çalıştırılan güç sisteminin parametre değerleri klasik yöntemle belirlenmiş güç sistemine göre daha iyi sonuçlar verdiği hem grafiksel olarak hem de sayısal olarak gözlenmiştir. ABC-PSS ve PSO-PSS ile çalışan sistemlerin CPSS ile çalışan sisteme göre daha az aşım yaptığı gözlenmiştir. Ayrıca parametreleri bu yöntemlerle belirlenmiş sistemlerin karalı hale daha hızlı geldiği gözlemlenmiştir.

4.3. PID KONTROL YÖNTEMİ İLE GÜÇ SİSTEM MODELİ BENZETİMİ

Bu bölümde CPSS yerine klasik PID kontrolör (K-PID) kullanılarak sistem modelinin benzetimi gerçekleştirilmiştir. PID kontrolörün parametrelerinin oransal (K_p), integral (K_i) ve türevsel (K_d) katsayılarının ayarlanması için Ziegler Nichols ayarlama yönteminin kapalı çevrim tipi (Ziegler Nichols tuning method: closed loop) kullanılmıştır [11]. Daha sonraki aşamalarda kullanılan PID kontrolörün parametreleri PSO ve ABC yöntemleriyle belirlenmiştir. Bu parametrelere göre sistem modellerinin



Şekil 4.17: PID kontrolörlü sistemin benzetim sonuçları

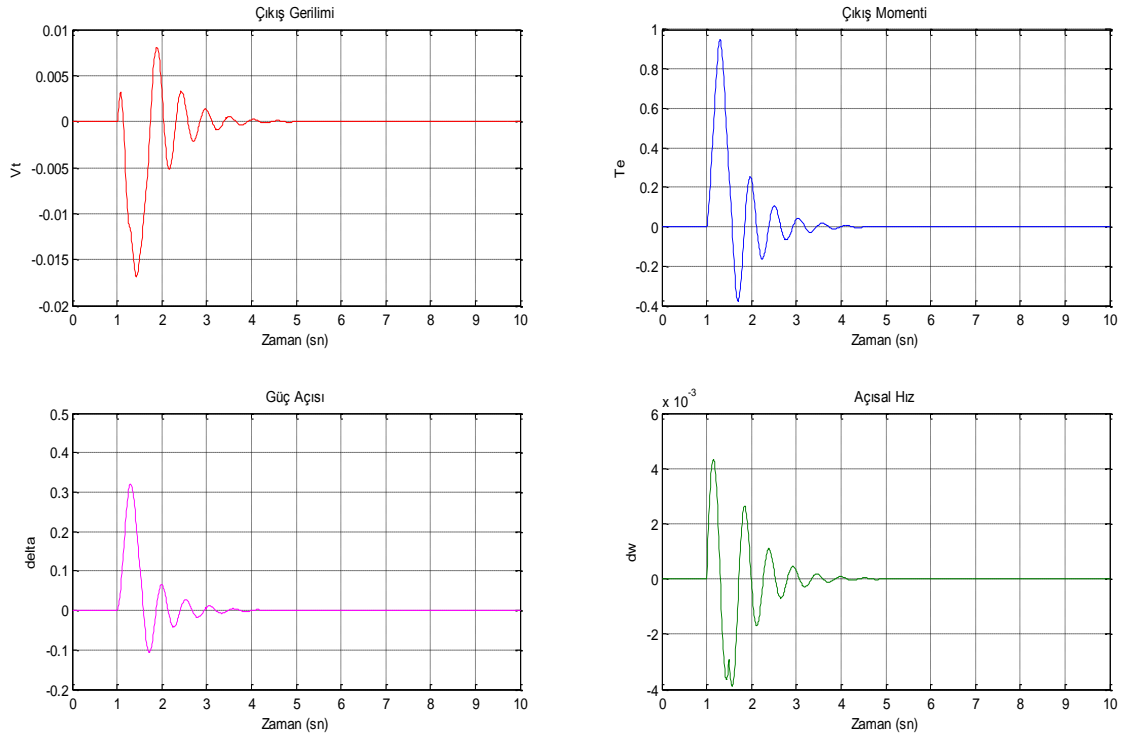
Tablo 4.11: K-PID kontrolörlü sistemin IAE değerleri

	Vt	Te	delta	dw
IAE Değeri	8.447	60.417	43.223	0.654

Parametreleri PSO yöntemiyle belirlenen PID kontrolörün (PSO-PID) değerleri tablo 4.12’de verilmiştir. Bu parametre değerlerine göre sistem modelinin çıkış gerilimi, elektriksel çıkış momentini, güç açısı ve açısal hız grafikleri şekil 4.18’de verilmiştir. Sistem modeline ait IAE değerleri tablo 4.13’te verilmiştir.

Tablo 4.12: PSO-PID Parametreleri

Kp	Ki	Kd	+Vss	-Vss
25.522	33.563	1.388	0.25	-0.25

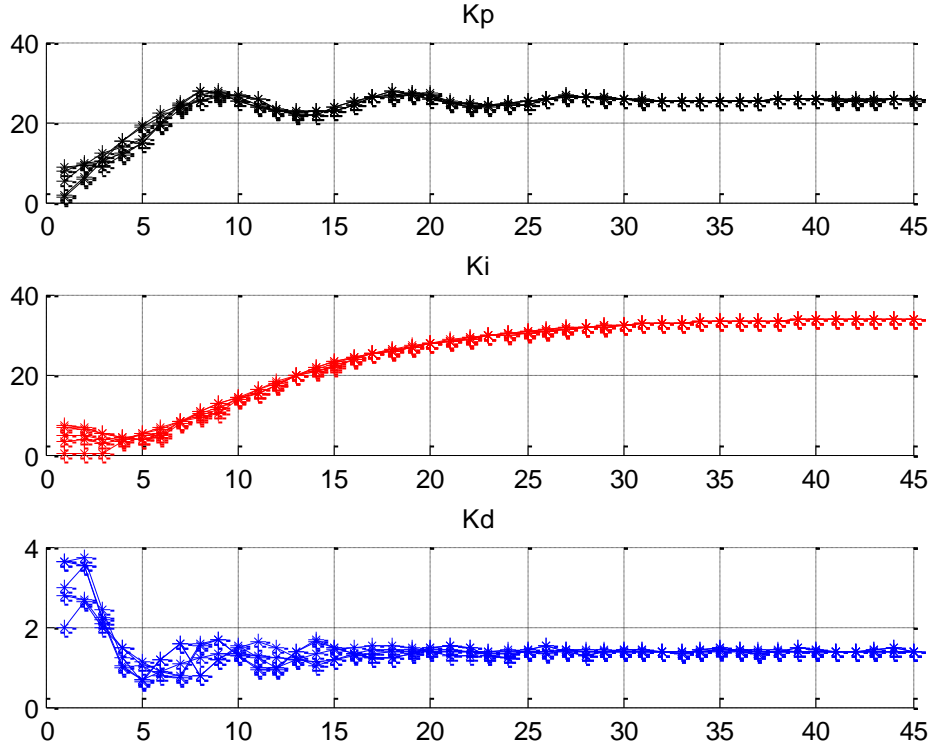


Şekil 4.18: PSO-PID kontrolörlü sistemin elde edilen benzetim sonuçları

Tablo 4.13: PSO-PID kontrolörlü sistemin IAE değerleri

	Vt	Te	delta	dw
IAE Değeri	1.065	47.608	15.344	0.326

Kontrolörün parametrelerinin değerleri belirlenirken PSO algoritmasında 45 iterasyon sonucundaki parçacıkların hareketleri şekil 4.19’da gösterilmiştir. Grafik eğrilerinden de görüldüğü gibi 25. iterasyondan sonra parçacıklar birbirlerine yaklaşmışlar ve belli bir değer aralığında kalmışlardır..

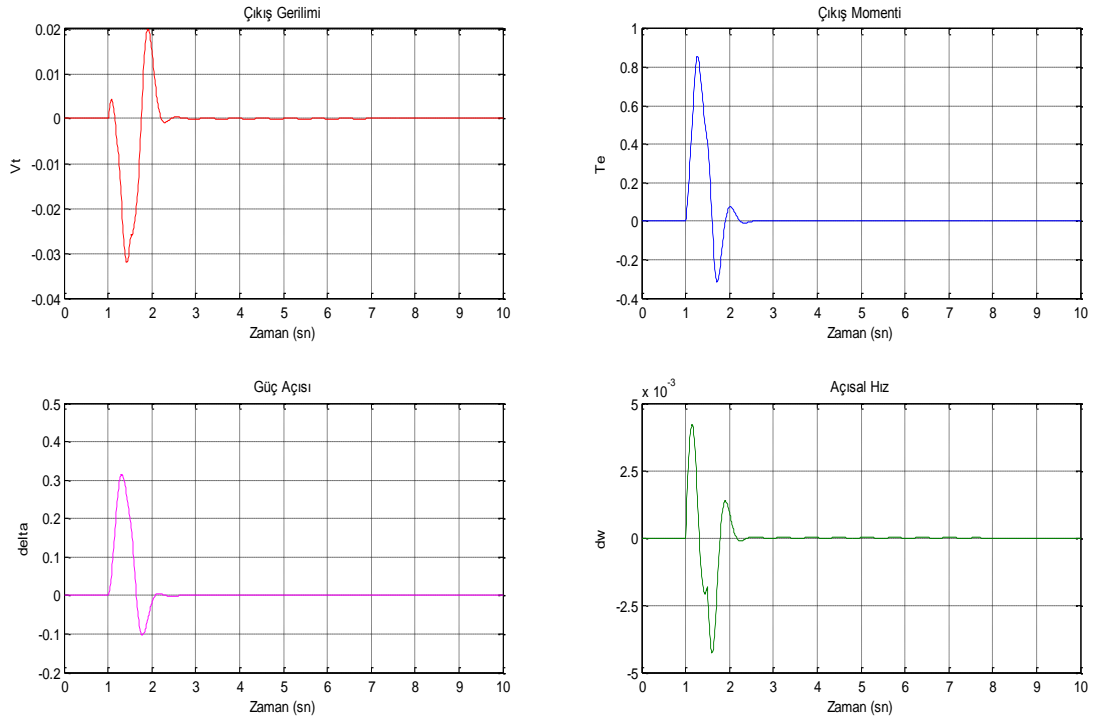


Şekil 4.19: PSO ile belirlenen 'Kp', 'Ki', 'Kd' parametrelerinin parçacık hareketleri

Parametreleri ABC yöntemiyle belirlenen PID kontrolörün (ABC-PID) değerleri tablo 4.18'de verilmiştir. Bu parametre değerlerine göre sistem modelinin çıkış gerilimi, elektriksel çıkış momenti, güç açısı ve açısal hız grafikleri şekil 4.19'da verilmiştir. Sistem modeline ait IAE değerleri tablo 4.15'de verilmiştir.

Tablo 4.14: ABC-PID Parametreleri

Kp	Ki	Kd	+Vss	-Vss
25.441	28.632	2.9776	0.25	-0.25

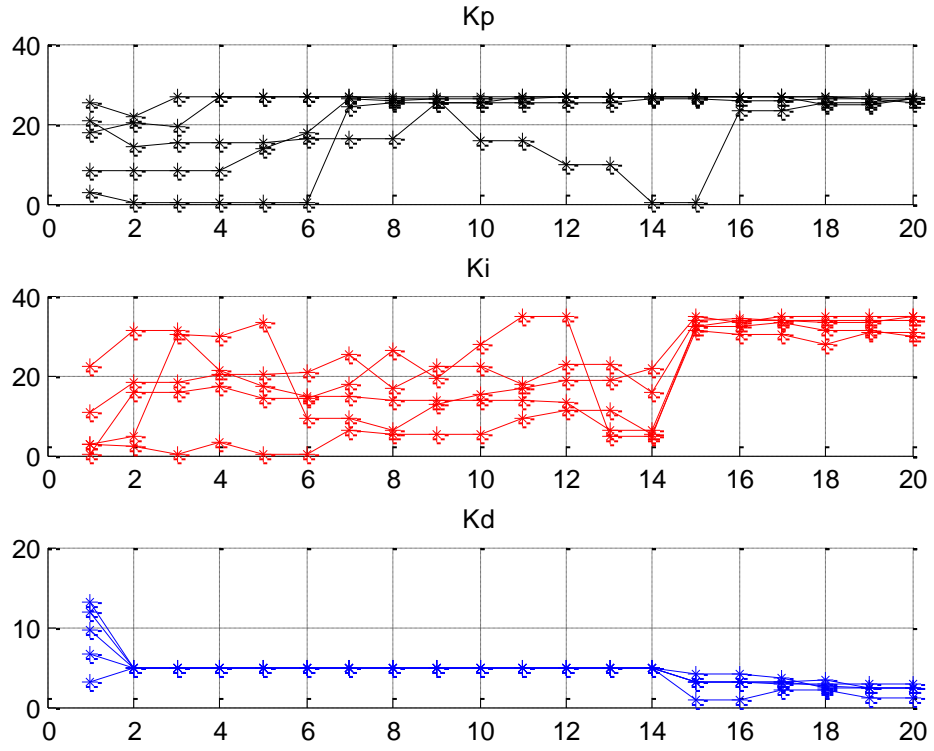


Şekil 4.20: ABC-PID kontrolörlü sistemin elde edilen benzetim sonuçları

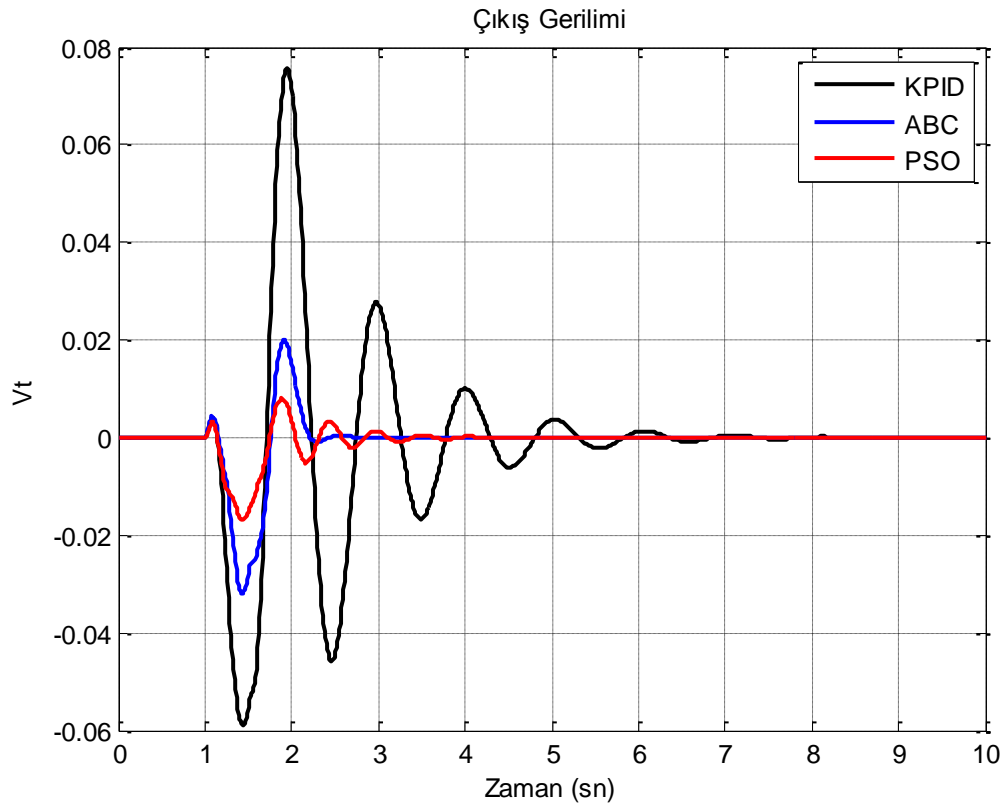
Tablo 4.15: ABC-PID kontrolörlü sistemin IAE değerleri

	Vt	Te	delta	dw
IAE Değeri	1.711	36.58	14.34	0.225

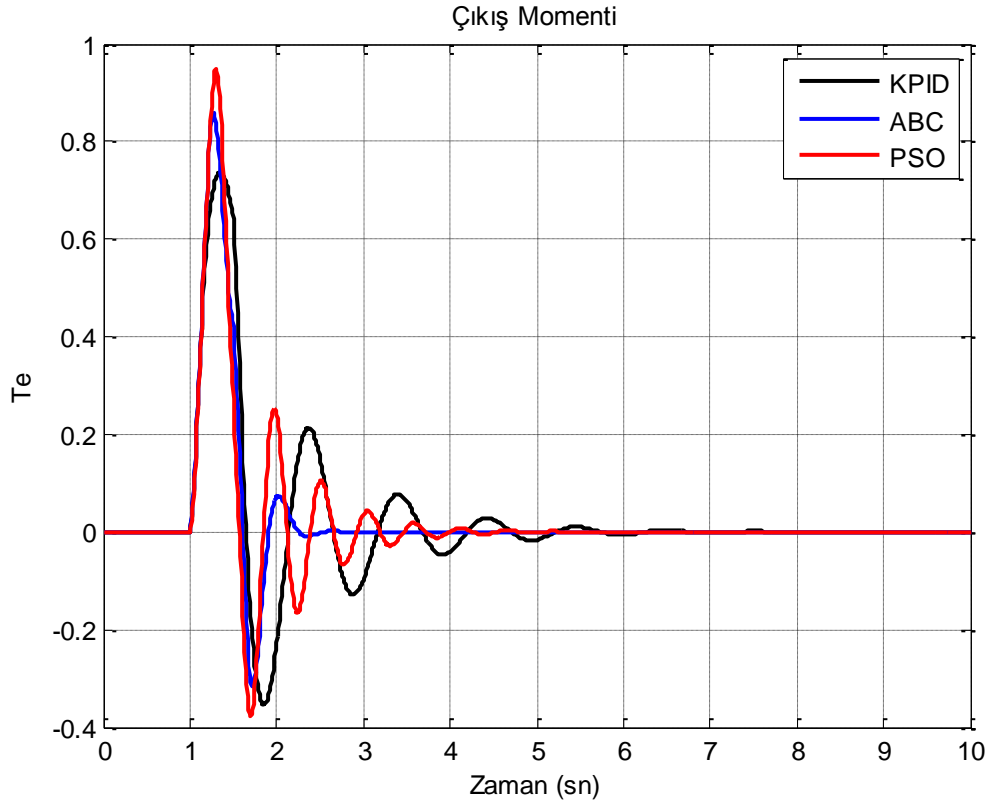
Kontrolörün parametrelerinin değerleri belirlenirken ABC algoritmasında 20 iterasyon sonucundaki parçacıkların hareketleri şekil 4.21’de gösterilmiştir. Grafik eğrilerinden de görüldüğü gibi 15. iterasyondan sonra parçacıklar birbirlerine yaklaşmışlar ve belli bir değer aralığında kalmışlardır..



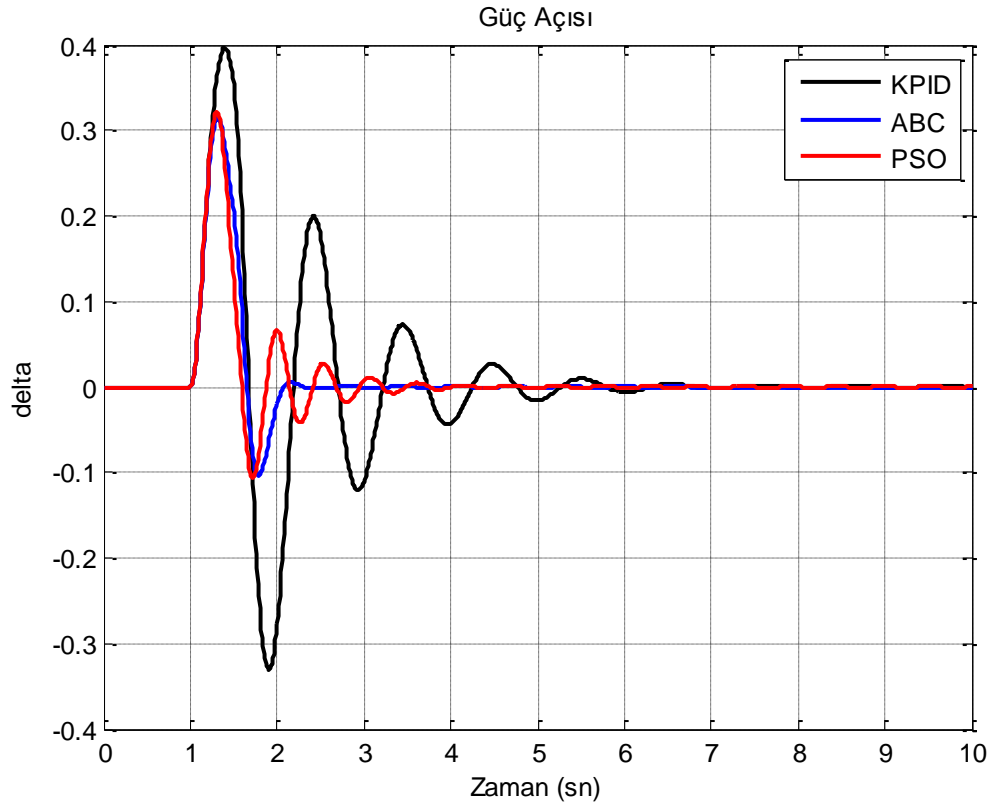
Şekil 4.21: ABC ile belirlenen 'Kp', 'Ki', 'Kd' parametrelerinin parçacık hareketleri



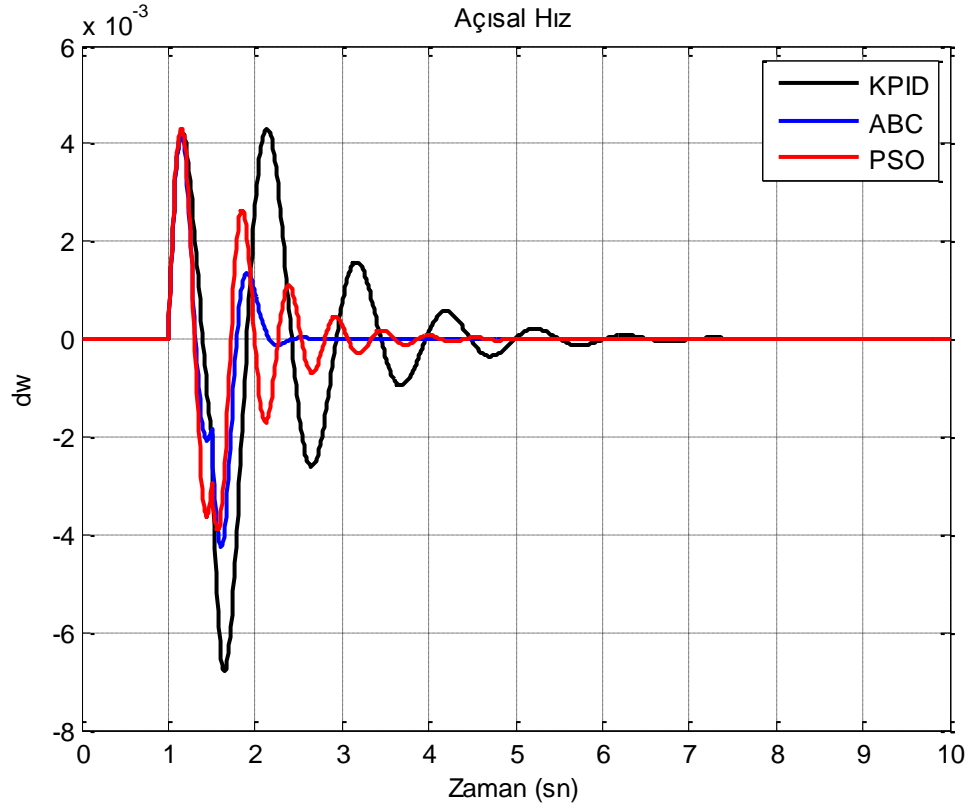
Şekil 4.22: K-PID, ABC-PID ve PSO-PID için çıkış gerilimi eğrisinin karşılaştırması



Şekil 4.23: K-PID, ABC-PID ve PSO-PID için çıkış momenti eğrisinin karşılaştırması



Şekil 4.24: K-PID, ABC-PID ve PSO-PID için güç açısı eğrisinin karşılaştırması



Şekil 4.25: K-PID, ABC-PID ve PSO-PID için açısal hız eğrisinin karşılaştırması

ABC ve PSO ile belirlenen PID parametrelerine ait çıkış gerilimi, çıkış moment, güç açısı ve açısal hız grafikleri aşağıda verilmiştir (Şekil 4.22-25). Her iki yöntemle belirlenen parametrelerle çalıştırılan güç sisteminin parametre değerleri klasik yöntemle belirlenmiş güç sistemine göre daha iyi sonuçlar verdiği hem grafiksel olarak hem de sayısal olarak gözlenmiştir. ABC-PID çalışan sistemin çıkış gerilimi eğrisi (Şekil 4.20) hariç diğer çıkış eğrilerinde PSO-PID ile çalışan sisteme göre daha az aşım yaptığı gözlenmiştir. Ayrıca parametreleri bu yöntemlerle belirlenmiş sistemlerin karalı hale daha hızlı geldiği gözlemlenmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada karmaşık nonlineer sistemler olan güç sistemlerinin benzetimi 'Matlab/Simulink' ortamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada uygulanan tek makinalı sonsuz baraya bağlı sistemin (SMIB) modeli literatürde daha önceden yapılan çalışmalardan faydalanılarak oluşturulmuştur.

Güç sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan olumsuz çalışma koşulları ve artan karmaşıklıktan dolayı bu sistemlerin kararlılığıyla ilgili çalışmalara ilgi artmaktadır. Güç sistemlerinin dinamik dengesini geliştirmek için ek uyartım kontrol sinyalleri oluşturan kontrol elemanlarından yararlanılmıştır. Bu açıdan kullanılan kontrol elemanlarının parametrelerinin belirlenmesi büyük bir önem arz etmektedir.

Ele alınan güç sisteminde iki farklı tipte kontrol elemanı kullanılarak, oluşturulan bozucu girişe karşılık sistemin dinamik davranışı incelenmiştir. Parametrelerinin değerleri, klasik yöntemlerle belirlenen PSS ve PID kontrolörlerin sistemin mekanik güç girişine verilen bozucu etki sebebiyle meydana gelen rotor açısı salınımlarını söndürmede başarılı olduğu gözlenmiştir. Ancak parametre değerleri klasik yöntemlerle belirlenen kontrolörlerin generatör uç gerilimi ve rotor açısı salınımlarının fazla olduğu gözlenmiştir.

Kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde son yıllarda üzerinde oldukça fazla çalışma yapılan sürü zekasına dayalı optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmada sürü zekasına dayalı iki farklı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bunlar kuş sürülerinin sosyal davranışlarını esas alarak oluşturulan 'Parçacı Sürüsü Optimizasyonu (PSO)' ve arıların besin toplarken sergiledikleri davranışları esas alan 'Yapay Arı Kolonisi (ABC)' yöntemleridir.

Bir önceki bölümde verilen grafiklerde (Şekil 4.12-15, Şekil 4.22-25) görüldüğü üzere ABC ve PSO yöntemleri PID ve PSS parametrelerinin değerlerini belirlemede oldukça başarılı olmuştur. Her iki yöntemle belirlenen parametreler farklı tipteki kontrolörlerde klasik yöntemle belirlenen parametre değerlerine göre maksimum aşımaları daha az olmuştur kararlı hale gelme süreleri kısalmıştır.

Grafiklerde gözlenen sonuçlar hata sinyallerinin sayısal olarak incelenmesinde de ortaya çıkmıştır. PID parametrelerinin değerlerinin belirlenmesinde ABC yöntemi daha başarılı olurken PSS parametrelerinin değerlerinin belirlenmesinde PSO yöntemi nispi olarak daha başarılı sonuçlar vermiştir.

Çalışmada kullanılan ABC ve PSO algoritmaları güç sisteminin çıkış gerilimini optimize etmek üzerine tasarlanmış olmasına rağmen sistemin çıkış momenti, güç açısı ve açısal hız eğrilerinin de klasik yöntemle belirlenen parametrelere göre daha az aşım yapmış olduğu ve kararlı hale gelme sürelerinin daha az olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışmada ABC ve PSO algoritmaları yazılırken uyumluluk fonksiyonu olarak hatanın mutlak değerinin integrali (IAE) kullanılmıştır. Uyumluluk fonksiyonunun belirlenmesinin sistemin verimi konusunda çok önemli olduğu yapılan tez çalışması sırasında gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. ANDERSON, P. M. and FOUAD, A. A., 1994, *Power System Control and Stability*, IEEE Pres, New Jersey,0-471-23862-7.
2. KUNDUR, P., 1994, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 0-07-035958.
3. CANER, M., 2006, *Hiyerarşik Fuzzy Yöntemiyle Senkron Generatörlerde Uyartım Kontrolü*, Doktora, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
4. ERDEM, A., 2007, *Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolör Yardımı ile Güç Sistemi Kararlı Kılıcı Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
5. TACER, M. E., 1990, *Enerji Sistemlerinde Kararlılık*, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.
6. DEMİRÖREN, A. ve ZEYNELGİL, H. L., 2004, *Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 975-511-305-3.
7. KOCAARSLAN, İ. ve ÇAM, E., 2005, Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load-frequency control, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 27(8), 542-549
8. ÇAM, E. ve KOCAARSLAN, İ., 2005, A fuzzy gain scheduling PI controller application for an interconnected electrical power system, *Electric Power Systems Research*, 73(3), 267-274
9. ONG, Chee-Mun, 1997, *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink*, Prentice Hall PTR, 013-7237-855 .
10. MACHOWSKI, J., BIALEK, J., ve BUMBY, J.R., 1997, *Power Systems Dynamics and Stability*, John Wiley & Sons; 1 edition, 978-0-470-72558-0.
11. STOT, B., 1979, Power System Dynamic Response Calculations, *Proc. IEEE*, 67, 219-241.
12. IEEE Committee Report, 1968, Computer Representation of Excitation Systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, Vol.PAS-87, No.6, pp.1460-1464, June.

13. IEEE Committee Report, 1981, Excitation System Models for Power System Stability Studies, *IEEE Trans.*, Vol. PAS-100, pp.494-509, February.
14. IEEE Standart 421.5-1992, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.
15. PADIYAR K.R., 2004, *Power System Dynamics Stability and Control*, Anshan Limited, Yeni Delhi, 1-904798-01-2,
16. ROGERS, G., 1999, *Power System Oscillations*, Kluwer Academic Publishers, Springer; 1 edition.
17. BOURLES H., Peres S., Margotin T., ve Houry M.P., 1998, Analysis and Design of A Robust Coordinated AVR/PSS, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.13, No.2, pp.568-573.
18. BONABEAU, E., THERAULAZ, G., 2000, Swarm Smarts, *Scientific American Inc.*, pp. 72-79
19. V., T., 2000, Reaction-Diffision Model of a Honeybee Colony's Foraging Behaviour, *PPSN VI: Proceedings of the 6th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, Springer-Verlag, London
20. AKAY, B., 2009, *Nümerik Optimizasyon Problemlerinde Yapay Arı Koloisi (Artificial Bee Colony) Algoritmasının Performans Analizi*, Doktora, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
21. LUCIC, P., 2002, *Modeling Transportation Problems Using Concepts Of Swarm Intelligence And Soft Computing*, Ph.D. Thesis, Virginia Polytecnic Institute And State University.
22. KENNEDY, J., EBERHART, R., 1995, Particle swarm optimization. *9Neural Networks, 1995. Proceeding IEEE Conference on Nov/Dec, 1942-1948.*
23. REYNOLDS, C., 1987, Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model, *Computer Graphics*, 14(21), 25-34.
24. BOYD, R., RECHARSON, P., 1985, Culture and the evolutionary process, *University of Chicago Press.*
25. KENNEDY, J., RUSSEL, R.C., SHI, Y., 2001, Swarm Intelligence, *The Morgan Kaufmann Series Evolutionary Computation.*
26. SHI, Y., EBERHART, R.C., 1998, A modified particle swarm optimizer, *Proceeding of the IEEE Internation Conference on Evolutionary Computation*, 69-73.

27. CLERCK, M., 1999, The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization, *Proceedings of the Conference on Evolutionary Computation*, 1951-1957.
28. OI, A., NAKAZAWA, C., MATSUI, T., FUJIWARA, H., MATSUMOTO, K., NISHIDA, H., 2008, PID Optimal tuning method by Particle Swarm Optimization, *SICE Annual Conference*, 3470-3473.
29. KNOSPE, C., 2006, PID Control, *IEEE Control Magazine*, 30-31.
30. WANG, Y.B., XIN, P., BEN-ZHENG, W., 2008, A new particle swarm optimization based auto tuning of PID controller, *Proceedings of the Seventh International Conference on 08/2008 Machine Learning and Cybernetics*, 1818-1823.
31. LI, H-X., ve TSO, S.K., 2000, Quantitative design and analysis of fuzzy proportional integral derivative control a step towards autotuning, *Taylor&Francis, International Journal of Systems Science*, volume 31,number 5, pages 545-553.
32. GUPTA R., BANDYOPADHYAY B., KULKARNI A.M., 2003, Design Of Power System Stabilizer For Single Machine System Using Robust Fast Output Sampling Feedback Technique , *Electric Power Systems Research*, 65, 247-257

ÖZGEÇMİŞ

Emrah BAL 27 Ekim 1984'te İstanbul'da doğdu. İlkokul öğrenimini Özel Kültür İlkokulu'nda tamaladıktan sonra, ortaokul ve lise öğrenimini Cağaloğlu Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2003 yılında girdiği K.T.Ü. Elektrik Elektronik Mühendisliği Lisans Programı'nı 2008 yılında tamamladı. 2009 yılında İstanbul Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği'nde lisansüstü eğitimine başladı.