

**YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI TABANLI KARARLI GÜÇ
SİSTEMİ DENGELİYİCİSİ TASARIMI**

İbrahim EKE

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2011
ANKARA**

İbrahim EKE tarafından hazırlanan YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI
TABANLI KARARLI GÜÇ SİSTEMİ DENGELİYİCİSİ TASARIMI adlı bu tezin
Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim
Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. İlhan KOCAARSLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Üniversitesi

Prof.Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof.Dr. M. Sezai DİNÇER

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç.Dr. M. Ali AKÇAYOL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Fırat HARDALAÇ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 17/02/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini
onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İbrahim EKE

YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI TABANLI KARARLI GÜÇ SİSTEMİ Dengeleyicisi TASARIMI

(Doktora Tezi)

İbrahim EKE

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Şubat 2011

ÖZET

Bu tez çalışmasında tek makineli sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratörde oluşan salınımları sönümlemede kullanılan güç sistemi dengeleyicisinin parametrelerinin ayarlanması ile ilgili teknikler sunulmuştur. Güç sisteminin doğrusal olmayan modelinin belirli bir çalışma noktası için doğrusallaştırılması sağlanmıştır. Heffron-Phillips modeli temel alınarak güç sistemine eklenen güç sistemi dengeleyicisinin çeşitli girişler ile salınımları sönümlemede kullanılması gerçekleştirilmiştir. Son zamanlarda diferansiyel evrim ve parçacık sürüsü optimizasyonu gibi küresel optimizasyon teknikleri güç sistemi dengeleyicisi çalışmalarında uygulanmaya başlanmış olup mevcut çalışmada güç sistemi dengeleyicisi parametrelerinin en uygun seçimi için yeni bir öneri sunulmuştur. Temelde dayanıklı güç sistemi dengeleyicisi tasarımı çok değişkenli optimizasyon problemi gibi formülize edilip yapay arı koloni algoritması ile çözümü sağlanmıştır. Önerilen yapay arı kolonisi algoritması tabanlı güç sistemi dengeleyicinin geçerliliği çeşitli çalışma koşullarında tek makine güç sisteminde test edilmiş ve farklı bozucu girişlerle geçerliliği gösterilmiştir. Parametre ayarı kontrol sinyalinin bozunumlarında diferansiyel evrim, parçacık sürüsü optimizasyonu ve yapay arı koloni algoritması ile oturma zamanının ve aşım miktarının minimize edilmesi ile sağlanmıştır. Ayrıca aşım miktarının azalımı sönümlenin artmasına neden olmakla beraber sistemin hızlı cevap verme zamanı ile izin verilebilir aşım miktarı arasındaki durum optimize

edilmiştir. Yapay arı kolonisi algoritma tabanlı güç sistemi dengeleyicinin sonsuz baraya bağlı senkron jeneratörün farklı çalışma koşulları altında iyi bir sönümleme gözlenmiştir. İlave olarak uygulanan yöntemin etkinliğini analiz etmek amacıyla DE ve PSO tabanlı güç sistemi dengeleyicileri ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin salınımları sönümlemede daha hızlı cevaplar ürettiği gözlenmiştir. Önerilen kontrolör durağan ve farklı çalışma bölgesinde değişmeyen parametre değerleri ile salınımları sönümlemede daha başarılı olduğu gösterilmiştir.

Bilim Kodu : 905.1.150
Anahtar Kelimeler : Sonsuz güçlü bara sistemi, güç sistemi dengeleyicisi, diferansiyel evrim algoritması, parçacık sürüsü optimizasyonu, yapay arı kolonisi algoritması.
Sayfa Adedi : 122
Tez Yöneticisi : Prof.Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

**DESIGN OF ROBUST POWER SYSTEM STABILIZER BASED ON
ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITHM**

(Ph.D. Thesis)

İbrahim EKE

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

February 2011

ABSTRACT

In this thesis, the techniques for a generalized parameter tuning of power system stabilizer to damp the oscillatory modes of generator connected to a single machine infinite bus system is presented. A linear dynamic model is obtained by linearizing the nonlinear model for a power system around an operating point. On the basis of linearized Heffron-Phillips model, a PSS is installed to the power system. The damping function of the PSS with various alternative PSS control signals are investigated. The global optimization techniques such as differential evolution, particle swarm optimization have been applied for the optimization of PSS parameters. A new approach for the optimal design of PSS parameter is investigated and the problem of a robust PSS design is formulated as a multi objective optimization problem and Artificial Bee Colony Algorithm is used to solve it. The effectiveness of the proposed Artificial Bee Colony Algorithm based Power system stabilizers is tested on a single machine power system under different operating conditions and also results are demonstrated through several disturbances. The tuning scheme proposed in this study uses the Differential Evolution, Particle Swarm Optimization and Artificial Bee Colony technique that minimizes settling time and overshoot as well as the control signal violation. Minimizing the overshoot is equivalent to increasing system damping. Moreover a necessary compromise between swiftness of response and allowable overshoot is achieved. The robustness and

avoiding conservatism in design, the maximum overshoot is selected to be the worst over wide range operation. It is found that designed robust controller, Artificial Bee Colony Algorithm based Power System Stabilizer provides better damping enhancement for various operating points of single machine system connected to an infinite bus. In addition, the applied method compared with the conventional PSS, the Differential Evolution based Power System Stabilizer and the Particle Swarm Optimization based Power System Stabilizer to analyze the effectiveness of the model. Where as, the proposed controller gains are static and one controller structure is able to damp out the oscillations for different operation points. The proposed method results showed better response behaviour to damp out the oscillations.

Science Code : 905.1.150

Key Words : Single machine infinite bus system, power system stabilizer, differential evolution, particle swarm optimization, artificial bee colony algorithm.

Page Number: 122

Adviser : Prof.Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım süresince değerli yardım ve katkılarından dolayı tez hocam Sayın Prof.Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na, tez çalışmaları süresince bilgi birikimi ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın Prof.Dr. İlhan KOCAARSLAN'a ayrıca her tez izleme komitesi sonrası çalışmalarımı yönlendirici olmuş Sayın Prof.Dr. M. Sezai DİNÇER'e ve Yrd.Doç.Dr. Fırat HARDALAÇ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarına doğrudan veya dolaylı olarak katkıda bulunan çalışma arkadaşlarıma özellikle de Dr. Süleyman Sungur TEZCAN'a teşekkür ederim.

Dünyaya ilk gözlerimi açtığım andan itibaren hayata dair tüm güzellikleri ile yanımda olan varlık sebebim anneciğim ve babacığım Hatun ve Abdullah EKE'ye teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca manevi olarak sevgilerini her zaman yanımda hissettiğim rahmetli dedem Mevlüt EKE ve babaannem Fatma EKE'ye sonsuz rahmet dilerim.

Çalışmalarım sırasında sabırla ve bütün desteği ile hep yanımda olan aşkı ve sevdası gönlümde bir ömür boyu biz olmaya söz verdiğim biricik eşim, her şeyim Neslihan EKE'ye sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
1. GİRİŞ	1
2.1. Güç Sistemi Kararlılığı	7
2.1.1. Rotor açısı kararlılığı	9
2.1.2. Gerilim kararlılığı.....	19
2.1.3. Frekans kararlılığı	19
3. SENKRON MAKİNELER	20
3.1. Senkron Makinenin Dinamik Modellenmesi	21
3.2. Senkron Makine Modelinin Basitleştirilmesi	24
3.2.1. Park dönüşüm matrisi.....	24
3.2.2. Rotor referans çevre dönüşümü	25
3.3. Tek Makine Sonsuz Güçlü Bara Sistemi	29
3.3.1. Salınımların klasik model aracılığı ile incelenmesi	29
3.3.2. Senkron jeneratörün basitleştirilmiş modeli	33
3.4. Senkron Jeneratör Uyarım Sistemleri	39
3.4.1. DA tipi uyarım sistem modelleri.....	40
3.4.2. ST tipi uyarım sistem modelleri.....	40
3.5. Güç Sistemi Dengeleyicisi (Power System Stabilizer PSS)	41
3.5.1. Güç sistemi dengeleyicisi çeşitleri.....	44
4. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI	46
4.1. Diferansiyel Evrim Algoritması (Differential Evolution, DE)	46
4.1.1. Diferansiyel evrim algoritması terimleri.....	47
4.1.2. Popülasyon yapısı ve parametre sınırları	48

Sayfa

4.1.3. Mutasyon.....	49
4.1.4. Çaprazlama.....	53
4.1.5. Seçim.....	55
4.2. Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması	57
4.2.1. Parçacık sürüsü optimizasyon algoritması terimleri	58
4.2.2. Parçacık sürüsü optimizasyon algoritmasının işleyişi	59
4.3. Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony, ABC) Algoritması	62
4.3.1. Bal arısı kolonisi'nin davranışları	64
4.3.2. Bal arısı kolonisi modeli	65
4.3.3. Yapay arı kolonisi algoritmasının işleyişi.....	66
5. BENZETİM ÇALIŞMALARI	68
5.1. Geleneksel Güç Sistemi Dengeleyicisi	68
5.2. Sezgisel Yöntemler İle GSD Parametre Ayarı.....	69
5.3. GSD Parametre Ayarı Benzetim Çalışmaları.....	71
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	98
KAYNAKLAR.....	101
EKLER.....	105
EK-1. Güç Sistem Parametrelerinin Hesaplanması.....	106
EK-2. Diferansiyel Evrim Algoritması MATLAB Kodu.....	110
EK-3. Parçacık Sürüsü Algoritması MATLAB Kodu.....	112
EK-4. Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu.....	118
ÖZGEÇMİŞ.....	122

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. IEEE uyarıcı modelleri	40
Çizelge 5.1. Güç sistem dengeleyicisi parametre aralıkları	68
Çizelge 5.2. Algoritmalarda (ABC, PSO ve DE) kullanılan değişkenler	71

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Güç sistem kararlılığı sınıflandırılması.....	8
Şekil 2.2. Güç sistem yapısı	11
Şekil 2.3. Basitleştirilmiş güç sistem yapısı.....	12
Şekil 2.4. Vektör diyagramı	12
Şekil 2.5. Güç iletme karakteristiği.....	13
Şekil 3.1. Senkron makine rotor ve stator devreleri.....	21
Şekil 3.2. Senkron jeneratör d-q eksen eşdeğer devreleri	26
Şekil 3.3. X_e reaktansı üzerinden sonsuz baraya bağlı senkron jeneratör	29
Şekil 3.4. Senkronizasyon ve sönümlleme momenti etkisi.....	31
Şekil 3.5. Doğrusallaştırılmış TMSGB modeli	38
Şekil 3.6. GSD ve senkron jeneratör bağlantısı	42
Şekil 3.7. GSD parametre blok diyağramı	42
Şekil 4.1. Tek-nokta çaprazlama ile deneme vektörünün oluşturulması	54
Şekil 4.2. 3-nokta çaprazlama ile deneme vektörünün oluşturulması.....	54
Şekil 4.3. DE için üstel çaprazlama ile deneme vektörünün oluşturulması.....	55
Şekil 5.1. Durum 1 için rotor hız değişimi.....	73
Şekil 5.2. Durum 2 için rotor hız değişimi.....	74
Şekil 5.3. Durum 3 için rotor hız değişimi.....	75
Şekil 5.4. Durum 4 için rotor hız değişimi.....	76
Şekil 5.5. Durum 5 için rotor hız değişimi.....	77
Şekil 5.6. Durum 6 için rotor hız değişimi.....	78

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Durum 7 için rotor hız değişimi.....	79
Şekil 5.8. Durum 8 için rotor hız değişimi.....	80
Şekil 5.9. Durum 9 için rotor hız değişimi.....	81
Şekil 5.10. Durum 10 için rotor hız değişimi.....	81
Şekil 5.11. Durum 11 için rotor hız değişimi.....	82
Şekil 5.12. Durum 12 için rotor hız değişimi.....	83
Şekil 5.13. Durum 13 için rotor hız değişimi.....	83
Şekil 5.14. Durum 14 için rotor hız değişimi.....	85
Şekil 5.15. Durum 15 için rotor hız değişimi.....	85
Şekil 5.16. Durum 16 için rotor hız değişimi.....	86
Şekil 5.17. Durum 17 için rotor hız değişimi.....	87
Şekil 5.18. Durum 18 için rotor hız değişimi.....	87
Şekil 5.19. Durum 19 için rotor hız değişimi.....	88
Şekil 5.20. Durum 20 için rotor hız değişimi.....	89
Şekil 5. 21. Durum 21 için rotor hız değişimi.....	89
Şekil 5.22. Durum 22 için rotor hız değişimi.....	90
Şekil 5.23a. Durum 23a için rotor hız değişimi	91
Şekil 5.23b. Durum 23b için rotor hız değişimi.....	92
Şekil 5.24a. Durum 24a için rotor hız değişimi	93
Şekil 5.24b. Durum 24b için rotor hız değişimi.....	93
Şekil 5.25a. Durum 25a için rotor hız değişimi	94
Şekil 5.25b. Durum 25b için rotor hız değişimi.....	95
Şekil 5.26a. Durum 26a için rotor hız değişimi	96

Şekil**Sayfa**

Şekil 5.26b. Durum 26b için rotor hız değişimi	96
--	----

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
V_s	Sonsuz güçlü bara gerilimi
X_T	Transformatörün endüktif reaktansı
X_e	Sonsuz güçlü baraya kadar olan endüktif reaktansı
$\Delta\omega$	Rotor hız değişimi
$\Delta\delta$	Rotor açısı değişimi
J	Atalet momenti
J	Performans indeksi
H	Atalet sabiti
T_{d0}	d eksenli geçici hal açık devre zaman sabiti
T_d	d eksenli geçici hal kısa devre zaman sabiti
T'_{d0}	d eksenli geçici hal öncesi açık devre zaman sabiti
L_d	d eksenli geçici hal öncesi endüktansı
$L_{lk d}, L_{m d}$	d eksenli endüktansları
$L_{lk q}, L_{m q}$	q eksenli endüktansları
T_{qd0}	Dönüşüm matrisi
x'_d	d eksenli geçici reaktansı
r_e	iletim hattı direnci
x_e	iletim hattı empedansı
T_e	Elektrik momenti
T_a	Tahrik momenti
K_1-K_6	Senkron jeneratör doğrusal model sabitleri
K_A	Uyarıcı kazancı

Simgeler**Açıklama** **T_A**

Uyarıcı zaman sabiti

 K_D

Sönümle momenti katsayısı

 K_S

Senkronlama momenti katsayısı

1. GİRİŞ

Günümüzde, enerji ihtiyacının her geçen gün artması ve enerji kaynaklarının giderek azalması enerjiyi verimli şekilde kullanmayı gerektirir. Elektrik enerjisinin son tüketiciler ve endüstriyel alıcılar için dünyada en fazla ihtiyaç duyulan ürünlerden birisi durumuna gelmiş olması enerji ihtiyacının sürekli ve kesintisiz bir şekilde ve düşük maliyetlerde karşılanabilmesi için daha güvenilir ve büyük enterkonnekte güç sistemlerine ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır.

İzole edilmiş küçük güç sistemleri, normal çalışma koşullarında büyük güç sistemlerine göre daha kararlı olmakla birlikte, sürekli artan yük ihtiyaçlarını karşılayamamakta ve bir arıza durumunda kolaylıkla çökebilmektedir. Diğer yandan bir arıza durumunda gerekli gücün başka kaynaklardan sağlanabilmesine olanak tanıyan büyük enterkonnekte sistemleri daha güvenilir olmakla birlikte, önemli kararlılık sorunları gösterir. Güç sistemlerinde kararlılık, bir bozucu etkiye maruz kalan sistemin, bu etki sonrasında bozucu etki öncesindeki çalışma koşullarına tekrar dönme yeteneği anlamındadır.

Güç sistemlerinin doğası gereği, sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratörler çok değişken bir yük karakteristiğine sahiptirler. Bir güç sisteminde normal çalışma anında sisteme ilave yük girmesi veya sistemden yük çıkması, güç sisteminde düşük genlikli ve düşük frekanslı, (0.2 - 3.0 Hz), salınımlara sebep olur. Düşük genlikte ve frekanstaki güç salınımlarının çok uzun periyotlarda devam etmesi enterkonnekte sistemde güç iletimini sınırlandıracak boyutlara varmasına hatta sistemin çökmesine neden olmuştur [1]. Güç sistemlerinde oluşabilecek bozucu etkiler sonucu mekanik ve elektriksel güç dengesinin bozulması durumunda sistemin açısal kararlılığını koruyabilmesi için öncelikle yeterli senkronizasyon momentinin üretilmesi gerekir. Gerilim regülatörünün de senkronlayıcı momente katkısıyla bu salınım söndürülerek senkron makine senkronizmada kalır. Güç sistemi büyük bir bozucu etkiyle karşılaştığı zaman ise senkronlayıcı moment yetersiz kalabilir. Yeterli sönüm momentinin üretilmesi için senkron makineye güç sistemi dengeleyicisi (power system stabilizer, PSS, GSD) eklenir. 1960'ların ortalarından itibaren güç sistemi

dengeleyicileri, senkronlayıcı momente ek olarak sönüm momenti sağlamak amacıyla, gerilim regülatörü girişine ek bir gerilim işareti uygulamaktadırlar [2].

Güç sistemlerinde görülen bu salınımların sönümlenmesi ve güç sisteminin sürekli hal kararlılığının iyileştirilmesi için çeşitli araştırmacılar tarafından çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların temelini oluşturan Heffron-Phillips, GSD tasarımı ve düşük genlikli salınımların senkron makinede incelenmesi için tek makine sonsuz güçlü bara (single machine infinite busbar, SMIB) sistemini önermişlerdir [3]. Heffron-Phillips, hem doğası hem de yapısı gereği doğrusal olmayan GSD için güç sisteminin doğrusallaştırılmış modelini kullanılarak güç sisteminde seçilen çalışma noktası için analizler yapmışlardır. Bu modele dayalı çalışmaların en önemlilerinden biriside Larsen ve Swann'ın geleneksel güç sistemi dengeleyicisi tasarımı ve teorisine ilişkin yapmış oldukları çalışmalarıdır. Larsen ve Swann ilk çalışmalarında GSD girişlerine uygulanan parametreler, hız, frekans ve güç olarak ifade etmektedirler. Ayrıca basitleştirilmiş tek makine sonsuz güçlü bara sistemi kullanarak analizler yapmışlardır. GSD giriş sinyallerinin frekans cevap karakteristikleri incelemişlerdir. İkinci çalışmalarında ise dinamik ve sürekli hal sınır değerlerinin belirlenmesi ve salınım çeşitlerine göre GSD'nin tepkisi incelenmiştir. Ayrıca birinci çalışmada elde edilen durumlara göre GSD parametre ayarının geleneksel yöntem ile nasıl yapıldığı çalışmada yer almıştır. Üçüncü ve son çalışmalarında ise farklı sinyal girişlerinin uygulanması ve küçük bozucu giriş etkilerinin incelenmesi ile GSD tasarımında önemli bir katkıda bulunmuşlardır [4-6]. Larsen ve Swann'ın 1981 yılındaki bu ilk makaleleri GSD tasarımı için en önemli yapı taşı olmuştur. Halen bu makale önemini taşımakla birlikte diğer ardından gelen makalelere yol gösterici olmuştur.

Yang'ın yaptığı çalışma da ise H_∞ optimizasyon metodu güç sistem dengeleyicisi tasarımı için uygulanmıştır. Ağırlık fonksiyonu seçimi ve çok makine güç sistemi iki bölümde incelenmiştir. İlk bölümde tek makine sonsuz güçlü bara için GSD tasarımının H_∞ optimizasyon probleminde uygulanabilirliği anlatılmıştır. Ayrıca yeni bir yöntem ile H_∞ optimizasyon ağırlık fonksiyonlarının seçimi incelenmiş olup geleneksel güç sistem dengeleyicisi tasarımı detaylıca anlatılmıştır [7].

Wu Chi - Jui ve Hsu Yuan - Yih, kendinden ayarlamalı PID (proportional - integral-derivative) tabanlı GSD ile çok makineli güç sisteminin geniş çalışma bölgesinde sürekli hal kararlılığını sağlamak amaçlı çalışmaları farklı sistem parametre değişikliklerine karşı iyi sönümleme karakteristiği göstermiştir. Wu Chi- Jui ve Hsu Yuan - Yih bu çalışmaları ile çok makineli güç sistemlerinde GSD ve geleneksel olmayan GSD tasarımı ile ilgili farklı bir bakış açısı getirmişlerdir [8].

Hsu ve arkadaşları, pompaj depolamalı santraller için GSD çalışmalarını özdeğer - özvektör analizi ile geçici durum kararlılık analizini desteklemişlerdir. Uygun parametre değerlerinin bulunması ve hangi güç salınım durumlarında GSD'nin iyi sönümleme sağlayacağına dair etkin bir çalışma olmuştur [9].

Trudnowski ve arkadaşları büyük bir sisteme bağlanan düşük dereceli jeneratör modelinde GSD transfer fonksiyonunu elde etmede yeni bir metot geliştirmişlerdir. Bu metot Prony sinyal analiz olarak bilinir ve hem yerel hem de bölgelerarası elektromekanik salınımların analizini içerir. Benzetim çalışmaları 27 baralı ve 16 jeneratörlü test sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu yeni tasarım ile bölgelerarası salınımlarının GSD ile sönümlemesine dair yeni bir görüş sunulmuştur [10].

Chao - Rong Chen ve Yuan - Yin Hsu, senkron jeneratörün sürekli hal kararlık analizi için yeni bir yapay sinir ağ yapısı tasarlamışlardır. Sürekli hal kararlık analizinde önemli parametrelerden sayılan jeneratör çıkışları ve güç sistemi dengeleyicisi parametreleri YSA yapısına girişi olarak verilmiştir. YSA'nın eğitimi öncelikli olarak çevrim dışı (offline) çalışma ile yapılarak büyük bir güç sisteminde performansı denenmiştir. Bu YSA yapısında kullanılan eğitim seti, çok katmanlı ileri besleme yapıdaki geri yayılım algoritmasıyla beraber momentum öğrenme algoritması kullanan YSA yapısına göre daha az eğitim seti ile öğrenmeyi gerçekleştirir. YSA ile yapılan bir çalışma olması itibari ile tam kararlılık göstermesi ve geleneksel sistemden ayrı olarak tasarlanan ilk çalışmalardan olması bu makaleyi önemli kılmaktadır [11].

Malik ve arkadaşları, çok makineli güç sistemlerinde GSD yerini belirlemede yeni bir öneri sunmuşlardır. Bu çalışma da sağ özvektör durum değişkenlerini, sol özvektör ise kontrol sinyali karakteristiklerini içerir. Bu yeni metot ile 13 makineli sistemde en iyi GSD yeri tespiti yapılabilmektedir. Zaman domen benzetim çalışmaları sonuçları da bu metodun uygun ve doğru olduğunu göstermiştir [12].

Al-Hamouz ve Al-Duwaish adaptif kayan kipli kontrolör tabanlı yapay sinir ağlarını halen güncel çalışma konusu olan güç sistem dengeleyicisine uygulamışlardır. Halen güncelliğini yitirmeyen güç sistemi dengeleyicisi bu çalışmada geniş alan bölgesi çalışma için uygulanmış ve yeterli sönümlenme sağlamıştır [13].

Basit bir yapıya sahip geleneksel güç sistemi dengeleyicisinde sabit parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler belirli bir çalışma noktası civarında ayarlandığından bu nokta civarı için iyi bir performansa sahiptirler. Geleneksel GSD'ler bu çalışma durumu dışında en uygun başarıyı garanti etmezler. Bu nedenle güç sistemlerinde çalışma noktasının veya bazı sistem parametrelerinin değişmesi durumunda başarımlarına uğramayan, dayanıklı yapıya sahip güç sistemi dengeleyicisi tasarımı üzerinde yapay zekaya dayalı araştırmalar devam etmektedir.

Yapay zeka; insanlarda, hayvanlarda ve makinelerde zeki davranışın ne olduğunu inceleyen ve insan yapımı aygıtların nasıl bu tip davranışlar sergileyebileceğini bulmaya çalışan bir bilim dalıdır. Slage'ye göre yapay zeka; sezgisel programlama temelinde olan bir yaklaşımdır, Genesereth ve Nilsson'a göre yapay zeka, akıllı davranışlar üzerine bir çalışma olup ana hedefi, doğadaki varlıkların akıllı davranışlarını yapay olarak üretmeyi amaçlayan bir kuramın oluşturulması ve Tesler'e göre ise yapay zeka; şu ana kadar yapılamayanlardır [14].

Güç sistemi dengeleyicisi tasarımı, pek çok açıdan yapay zeka problemlerine yakındır. Yapay zeka çözümleri, güç sisteminin gereksinimlerini kesintisiz ve sürekli olarak sağlayabildikleri için büyük öneme sahiptirler. Geleneksel güç sistemi dengeleyicisinin sabit parametreleri ayarlandıkları belli bir bölge için çözüm üretirken, yapay zeka ile tasarlanmış güç sistemi dengeleyicisi, ele alınan sistemin

parametreleri değişse bile dayanıklı ve sürekli çözümler üretebilmektedir. Yapılan literatür incelemeleri sonucunda sezgisel algoritmalar içerisinde en yeni ve popüler olan yapay arı kolonisi (artificial bee colony, ABC) algoritması ile g sistemi dengeleyicisi parametrelerinin ayarının yapılmadığı grlmştır. Bu tez çalışmasında yapay zekanın kesin çözüm bulma, basit anlaşılabilirliği gibi özelliklerinden faydalanarak güç sistemi dengeleyicisinin parametre ayarı yeni bir yaklaşım ile yapay arı kolonisi algoritması tabanlı bir g sistemi dengeleyicisi ile tasarlanmıştır.

Çalışmanın birinci bölümü GSD ile yapılmış ve daha sonraki çalışmalar kaynakça olmuş çalışmaları içerirken çalışmanın ikinci kısmında güç sistem kararlılığı ve tek makineli sistemde g karakteristiği hakkında genel bir bilgi verilmiştir. Bu çalışmada g sistemi kararlılığı konusunda rotor kararlılığının bir parçası olan sürekli hal kararlılığının veya başka bir deyişle küçük işaret ararlılığının güç sistemine olan etkisi ve çözüm yolları incelenecektir.

Çalışmanın nc kısmında güç sistemlerinin dinamik davranışlarını anlayabilmek ve g sistemi dengeleyicisi tasarlayabilmek için tek makine sonsuz güçlü bara sistemi ile senkron jeneratörünün doğrusallaştırılmış modelinin çıkartılması uyartım sistemleri de dikkate alınarak yapılmıştır.

Çalışmanın dördüncü kısmı GSD parametre ayarı için çözüm uzayında en uygun çözüme yakınsaması ispat edilemeyen fakat kesin çözüm yakınındaki çözümleri veren ve bu çalışma için nerilen ABC algoritması ile benzer algoritmalar içerisinde bulunan parçacık sürü optimizasyonu algoritması (particle swarm optimization, PSO) ile diferansiyel evrim algoritması (Differential Evolution, DE) işleyişi incelenmiştir.

Çalışmanın son kısmında geleneksel GSD, PSO, DE ve nerilen ABC tabanlı GSD parametre ayarlarının benzetim alışmaları MATLAB ortamında gerekleştirilmış olup nerilen ABC tabanlı GSD'in diğer PSS yapılarına farklı koşullar altındaki üstünlüğü benzetim çalışmaları sonucunda gösterilmiştir. Tüm çalışmalarda güç sistemine küçük bozular eklenmiş olup GSD parametre ayarı geniş alan bölgesi

alışmalar için yapılmıştır. Son olarak yeni bir öneri olarak ABC algoritması PSO algoritması ile birleştirilerek karma bir algoritma oluşturulmuştur. PSO destekli ABC algoritması ile GSD parametreleri güç sisteminin belirli çalışma noktaları için ayarlanıp sadece ABC tabanlı GSD ile benzetim çalışmaları sonucu karşılaştırılmıştır.

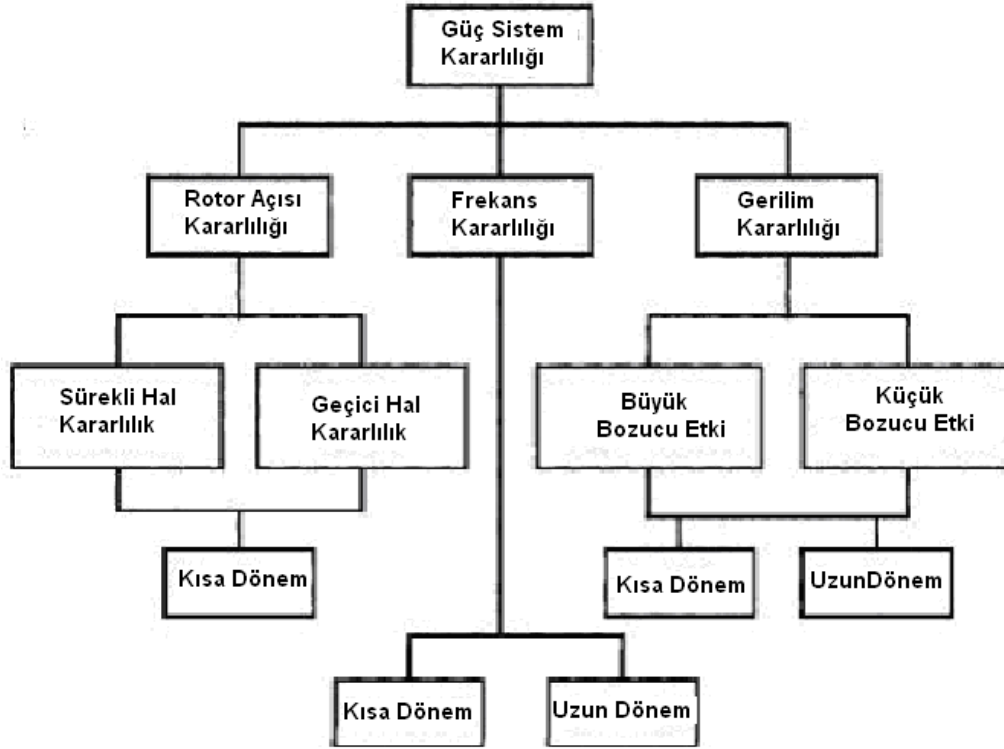
2. GÜÇ SİSTEMİ

Elektrik güç sistemleri, elektrik enerjisinin üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi işlevlerini gerçekleştiren jeneratörler, iletim ve dağıtım hatları, transformatörler, yükler, reaktif güç kompanzasyon ekipmanları gibi birçok sayıda eleman içeren büyük ve karmaşık fiziksel sistemlerdir. Genellikle tüketim merkezlerinin uzağında üretilen elektrik enerjisi, sanayi bölgeleri ve nüfus yoğunluğunun fazla olduğu bölgelere uzun yüksek gerilim hatları vasıtasıyla taşınır. Nüfusun yoğun olduğu yerlerde yoğunlaşan dağıtım sistemleri ise üretilen gerilim seviyesini tüketicilerin kullandığı seviyeye indirmek için kullanılır. Güç iletiminin güvenilirliğini ve kararlılığını artırmak için güç sistemleri genellikle birbirleri ile daha büyük sistemler kuracak şekilde birleştirilirler. Genellikle büyük coğrafi alanları kapsayan enterkonnekte güç sistemleri, farklı (hidroelektrik, rüzgar, termik, nükleer vb.) kaynaklardan güç üreten çok çeşitli güç üretim santrallerini, çeşitli uzunluklarda çok sayıda iletim hatlarını, binlerce transformatörü içerdikleri gibi milyonlarca enerji tüketicisine kararlı bir şekilde elektrik enerjisi sağlar [15-17, 19].

2.1. Güç Sistemi Kararlılığı

Güç sistemi kararlılığı, elektrik şebekesini oluşturan tüm elemanların normal çalışma koşulları altında dengeli çalışması ve sistemde herhangi bir bozucu etki oluştuğundan sonra da makul bir denge durumunda çalışmaya devam edebilmesi olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle kararlılık, bir sistemde paralel çalışan senkron jeneratörlerin tahrik momentleri ile elektriksel momentleri arasındaki kararlı denge durumu demektir. Temelde güç sistemi kararlılığı tek bir problem olarak gözükmese de, farklı türden kararsızlıkların birlikte oluşması durumunda çözümün zorluğu ve karmaşıklığı artmaktadır. Güç sistemi kararsızlığı farklı şekillerde olabildiği gibi farklı faktörlerden de etkilenmektedir. Kararlılık analizi probleminde, kararsızlığa neden olan ana faktörlerin tanımlanması ve kararlı çalışmayı sağlaması için kararlılığı çeşitli sınıflara bölerek incelemesi son derece faydalıdır. Bu durumda güç sistemi kararlılığı; kararsızlık durumunu oluşturan fiziksel etkinin türüne, sistemde

oluşturduğu etkinin büyüklüğüne, etkilediği elemanların türüne ve etkinlik süresine göre Şekil 1.1’de yer aldığı gibi sınıflandırılmaktadırlar [16-19].



Şekil 2.1. Güç sistem kararlılığı sınıflandırılması

Güç sistemleri, küçük ve büyük oldukça geniş bir aralıktaki bozunumlara maruz kalırlar. Yük değişimleri şeklindeki küçük bozunumlar sürekli olur. Güç sistemi değişen koşullara göre kendini ayarlayabilme ve zararlı yapıdaki (bir iletim hattındaki bir kısa devre veya büyük bir jeneratörün devre dışı kalması gibi) pek çok bozunumda ayakta kalabilme yeteneğine sahip olmalıdır. Büyük bozunumlarda arızalı elemanların devre dışı bırakılması sistemde yapısal değişimlere neden olabilir.

Güç sistemi ancak sisteme ilişkin mekaniksel giriş ve elektriksel çıkış güç değerleri arasında sürekli bir denge sağlanması şartıyla kararlı olarak çalışabilir. Güç sistemi, elektrik enerjisi üretimi bakımından senkron jeneratörlere bağlıdır. Sisteme ilişkin mekaniksel giriş, tahrik makineleriyle senkron jeneratörlere verilen mekanik güçtür. Elektriksel çıkış ise güç sistemindeki elektriksel yüklerdir. Elektriksel yüklerde

oluşabilecek bir değişim, sisteme verilen mekaniksel güçteki karşı değişimlerle dengelenmelidir [16, 19].

Eğer güç sistemi, bir bozunum sonrası kararlı kalıyorsa, sistem yeni bir denge durumuna erişecektir. Bazı jeneratör ve yüklerin birbirleriyle bağlantılarının kesilmesi arızalı elemanların devre dışı kalması veya sistemin bütünüünün çalışmasının ve sürekliliğinin korunması amacıyla devre dışı kalmasıyla gerçekleşebilir. Enterkonnekte sistemler, bazı belli ciddi bozunumlardan dolayı kasıtlı olarak mümkün olduğunca çok üretim ve yükün korunması amacıyla iki veya daha fazla parçaya ayrılabilir. Bununla beraber otomatik denetimler ve insanların müdahalesi sonucu sistem yeniden normal koşulların dönecektir. Öte yandan, eğer sistem kararsız ise bu müdahaleler sistemi daha da kötüye götürebilir [16, 17, 19].

Kararlılık probleminin anlaşılmasında, kararlılığın çeşitli kategorilerle sınıflandırması büyük ölçüde yarar sağlar. Ayrıca basitleştirilmiş veya doğrusallaştırılmış modeller yani basit bir güç sistemi yapısı kullanılması da güç sistemi kararsızlıklarını daha anlaşılabilir hale getirir. Şekil 1.1’de bahsedilen kararlılık durumlarını inceleyecek olursak:

2.1.1. Rotor açısı kararlılığı

Normal çalışma koşullar altında tüm üretim yapan makinelerin elektriksel çıkış momenti ve mekanik giriş momenti arasında hızın sabit kaldığı bir denge durumu mevcuttur. İki yada daha fazla senkron makine birlikte çalışırken, tüm makinelerin stator gerilimleri ve akımları aynı frekansa sahip ve her rotorun mekanik hızı bu frekansa uyumlu olmalıdır. Böylece birlikte çalışan tüm senkron makineler senkronizmada kalmaktadır. Burada temel konu rotora etki eden mekanik ve elektriksel momentler ile salınımların değişimidir. Senkron makinelerin, uyarma ve endüvi sargıları olmak üzere iki temel elemanı vardır. Uyarma sargısı rotorda, endüvi sargısı ise statorda bulunur. Uyarma sargısı doğru akım ile beslenir. Türbin tarafından döndürülen rotor manyetik alanı statordaki üç fazlı endüvi sargılarında alternatif gerilim endükler. Endüklenen bu gerilim başka senkron jeneratörlerin stator

devreleri ile bağlantı durumunda ise; sistemin çalışmasını sürdürebilmesi için, tüm senkron jeneratörlerin stator gerilim ve akımlarının aynı frekansa sahip olmaları ve her birinin rotorunun mekanik hızı bu frekansla senkronize olması gerekir [16, 19].

Enterkonnekte güç sistemindeki jeneratörlerin senkronizmada kalabilme yeteneği olarak tanımlanan rotor açısı kararlılığı, bozucu etkinin büyüklüğüne bağlı olarak; geçici kararlılık ve sürekli hal kararlılığı başlıkları altında iki grupta incelenir [19].

Geçici kararlılık; kısa devreler, üretim birimlerinin veya büyük güçlü tüketicilerin devre dışı kalması gibi etkilerden sonra sistemin senkronizma da kalıp kalmayacağı ile ilgilidir. Sistemin kararlılığı, bozucu etki öncesindeki çalışma noktasına ve bozucunun şiddetine bağlıdır. Genellikle bozucu etki öncesinde ve sonrasındaki sürekli hal çalışma noktası farklıdır. Geçici kararlılık analizlerinde sistemin doğrusal olmayan modeli kullanılır. Geçici hal kararlılığını etkileyen faktörler sırasıyla jeneratör ataleti, jeneratör yüklenmesi: arıza süresince jeneratör çıkışı (güç transferi), arıza temizleme zamanı, arıza sonrası iletim sistemi reaktansı, jeneratör reaktansı, jeneratör iç gerilim genliği ve sonsuz bara gerilimi genliğidir [16-18].

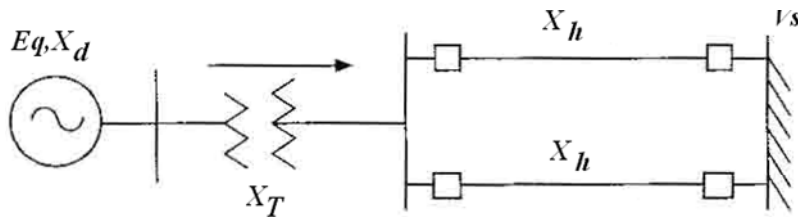
Sürekli hal kararlılığı küçük bozucuya maruz kalan güç sisteminin senkronizmayı koruyabilmesi ile ilgilidir. Sistemin küçük bozucular sonrasındaki davranışı, çalışma noktası, iletim hattı ve jeneratör uyarma tipi gibi bir çok faktöre bağlıdır. Güç sistemlerinde küçük bozucular iki türlü kararsızlığa neden olabilirler. Bunlar senkronlayıcı momentin yetersiz olması sonucunda rotor açısının sürekli olarak artması ve sönümleyici momentin yetersiz olması sonucunda artan genlikli rotor salınımlarının oluşmasıdır [16,17].

Günümüz güç sistemlerinde salınımların yetersiz sönümlemesi sürekli hal kararlılığı için önemli bir problem oluşturmaktadır. Aşağıda belirtilen salınımların kararlılıkları ile ilgilenir:

- Yerel modlar olan bu salınımlar güç sisteminin kalan kısmına nazaran üretimin bir birimindeki salınımlarla ilgilidir. Yerel terimi salınımların güç sisteminin küçük bir parçasını veya bir üretim tesisini sınırladığı için kullanılmıştır.
- Bölgeler arası modlar sistemin diğer kısımlarındaki makinelere karşı sistemin bir kısımdaki birçok makinenin salınımlarıyla ilgilidir. Bu zayıf enterkonnekte bağlanan yakın kuplajlı makine grupları yada iki grup tarafından oluşturulur.
- Kontrol modları üretim birimleri ile ve diğer kontrollerle ilgilidir. Zayıf olarak ayarlı uyarmlar, hız regülâtörleri, yüksek gerilimli doğru akım YGDA(HVDC) dönüştürücüleri ve statik var kompanzatörleri çoğunlukla bu modların kararsızlığına neden olurlar.
- Torsiyonel modlar sistemin dönen türbin-jeneratör mili ile ilgilidir. Torsiyonel modların kararsızlığı, uyarma kontrolleri, hız regülâtörleri, YGDA kontrolörler ve seri kompanzasyonlu hatlar tarafından oluşturulabilir [15, 16].

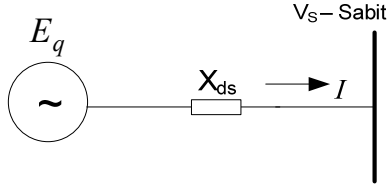
Tek makine sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratörün güç karakteristiği

Tek makine sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratörün güç karakteristiği elde edilirken bazı kabuller yapılır. Bir senkron jeneratörün bir enerji iletim hattı veya şebeke üzerinden sonsuz güçlü şebekeyi beslediğini ve jeneratörün beslemiş olduğu şebeke gücünün, jeneratör gücünden çok daha büyük ve gerilimi de sabit olduğu kabul edilir. Senkron jeneratörün bu sonsuz güçlü şebekeye bağlandığı baranın gerilimi ve faz açısının sabit olduğu kabul edilerek bu baraya da sonsuz güçlü bara denir [17-20]. Burada temel konu sonsuz şebekeyi besleyen senkron jeneratör ve iletim hattındaki olaylardan bu gerilimin etkilenmediği varsayılır. Bu durumu gösteren en basit yapı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Güç sistem yapısı

Böyle bir güç sistem yapısının basitleştirilmiş modeli Şekil 2.3'deki gibidir.



Şekil 2.3. Basitleştirilmiş güç sistem yapısı

Şekil 2.3 ile gösterilen basitleştirilmiş modelde X_{ds} eşitliği Eş. 2.1'de verilmiştir. Burada,

$$X_{ds} = X_d + X_e \quad (X_e = X_T + X_h/2) \quad (2.1)$$

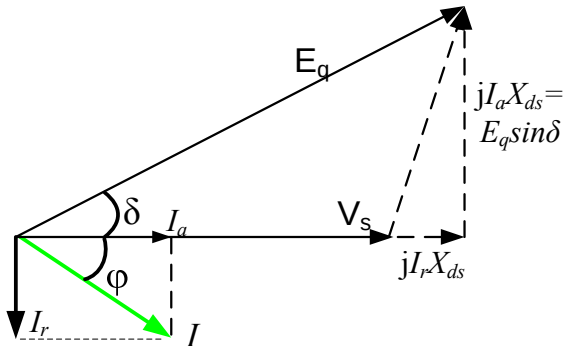
X_T : Transformatörün endüktif reaktansını,

X_e : Jeneratörden hatta kadar olan devrenin endüktif reaktansını,

X_h : Hat endüktif reaktansını,

X_{ds} : E_q ile V_s gerilimleri arasındaki toplam endüktif reaktansı ifade etmektedir.

Şekil 2.3'deki basitleştirilmiş modelin vektör diyagramı Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Vektör diyagramı

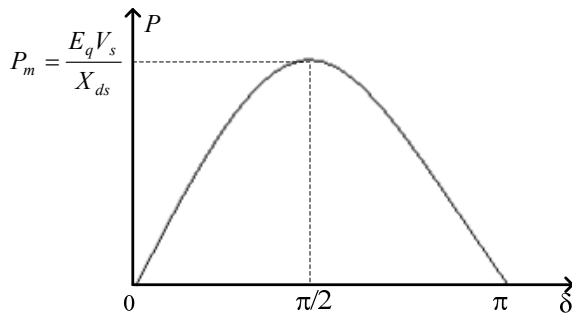
Şekil 2.4'de görüldüğü gibi aktif gücün eşitliği:

$$P = V_s \cdot I \cos \varphi = V_s \cdot I_a \quad (2.2)$$

şeklindedir. Bu eşitliğin her iki tarafı X_{ds}/X_{ds} ile çarpılarak $I_a X_{ds} = E_q \sin \delta$ eşitliğinden $I_a = E_q \sin \delta / X_{ds}$ elde edilip Eş. 2.2’de I_a karşılığı olarak yerine konulur ise,

$$P = V_s \cdot I_a \cdot \frac{X_{ds}}{X_{ds}} = \frac{V_s \cdot E_q}{X_{ds}} \sin \delta \quad (2.3)$$

elde edilir. Eş. 2.3’deki bu ifadeye senkron jeneratörün güç karakteristiği adı verilir. Eş 2.3’de görüldüğü gibi senkron jeneratörün güç karakteristiği E'_q , V_s , X_{ds} ve δ değişkenlerine bağlıdır. Burada V_s ve X_{ds} sabit kabul edilirse değişim sadece E'_q ve δ ile olur [16-19]. Otomatik gerilim regülatörü (OGR) olmayan senkron jeneratörlerde çalışma noktasının yavaş değişiminden dolayı, E'_q sabit kabul edilir ise senkron jeneratörün güç karakteristiği ancak δ ile değişim gösterir ve bu değişim Şekil 2.5 ile gösterilmektedir. Burada P_m , basit sistemin güç iletim sınır değeridir.



Şekil 2.5. Güç iletim karakteristiği.

Senkron jeneratör salınım denklemi

Sürekli hal çalışma durumunda rotor ekseni ile bileşke manyetik alan arasındaki bağıl açı (konum) sabittir. Bu açı, güç açısı veya yük açısı olarak bilinmektedir.

Herhangi bir bozulma durumunda, rotor senkronizmada olan hava aralığı manyetik motor kuvvetine nazaran hızlanarak ya da yavaşlayarak bağıl bir hareket başlamaktadır. Bu bağıl hareketi tanımlayan eşitlik salınım (Swing) eşitliği olarak bilinir. Senkron jeneratörün kararlılığını devam ettirebilmesi bu salınım süreci sonunda rotor hızının yeniden senkron hızda kalmasına bağlıdır. Bozulma herhangi bir güç değişimi içermiyor ise yani geçici bir durum ise, rotor başlangıç konumuna döner. Eğer bozucu etki, üretim, yük veya şebeke şartlarında bir değişiklik meydana getirir ise rotor senkron hızda dönmekte olan alanın konumuna göre yeni bir güç açısına oturur [16-19, 21, 22].

T_e elektriksel momentini üreten ve ω_s hızı ile dönmekte olan bir senkron jeneratörün salınım eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilir. Kararlı durumda kayıplar ihmal edilir ise Eş. 2.4’de olduğu gibi mekanik moment elektriksel momente eşit olacaktır.

$$T_m = T_e \quad (2.4)$$

Fakat bir bozucu giriş, Eş. 2.5’de olduğu gibi jeneratörü kararlı durumdan çıkaracak bir T_a momenti ile rotorun hızlanmasına ($T_m > T_e$) veya yavaşlamasına ($T_m < T_e$) yol açar.

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.5)$$

Sürtünme ve sönümleme momenti ihmal edilerek, jeneratör ve türbinin bileşke atalet momenti J olmak üzere, dönen kütle için Newton’un ikinci kuralına göre Eş. 2.6 yazılır.

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.6)$$

Burada, θ_m statorun duran referans eksenine göre rotorun açısal konumudur. Senkron hızı referans alarak rotor hızı dikkate alınır, açısal referans, ω_{sm} mekanik senkron

açısal hızı ile hareket eden bir referans çatıya göre seçilir. Bu durumda θ_m Eş. 2.7'deki gibi yazılabilir.

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (2.7)$$

Burada δ_m , $t = 0$ anında bozucu öncesi senkron hızdaki referans çatıdan ölçülen rotor pozisyonudur. Eş. 2.7'nin türevi Eş. 2.8'de gösterildiği gibi rotor açısal hızını ve ikinci türevi de Eş. 2.9'da gösterildiği gibi ise rotor ivmesini verir.

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.8)$$

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.9)$$

Eş. 2.9 eşitliği Eş. 2.6'da yerine konularak ω_m ile çarpılır ise Eş. 2.10 elde edilir.

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.10)$$

Burada moment ile açısal hızın çarpımı, güce eşit olduğundan güç cinsinden eşitlik aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_T - P_e \quad (2.11)$$

Eylemsizlik sabiti olarak adlandırılan $J\omega_m$ büyüklüğü, M karakteri ile ifade edilir. Dönen bir kütlenin kinetik enerjisi W_k 'nin bağıntısı Eş. 2.12'de verilmektedir.

$$W_k = \frac{1}{2} J\omega_m^2 = \frac{1}{2} M\omega_m^2 \quad (2.12)$$

Eş. 2.12'de M eylemsizlik sabiti tek başına bırakılırsa Eş. 2.13 elde edilir.

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad (2.13)$$

Bu eşitlikte M eylemsizlik sabiti olarak tanımlanmasına karşın rotor hızı senkron hızdan ayrıldığında M gerçekten sabit değildir. Ancak kararlılık kaybolmadığı sürece, ω_m çok büyük bir değişim göstermediği için Eş. 2.14'deki gibi M'nin senkron hızda olduğu yani sabit kabul edilir.

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.14)$$

Eylemsizlik sabiti cinsinden salınım eşitliği aşağıda yazılmıştır.

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_T - P_e \quad (2.15)$$

Salınım eşitliğinin elektriksel güç açısı δ cinsinden yazılması daha yaygındır. Eğer senkron jeneratörün kutup sayısı p ise elektriksel güç açısı δ mekanik güç açısı δ_m ile ilişkilendirilerek

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad (2.16)$$

ya da,

$$\omega = \frac{p}{2} \omega_m \quad (2.17)$$

şeklinde elektriksel hız ile mekanik hız arasındaki bağıntı yazılır. Eğer ihmal edilen sönümleme momenti dikkate alınırsa elektriksel güç açısı ile salınım eşitliği Eş. 2.18'deki gibi ifade edilir [16, 21].

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_T - P_e - P_d \quad (2.18)$$

Burada, P_d sistemde bulunan ve hızdaki değişime karşı yönde üretilen momenttir.

$$P_d = D d\delta/dt \text{ ve } D = 2D_m/p$$

D: elektriksel sönümlenme momenti katsayısı,

D_m : mekanik sönümlenme momenti katsayısıdır.

Güç sistemi analizlerinin birim değerde (per unit) yapılmasından dolayı salınım eşitlikleri genelde birim değer olarak ifade edilir. Eş. 2.18 S_B baz gücüne bölünerek M yerine Eş. 2.11'deki ifade kullanılır ise aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\frac{2}{p} \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_T}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} - \frac{P_d}{S_B} \quad (2.19)$$

Eş. 2.19'daki W_k/S_B bağıntısı önemli bir büyüklük olan H sabiti olarak bilinir [7, 20, 21].

$$H = \frac{\text{nominal hızda MJ kinetik enerji}}{\text{MVA makina gücü}} = \frac{W_K}{S_B} \quad (2.20)$$

H sabitinin birimi saniyedir ve büyüklüğü ise jeneratörün tipine ve boyutuna bağlı olarak 1 sn ile 10 sn arasında değişmektedir. Eş. 2.19 birim değer cinsinden ve H parametresi ile bağıntısı aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{2}{p} \frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{T(pu)} - P_{e(pu)} - P_{d(pu)} \quad (2.21)$$

Burada $P_{m(pu)}$, $P_{e(pu)}$ ve $P_{d(pu)}$ sırası ile birim değer cinsinden mekanik güç, elektriksel güç ve sönümlenme gücüdür. Eş. 2.17'deki elektriksel açısal hız ile mekanik açısal hız ile bağıntısına uygun olarak ($\omega_{sm} = (2/p)\omega_s$) salınım eşitliği,

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} - P_{d(pu)} = P_{acc(pu)} \quad (2.22)$$

olur. Burada P_{acc} net ivmeleme gücüdür. Eş. 2.22 aşağıdaki şekilde yazılıp,

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d(d\delta/dt)}{dt} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} - D \frac{d\delta}{dt} \quad (2.23)$$

senkron jeneratör hızına ilişkin eşitlik elde edilebilir. Rotor açısının zamana göre türevi

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega = \omega - \omega_s \quad (2.24)$$

elektriksel radyan cinsinden rotor hız sapmasıdır. Bu eşitlikteki $\Delta\omega$ terimini Eş. 2.23'de yerine yazarsak Eş. 2.25 elde edilir.

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_{T(pu)} - P_{e(pu)} - D\Delta\omega_{(pu)} \quad (2.25)$$

Eş. 2.25'de ω_s baz hız olarak kabul edilir ise hız sapmasının birim değer olarak ifade edildiği salınım eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega_{(pu)}}{dt} &= \frac{1}{2H} (P_{T(pu)} - P_{e(pu)} - P_{D(pu)}) \\ \frac{d\Delta\delta}{dt} &= \omega_s \Delta\omega_{(pu)} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Bu model basit bir yapıya sahip olduğu için doğrusallaştırma ve geçici hal kararlılığı analiz işlemleri için temel bir fikir vermek amacıyla kullanılmaktadır. Salınım eşitliği modeli olarak da isimlendirilen bu modelde, makinenin elektriksel gücü veya moment (pu sistemlerde elektriksel güç ve elektriksel moment eşittir) belirleme yaklaşımına göre senkron jeneratörün değişik seviyede modelleri ortaya çıkmaktadır.

2.1.2. Gerilim kararlılığı

Gerilim kararlılığı, bir enerji sisteminin yük bara gerilimlerinin genliklerini, gerek sürekli halde gerekse geçici olaylar esnasında, belirli işletme sınırları içinde tutabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Şebekenin mevcut talepleri karşılamakta yetersiz kalması genel olarak aşırı yüklenmiş sistemlerde oluşan kararsızlık durumlarından ileri gelmektedir. Özellikle yüksek endüktanslı şebekelerde aktif ve reaktif enerji transferi esnasında gerilim kararlılığını ilgilendiren durumlar gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra jeneratörün reaktif güç ve gerilim kontrolü kapasitesi, şebekeye bağlı yüklerin karakteristikleri, dağıtım sistemi gerilim regülatörleri ile indirme istasyonu trafo kademe değişim ayarları ve reaktif güç kompanzasyon cihaz karakteristikleri gerilim kararlılığını etkileyen önemli etmenler arasında gelmektedir [16, 17].

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 [16, 17].

2.1.3. Frekans kararlılığı

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

Frekans kararlılık konusu kısa dönem ve uzun dönem frekans kararlılığı olarak sınıflandırılır. Kısa dönem kararlılık yük atımı, jeneratör kontrolleri ve koruma cihazlarından etkilenir ve bozucudan sonraki birkaç saniyeyi kapsar. Uzun dönem kararlılık türbin gibi diğer faktörlerden etkilenir ve bozucudan sonraki birkaç dakikayı kapsar [16, 23, 24].

3. SENKRON MAKİNELER

Senkron makine, genelleştirilmiş makine türünden olup rotoru elektromıknatıslı veya küçük güçlerde sabit mıknatıslı ve statoru bir veya üç fazlı alternatif akım sargılarından oluşur. Senkron makineler, jeneratör ve motor olarak çalıştırılırlar. Senkron makine jeneratör olarak çalışırsa senkron jeneratörün rotoru, senkron devir sayısı ile tahrik edilmesi sonucunda endüvi (stator) çevresinde Eş. 3.1 ile ifade edilen senkron hız (n_s) denilen sabit bir hız ile döner.

$$n_s = 120f / p \quad (3.1)$$

Eş. 3.1’de f , stator akımlarının frekansını ve p , makinenin kutup sayısını ifade etmektedir.

Senkron makinelerin motor olarak çalışma alanları sabit dönme sayısı nedeniyle kısıtlıdır. Ancak elektrik enerjisi üretiminde, santrallerde kullanılırlar. Güçleri birkaç VA’dan 1700 MVA’ya kadar imal edilebilirler. Gerilimleri ise 6, 15, 20, 27 kV’dur. Çok büyük güçlerde imal edilmesinin nedeni güçleri arttıkça maliyetlerinin düşmesi, verimlerinin artmasıdır. Büyük güçlü bir makinenin bakımı ve kontrolü daha kolay olup bu sistem işletim güvencesini azaltır. Senkron jeneratörler yuvarlak kutuplu ve çıkık kutuplu olmak üzere iki türden yapılırlar.

Çıkık kutuplu senkron jeneratörler:

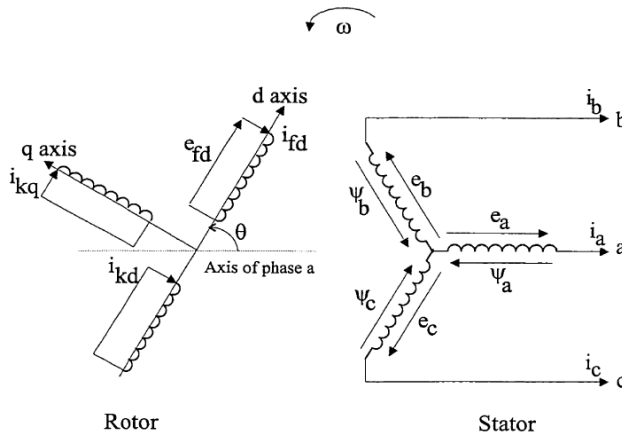
Stator iç çevresi düzgün, rotor dış çevresi düzgün olmayan makinelerdir. Kutup sayıları büyük ve senkron hızları düşüktür. Senkron hızları küçük olduğundan rotor çapları çok büyük ve eksenel boyları küçüktür. Genellikle su türbini ile döndürülürler. Hidroelektrik santrallerde çıkık kutuplu jeneratörler kullanılır [20, 21]

Yuvarlak kutuplu jeneratörler (turbojeneratörler):

Yuvarlak kutuplu jeneratörler, sabit kısımları stator ve dönen kısımları rotor olmak üzere bunların taşıdıkları stator ve rotor sargılarından oluşur. Rotor ile stator arasında kalan hava aralığı sabittir. Kutup sayısı küçük, senkron dönme sayıları yüksektir. Güçleri çıkık kutuplu jeneratörlerden daha yüksektir. Yüksek hızlı olduklarından rotor çapı küçük, boyları uzundur. Rotor çevresinin $2/3$ 'üne oluklar açılarak bu oluklara rotor sargıları yerleştirilir. Büyük güçte, turbojeneratörlerin rotor sargıları, ısı ile boyutlarının değişmemesi için gümüşlü bakır alaşımdan yapılır. Stator, stator gövdesi ve stator çekirdeğinden oluşur. Çekirdek, kayıpları az olan 0.5 mm kalınlığında özel silisyumlu saçlardan yapılır. Saçlara sargı için oluklar açılır. Saçlar bir araya getirilerek sıkıştırılır ve saç paketleri arasında soğutma kanalları bırakılır. Turbojeneratörler, gaz veya buhar türbinleri ile uyarılırlar. Bu nedenle termik santrallerde kullanılırlar. Yuvarlak kutuplu makineler, makine içinde basınçlı hava veya gaz dolaştırılarak soğutulur [20-22].

3.1. Senkron Makinenin Dinamik Modellenmesi

Senkron makinenin modellenmesinde genel olarak rotor uyarma sargısına ilave olarak dq eksenlerinde bir veya iki adet sönüm sargısı içeren, eşdeğer ideal senkron makine yapısı tercih edilir [17, 22, 25].



Şekil 3.1. Senkron makine rotor ve stator devreleri

Şekil 3.1’de gösterilen senkron makinenin eşitliklerini geliştirmek için aşağıdaki kabuller yapılmaktadır [17, 18, 21, 25, 26]:

1. Üç faz sargıları simetriktir.
2. Tüm sargı kapasiteleri ihmal edilebilir.
3. Dağıtılmış sargıların her biri yoğunlaştırılmış bir sargı ile temsil edilebilir.
4. Rotorun konumundan dolayı stator endüktansındaki değişim sinüzoidaldir ve yüksek harmonikler içermemektedir.
5. Histerisiz kayıpları ihmal edilmekte ancak girdap akımı (nüve) kayıpları damper sargılarının modeline katılabilir.
6. Geçici hal ve geçici hal öncesi durumlarında rotor hızı senkron hıza yakındır.
7. Manyetik devreler doğrusaldır (doyma yoktur) ve endüktans değerleri akımdan bağımsızdır.

Bu kabuller yapıldıktan sonra stator ve rotor sargısının gerilim eşitlikleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Lambda_s \\ \Lambda_r \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Eş. 3.2’de yer alan büyüklüklerin açılımları aşağıda ifade edilmiştir.

$$[v_s] = [v_a \quad v_b \quad v_c]^t \quad (3.3)$$

$$[v_r] = [v_f \quad v_{kd} \quad v_g \quad v_{kq}]^t \quad (3.4)$$

$$[i_s] = [i_a \quad i_b \quad i_c]^t \quad (3.5)$$

$$[i_r] = [i_f \quad i_{kd} \quad i_g \quad i_{kq}]^t \quad (3.6)$$

$$[r_s] = [r_a \quad r_b \quad r_c]^t \quad (3.7)$$

$$[r_r] = [r_f \quad r_{kd} \quad r_g \quad r_{kq}]^t \quad (3.8)$$

$$[\Lambda_s] = [\lambda_a \quad \lambda_b \quad \lambda_c]^t \quad (3.9)$$

$$[\Lambda_r] = [\lambda_f \quad \lambda_{kd} \quad \lambda_g \quad \lambda_{kq}]^t \quad (3.10)$$

Stator ve rotor sargılarının akı bileşenlerinin eşitlikleri (Eş. 3.9 ve Eş. 3.10) aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\begin{aligned} \Lambda_s &= L_{ss}i_s + L_{sr}i_r \\ \Lambda_r &= [L_{sr}]^t i_s + L_{rr}i_r \end{aligned} \quad \text{Wb.sarım} \quad (3.11)$$

Eş. 3.11'deki L_{ss} , L_{rr} , L_{sr} endüktansları matris formu biçiminde düzenlenirse;

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\theta_r & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \pi) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lf} + L_{mf} & L_{fkd} & 0 & 0 \\ L_{kdf} & L_{lkd} + L_{mkd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lg} + L_{mg} & L_{gkd} \\ 0 & 0 & L_{kdg} & L_{lkq} + L_{mkq} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{sf} \sin \theta_r & L_{skd} \sin \theta_r & L_{sq} \cos \theta_r & L_{skq} \cos \theta_r \\ L_{sf} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{sq} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skq} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{sf} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sq} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skq} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

eşitlikleri elde edilir. Bu eşitliklerden de açıkça görülmektedir ki L_{ss} ve L_{sr} endüktansları rotor açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Yani rotorun hız oranına bağlı olarak bu L_{ss} ve L_{sr} elemanlarının büyüklük değerleri değişmektedir. Her bir faza ait olan büyüklüklerin çözümü için Eş. 3.2 kullanıldığında zamana bağlı katsayıların hesaplanması oldukça güçtür. Akı bileşenlerinden faz akımlarını elde etmek için zamana bağlı olarak değişen endüktans matrislerinin tersini her bir zaman periyodu için hesaplamak gerekir. Her bir zaman periyodu için tersi alınan endüktans matrislerinin hesaplanması zaman kaybına neden olacağı gibi sayısal sürekli problemler oluşturabilir [17, 22, 25, 27, 29].

3.2. Senkron Makine Modelinin Basitleştirilmesi

Senkron makinenin matematiksel tanımlanmasında makine değişkenlerinde belirli bir dönüşüm yapılırsa büyük bir basitleştirme elde edilir. Bu dönüşümü elde etmek için Park dönüşüm matrisi ile ifade edilen eşitlik kullanılır.

3.2.1. Park dönüşüm matrisi

Park tarafından senkron makine modeli 3 faz zamanla değişen stator niceliklerinden (gerilim, akım ve akı bağı) sürekli hal şartlarında zamanla değişmeye d-q eksen niceliklerine dönüştürülerek geliştirilmiştir. Park dönüşümü veya iki eksen dönüşümü olarak adlandırılan dq referans çatı dönüşümünün matematiksel eşitlikleri aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Dönüşüm matrisi kullanılarak faz büyüklükleri ile $d-q$ eksen büyüklükleri arasında karşılıklı dönüşüm yapılabilir.

$$V_{0dq} = P V_{abc} \quad \lambda_{0dq} = P \lambda_{abc} \quad (3.16)$$

Eğer Eş. 3.15 dönüşümü tekil ise bir ters dönüşümü de vardır ve şöyle yazılabilir:

$$i_{abc} = P^{-1} i_{0dq} \quad (3.17)$$

Eş. 3.15'in tersinin aşağıda gösterildiği gibi olduğu hesaplanabilir. Ayrıca bu dönüşüm matrisi abc referans çatı fazından rotor çatı dq0 eksene dönüşümü de ifade eder.

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Senkron jeneratör için toplam anlık güç; gerçek faz değişkenleri cinsinden,

$$P_{abc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (3.19)$$

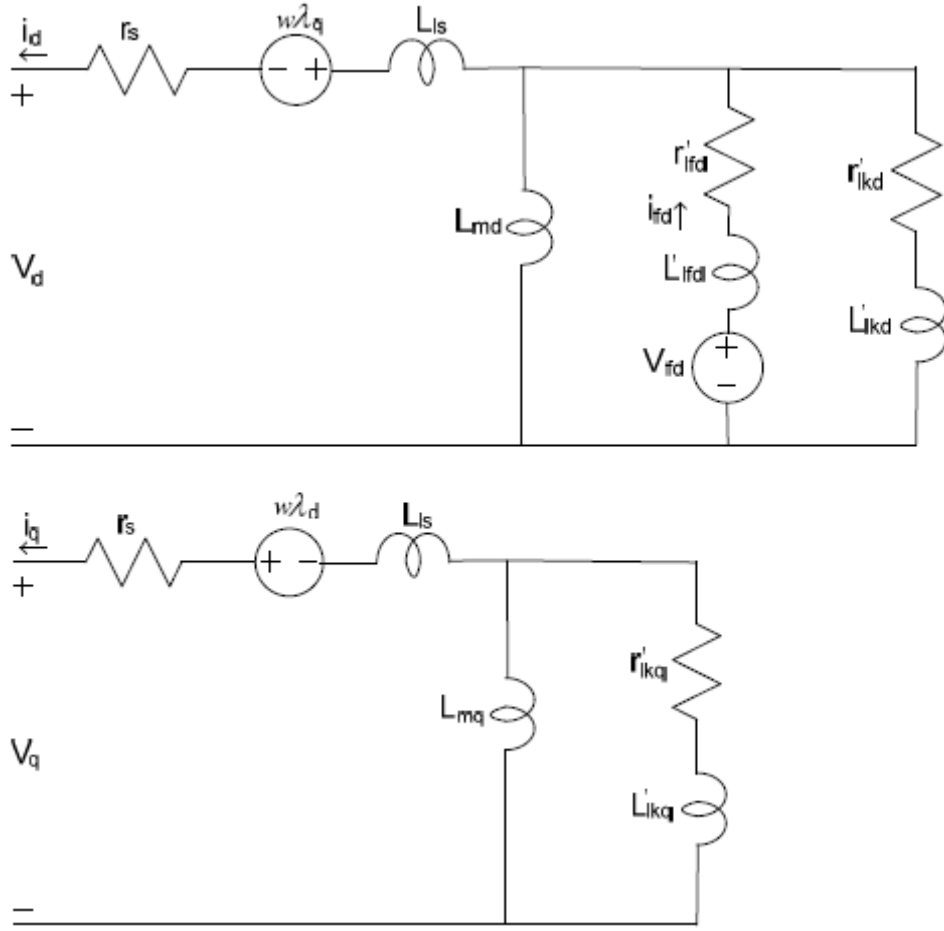
d – q bileşenleri cinsinden ise,

$$P_{dq0} = P_{abc} = \frac{3}{2} (v_q i_q + v_d i_d + 2v_0 i_0) \quad (3.20)$$

olarak yazılabilir. Eş. 3.20'deki 3/2 katsayısı dönüşüm sonrası güç korunumu sağlamak için kullanılmıştır.

3.2.2. Rotor referans çevre dönüşümü

Şekil 3.2'de gösterildiği gibi ideal makine yapısında rotor sargıları dq eksenleri üzerindedir.



Şekil 3.2. Senkron jeneratör d-q eksenli eşdeğer devreleri

Dolayısıyla Eş. 3.15’de verilen Park dönüşümünün sadece stator sargılarına uygulanması yeterlidir. Stator gerilim, akım ve akı eşitlikleri için dq dönüşümü aşağıdaki gibi elde edilir [16-18, 20-25].

$$V_{qd0} = T_{qd0\theta(r)} V_s \quad (3.21)$$

$$V_{qd0} = [V_q \quad V_d \quad V_0]^t \quad (3.22)$$

$$i_{qd0} = T_{qd0\theta(r)} i_s \quad (3.23)$$

$$i_{qd0} = [i_q \quad i_d \quad i_0]^t \quad (3.24)$$

$$\Lambda_{qd0} = T_{qd0\theta(r)} \Lambda_s \quad (3.25)$$

$$\Lambda_{qd0} = [\lambda_q \quad \lambda_d \quad \lambda_0]^t \quad (3.26)$$

Park dönüşümü Eş. 3.2'de verilen stator sargı gerilim ifadesine uygulanırsa,

$$V_{qd0} = -T_{qd0} r_s T_{qd0}^{-1} i_{qd0} + T_{qd0} \left[\frac{d}{dt} T_{qd0}^{-1} i_{qd0} \right] \Lambda_{qd0} \quad (3.27)$$

ifadesi elde edilir. Stator sargı dirençleri eşit kabul edilirse, $r_a = r_b = r_c = r_s$, Eş. 3.27'nin ilk terimi aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$T_{qd0} r_s T_{qd0}^{-1} i_{qd0} = r_s i_{qd0} \quad (3.28)$$

Eş. 3.27'nin ikinci terimi ise Eş. 2.29'daki gibi yazılabilir.

$$T_{qd0} \left[\frac{d}{dt} T_{qd0}^{-1} i_{qd0} \right] \Lambda_{qd0} = T_{qd0} \left[\left(\frac{d}{dt} T_{qd0}^{-1} \right) \Lambda_{qd0} + T_{qd0}^{-1} \frac{d}{dt} \Lambda_{qd0} \right] \quad (3.29)$$

Eş. 3.29'un ilk terimi de Eş. 2.30'daki gibi düzenlenir ise

$$\left[\frac{d}{dt} T_{qd0}^{-1} i_{qd0} \right] \Lambda_{qd0} = w_r \begin{bmatrix} -\sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 \\ -\sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & -\cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & 0 \\ -\sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & 0 \end{bmatrix} \Lambda_{qd0} \quad (3.30)$$

eşitliği elde edilir. Trigonometrik ifadelerin düzenlenmesi ile

$$T_{qd0} \left[\frac{d}{dt} T_{qd0}^{-1} i_{qd0} \right] \Lambda_{qd0} = w_r \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Lambda_{qd0} = \begin{bmatrix} w_r \lambda_d \\ -w_r \lambda_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$w_r = \frac{d\theta_r}{dt} \frac{\text{rad}}{s} \quad (3.32)$$

Eş. 3.31 ve Eş. 3.32 elde edilir. Burada Eş. 3.29'un son terimi Eş. 3.33'deki gibi düzenlenir.

$$T_{qd0} T_{qd0}^{-1} \frac{d}{dt} \Lambda_{qd0} = \frac{d}{dt} \Lambda_{qd0} \quad (3.33)$$

Eş. 3.28, Eş. 3.31 ve Eş. 3.32 ifadelerinin rotor referans çevresine dönüştürülen senkron jeneratör stator gerilim ifadesi Eş. 3.34 v Eş. 3.35'deki gibi elde edilir.

$$V_{qd0} = -r_s i_{qd0} + \begin{bmatrix} w_r \lambda_d \\ -w_r \lambda_q \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \Lambda_{qd0} \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{qd0} \\ \Lambda_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{qd0} L_{ss} T_{qd0}^{-1} & T_{qd0} L_{sr} \\ [L_{sr}]^T T_{qd0}^{-1} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{qd0} \\ i_{qdr} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Yukarıdaki eşitliklerden sonra elde edilen senkron makinenin rotor referans çevresine indirgenmiş sargı eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

$$v_q = -r_s i_q + w_r \lambda_d + \frac{d\lambda_q}{dt} \quad (3.36)$$

$$v_d = -r_s i_d + w_r \lambda_q + \frac{d\lambda_d}{dt} \quad (3.37)$$

$$v_0 = -r_s i_0 + \frac{d\lambda_0}{dt} \quad (3.38)$$

$$v'_{fd} = r'_{fd} i'_{fd} + \frac{d\lambda'_{fd}}{dt} \quad (3.39)$$

$$v'_{kd} = r'_{kd} i'_{kd} + \frac{d\lambda'_{kd}}{dt} \quad (3.40)$$

$$v'_{kq} = r'_{kq} i'_{kq} + \frac{d\lambda'_{kq}}{dt} \quad (3.41)$$

$$\lambda_q = -(L_{ls} + L_{mq}) i_q + i'_{kq} \quad (3.42)$$

$$\lambda_d = -(L_{ls} + L_{md}) i_d + L_{md} i'_{fd} + L_{md} i'_{kd} \quad (3.43)$$

$$\lambda_0 = -L_{ls}i_0 \quad (3.44)$$

$$\lambda'_{fd} = -L_{md}i_d + (L'_{lfd} + L_{md})i'_{kd} + L_{md}i'_{kd} \quad (3.45)$$

$$\lambda'_{kd} = -L_{md}i_d + (L'_{lkd} + L_{md})i'_{kd} + L_{md}i'_{fd} \quad (3.46)$$

$$\lambda'_{kq} = -L_{mq}i_q + (L'_{lkq} + L_{mq})i'_{kq} \quad (3.47)$$

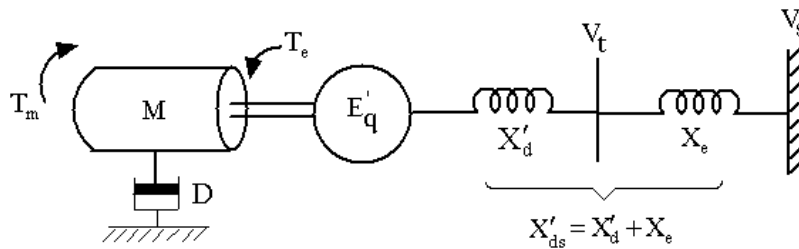
$$L_d = L_{md} + L_{ls}, L_q = L_{mq} + L_{ls} \quad (3.48)$$

3.3. Tek Makine Sonsuz Güçlü Bara Sistemi

Sonsuz büyük güçlü şebekeye göre salınım yapan bir makinenin bulunduğu bir sistemde makinenin rotor açısının belirsiz şekilde artıp artmadığını veya belirli bir çalışma noktası etrafında salınım yapıp yapmadığını, başka bir deyişle makinenin senkronizma dışı olup olmadığını belirlemek üzere salınım denklemlerinin çözülmesi ve rotor açısının zamana göre değişiminin incelenmesi gereklidir.

3.3.1. Salınımların klasik model aracılığı ile incelenmesi

Şekil 3.3'deki gibi hat üzerinden sonsuz baraya bağlı bir senkron makinede, shaft üzerinde ön hareketlendiricilerin meydana getirdiği T_m mekanik moment ve elektriksel kuvvetlerin oluşturduğu T_e elektriksel moment vardır. Şekil 3.3'de gösterilen sisteme ait eşitlikler Eş. 3.49 ve Eş. 3.50 ifadeleriyle verilmiştir.



Şekil 3.3. X_e reaktansı üzerinden sonsuz baraya bağlı senkron jeneratör

$$T_e = \frac{E'_q V_s}{X'_{ds}} \sin \delta_0 \quad (3.49)$$

$$T_m = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d \delta}{dt} + T_e \quad (3.50)$$

δ_0 'ın küçük değişimlerinde Eş. 3.49'un doğrusallaştırılmış hali Eş. 3.51 ile gösterilmiştir. Eş. 3.52'de gösterilen $\Delta \delta$ 'nın sabiti "senkronlama moment katsayısı" olarak ifade edilir [15, 17, 27].

$$\Delta T_e = \left(\frac{E'_q V_s}{X'_{ds}} \cos \delta_0 \right) \Delta \delta \quad (3.51)$$

$$K_s = \frac{E'_q V_s}{X'_{ds}} \cos \delta_0 \quad (3.52)$$

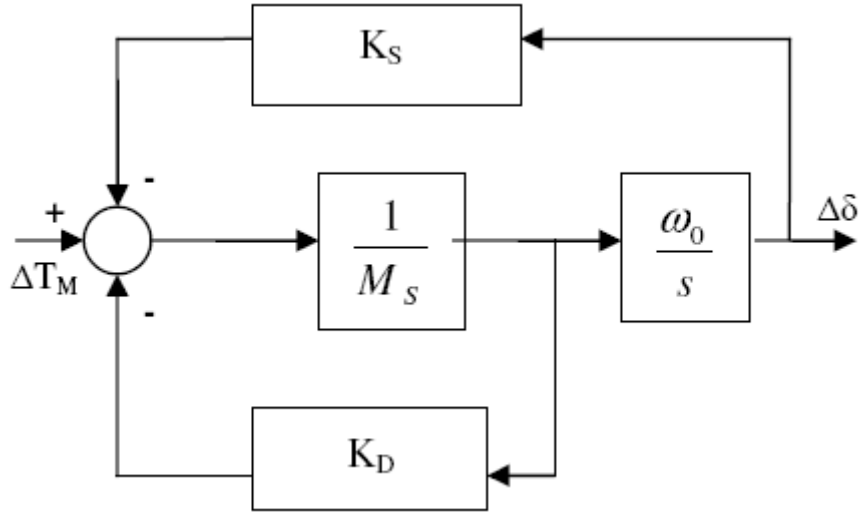
Bkz. 2.26'daki eşitlik bu doğrultuda ele alınarak Eş. 3.53'deki gibi ifade edilebilir. Bu eşitliklerde güç, hız ve momente ilişkin ifadeler birim değer cinsindendir.

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega}{dt} &= \frac{1}{2H} (\Delta T_m - K_s \Delta \delta - K_D \Delta \omega) \\ \frac{d\Delta\delta}{dt} &= \omega_s \Delta \omega \end{aligned} \quad (3.53)$$

Eş. 3.53'de ifade edilen K_s ve K_D sırası ile senkronlama ve sönümlleme momenti katsayısıdır. Bu eşitlikler durum uzay matrisi formunda düzenlenir ise Eş. 3.54 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_s}{2H} \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{2H} \Delta T_m \quad (3.54)$$

Eş. 3.54'ün blok diyagram olarak gösterimi Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Sisteme mekanik moment değişimi yoluyla bir bozucu etki uygulanırsa ($\Delta T_m \neq 0$), bu değişime karşılık yük açısı değişimi nedeniyle $\Delta \delta K_s$ ve açısal hız değişiminden dolayı $\Delta \omega K_D$ kadar iki çeşit zıt moment ortaya çıkar.



Şekil 3.4. Senkronizasyon ve sönümleme momenti etkisi

Senkronlama momenti; enerji dönüşümü ile ilgili ters bir momenttir ve bu yüzden kayıpsızdır. Başka bir ifadeyle girişte ΔT_m 'de bir değişim için cevapta ters momentin senkronlama bileşeninin oluşumu, jeneratörün ek olarak mekanik girişini elektrik enerjisine dönüştürebilir ve böylece senkronizmada kalabilir anlamındadır. Makine yeterli senkronlama momenti ile ΔT_m 'deki bir artışı tersleyici yeteneğini kaybettiği gibi, aşırı mekanik giriş şaftı hızlandırmaya devam edeceğinden makine senkronizmayı kaybetmektedir. Bu yüzden, senkronlama momenti oluşturma yeteneği kararlılık için çok önemlidir [21].

Bu ters momentlerin ikinci çeşidi sönümleme momenti olarak gösterilmektedir; enerji harcanımı (moment kaybı) ile ilgili ters momenttir ve rotor salınımlarının (yani $\Delta\delta$ ve $\Delta\omega$ 'deki salınımları) enerji harcandığına ve bu yüzden zamanla bozulduğuna emin olmak için önemlidir [16, 18, 20-27, 29].

Sönümleme momentinin tek kaynağı olarak da mekanik şaft sistemindeki sönümleme momenti Eş. 3.55'de gösterilmiştir.

$$\Delta T_D = K_D \Delta \omega \quad (3.55)$$

Şekil 3.4'deki blok diyagramından aşağıdaki ifadeye sahip olunabilir.

$$\begin{aligned}\Delta\delta &= \frac{\omega_s}{s} \left[\frac{1}{2Hs} (-K_s \Delta\delta - K_D \Delta\omega + \Delta T_m) \right] \\ &= \frac{\omega_s}{s} \left[\frac{1}{2Hs} (-K_s \Delta\delta - K_D s \frac{\Delta\delta}{\omega_s} + \Delta T_m) \right]\end{aligned}\quad (3.56)$$

Düzenleme yapılır ise,

$$s^2(\Delta\delta) + \frac{K_D}{2H} s(\Delta\delta) + \frac{K_S}{2H} \omega_s (\Delta\delta) = \frac{\omega_s}{2H} \Delta T_m \quad (3.57)$$

Böylece karakteristik eşitlik aşağıdaki gibi bulunur:

$$s^2 + \frac{K_D}{2H} s + \frac{K_S \omega_s}{2H} = 0 \quad (3.58)$$

Genel forma sahip denklem $s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0$ şeklinde ifade edilir. Buradan, sönümlenmemiş doğal frekans,

$$\omega_n = \sqrt{K_S \frac{\omega_0}{2H}} \quad (3.59)$$

ve sönümleme oranı ise,

$$\begin{aligned}\xi &= \frac{1}{2} \frac{K_D}{2H\omega_n} \\ &= \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{2HK_S\omega_s}}\end{aligned}\quad (3.60)$$

olarak elde edilir. Senkronlama momenti katsayısı K_S arttığında doğal frekans artar ve sönümleme oranı azalır. Sönümleme momenti katsayısı K_D deki bir artış

sönümleme oranını artırırken, eylemsizlik sabitindeki bir artış hem ω_n hem de ξ 'in azalmasını sağlar.

Bir senkron jeneratörde sistem kararlılığı her iki momentin varlığı ile mümkündür. Zayıf senkronlama momenti rotor açısında periyodik olmayan kayma nedeni ile kararsızlığa neden olur iken zayıf sönüm momenti ise salınımda kararsızlığa yol açar [16, 21, 22].

3.3.2. Senkron jeneratörün basitleştirilmiş modeli

Senkron jeneratörün matematiksel modelinin basitleştirilmesine dayanan literatürde birçok farklı çalışma bulunmaktadır. Ancak yaygın olarak kullanılan model rotor mekanik dinamiklerine uyarma dinamiklerinin eklendiği 3. derece modeldir [21, 22]. Basitleştirmenin seviyesini, yapılan kabuller ve ihmaller belirlemektedir. Bu ihmaller ve kabuller genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir [16-18, 27].

- Stator akı değişiminin ihmalı
- Hız değişiminin stator gerilimi üzerindeki etkisinin ihmalı yani bozucu durumunda da jeneratörün açısal hızının değişmediğinin kabulü
- Sönümleme (Damper) sargılarının ihmalı
- Sabit akı bağı modeli yani bozucu durumda akının sabit kaldığının kabulü
- Subtransient devrelerin etkilerini içeren sabit akı bağı modeli

Birim değere sahip stator EMK'larının rotor büyüklükleri cinsinden karşılığı dikkate alındığında, akı eşitlikleri ve gerilim eşitlikleri düzenlenerek sonsuz baraya bağlı senkron jeneratörün temsil edildiği 3. derece modelin elektriksel dinamiği aşağıdaki gibi elde edilir [21, 22, 27].

$$T'_{d0} \dot{E}_q = E_{fd} - E_q \quad (3.61)$$

$$E_q = E'_q + (x_d - x'_d) I_d \quad (3.62)$$

$$I_q = \frac{V_\infty \sin \delta}{x_e + x_q} \quad (3.63)$$

$$I_d = \frac{E_q - V_\infty \cos \delta}{x_e + x_d} \quad (3.64)$$

$$T_e = E_q I_q + (x_q - x_d) I_d I_q \quad (3.65)$$

$$V_t = \sqrt{(E_q - x_d I_d)^2 + (x_q I_q)^2} \quad (3.66)$$

Burada çalışılan uyarma tipi ve yapılan kabuller ile uyarma devresi dinamikleri değişmektedir. Senkron jeneratörün mekanik dinamikleri Bkz. Eş. 2.26 ile tanımlandığı gibidir.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - D \cdot \Delta\omega) \quad (3.67)$$

$$\dot{\delta} = \omega_0 \cdot \Delta\omega$$

Sonsuz güçlü bara gerilimi V_∞ , rotor referans çevresinde iletim hattı direnci ($r_e \approx 0$) ihmal edildiğinde;

$$V_{q\infty} = E'_q - (x'_d + x_e) i_d \quad (3.68)$$

$$V_{d\infty} = (x_d + x_e) i_q \quad (3.69)$$

olarak yazılabilir. Eş. 3.68 ve Eş. 3.69 V_∞ ve yük açısı δ cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_{q\infty} - j V_{d\infty} = V_\infty e^{-j\delta} = V_\infty (\cos \delta - j \sin \delta) \quad (3.70)$$

Eş. 3.68 ve Eş. 3.69 ifadesi i_q ve i_d için çözülürse,

$$i_q = \frac{V_\infty \sin \delta}{x_e + x_q} \quad (3.71)$$

$$i_d = \frac{E'_q - V_\infty \cos \delta}{x_e + x'_d} \quad (3.72)$$

elde edilir. Sonsuz bara gerilimi V_∞ sabit kabul edilip, çalışma noktası etrafındaki küçük değişimler için Eş. 3.71 ve Eş. 3.72 aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$\Delta i_q = \frac{V_\infty \cos \delta_0 \Delta \delta}{x_e + x_q} \quad (3.73)$$

$$\Delta i_d = \frac{\Delta E'_q}{x_e + x'_d} - \frac{V_\infty \sin \delta_0 \Delta \delta}{x_e + x'_d} \quad (3.74)$$

Eş. 3.65 küçük değişimler için aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$\Delta T_e = E_{q0} \Delta i_q + i_{q0} \{ \Delta E'_q + (x_q - x'_d) \Delta i_d \} \quad (3.75)$$

Eş. 3.73 ve Eş. 3.74, Eş. 3.75'de yerine yazılıp $\Delta \delta$ ve $\Delta E'_q$ için iki gruba ayrılırsa,

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (3.76)$$

$$K_1 = \frac{E_{q0} V_\infty \cos \delta_0}{x_e + x_q} + \frac{x_q - x'_d}{x_e + x'_d} i_{q0} V_\infty \sin \delta_0 \quad (3.77)$$

$$K_2 = \frac{V_\infty \sin \delta_0}{x_e + x'_d} \quad (3.78)$$

Eş. 3.61 küçük değişimler için aşağıdaki gibi düzenlenir:

$$T'_{d0} \frac{d\Delta E'_q}{dt} = \Delta E_{fd} - \Delta E'_q - (x_d - x'_d) \Delta i_d \quad (3.79)$$

Eş. 3.74'de verilen Δi_d ifadesi Eş. 3.79'da yerine yazılıp elde edilen ifade düzenlenirse,

$$T_{d0}' \frac{d\Delta E_q'}{dt} + \frac{\Delta E_q'}{K_3} = \Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta \quad (3.80)$$

$$K_3 = \frac{x_e + x_d'}{x_e + x_d} \quad (3.81)$$

$$K_4 = \frac{x_d - x_d'}{x_e + x_d'} V_\infty \sin \delta_0 \quad (3.82)$$

stator eşitliklerinden (Eş. 3. 82, jeneratör uç gerilimi genlik değeri Eş. 3.83'deki gibi yazılabilir

$$\begin{aligned} v_q &= w_r \lambda_d = w_r (L_{md} i_f' - L_d i_d) \\ v_q &= E_q' - x_d' i_d \\ v_d &= -w_r \lambda_q = -w_r (L_q i_q) \\ v_d &= x_q i_q \end{aligned} \quad (3.82)$$

$$V_t^2 = v_q^2 + v_d^2 \quad (3.83)$$

Eş. 3.83 ifadesi küçük değişimler için

$$2V_t \Delta V_t = 2v_{q0} \Delta v_q + 2v_{d0} \Delta v_d \quad (3.84)$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 3.83 ve Eş. 3.84 $E_q' = v_q + x_d' i_d$ ve $v_d = x_q i_q$ eşitlikleri kullanılarak aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\Delta V_t = \frac{V_{q0}}{V_t} (\Delta E_q' - x_d' \Delta i_d) + \frac{v_{d0}}{V_t} x_q \Delta i_q \quad (3.85)$$

Eş. 3.73 ve Eş. 3.74'de verilen ifadeleri Eş. 3.75'de Δi_q ve Δi_d yerine yazılıp elde edilen ifade $\Delta \delta$ ve $\Delta E_q'$ için düzenlenirse jeneratör uç gerilim ifadesi,

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (3.86)$$

bulunmuş olur. Eş. 3.86 ifadesinde

$$K_5 = \frac{x_q}{x_e + x_q} \frac{v_{d0}}{V_t} V_\infty \cos \delta_0 - \frac{x'_d}{x_e + x'_d} \frac{v_{q0}}{V_t} V_\infty \sin \delta_0 \quad (3.87)$$

$$K_6 = \frac{x_q}{x_e + x'_d} \frac{v_{q0}}{V_t} \quad (3.88)$$

olarak tanımlanmıştır.

Bu eşitlikler Heffron-Phillips modelini temel alan doğrusallaştırılmış senkron jeneratöre ait ifadeler olup sistem kararlılığına uyartım kontrolü etkisinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılır [18, 27, 31, 32]. Eşitlerde ifade edilen K_1 - K_6 sabitleri güç sistemi değişkenleri olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

K_1 : Eş 3.77'de ifade edilen K_1 sabiti senkronlama moment katsayısıdır. Önceden de görüldüğü gibi çalışma durumuna bağlıdır. Fakat buradaki özel durum nedeniyle relüktans (manyetik direnç) moment bileşeni de vardır.

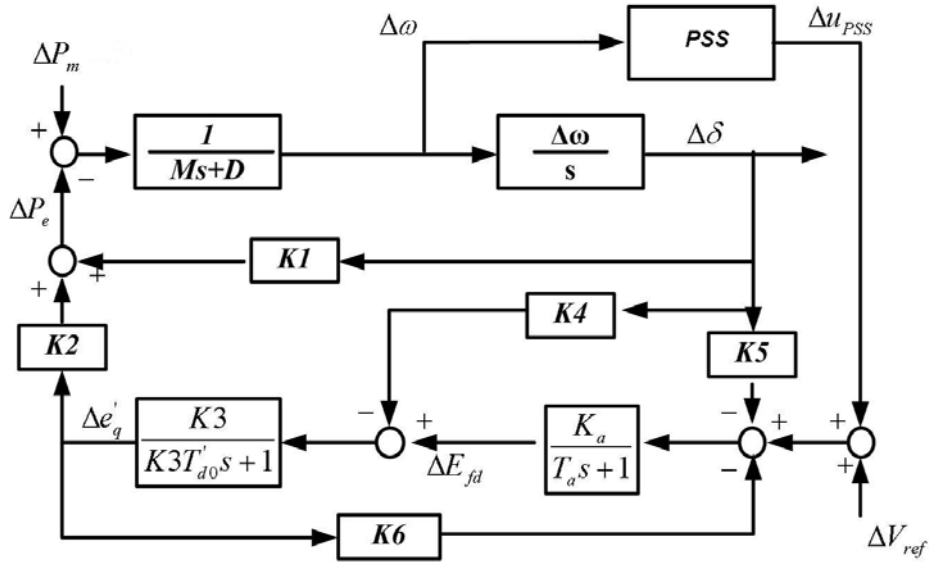
K_2 : Eş 3.78'de ifade edilen K_2 sabiti alan akımı değişimi ile elektriksel moment değişim ilişkisini belirten bir katsayıdır. Bu katsayının çalışma durumuna bağlı olarak olduğu açıkça görülmektedir.

K_3 : Eş 3.81'de ifade edilen K_3 sabiti (empedans faktörü parametresi) ve T_3 (yükklü 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 senkron makine için oldukça önemli parametrelerdir.

K_4 : Eş 3.82’de ifade edilen K_4 sabiti yük açısı değişimi ve K_3 yoluyla alan akı değişimi arasındaki bağlantıyı yapan katsayıdır. Senkron makinede çok etkili bir katsayıdır. Armatür reaksiyonunun demanyetizasyon etkisini temsil eder.

K_5 : Eş 3.87’de ifade edilen K_5 sabiti E'_q için yük açısındaki değişime karşılık terminal gerilimindeki değişimi veren katsayıdır.

K_6 : Eş 3.88’de ifade edilen K_6 sabiti sabit rotor açısı için E'_q ’deki değişime karşılık terminal gerilimindeki değişimi veren katsayıdır.



Şekil 3.5. Doğrusallaştırılmış TMSGB modeli

Bu blok diyagramına ait matematiksel model Eş. 3.89-92 ile ifade edilmektedir.

$$\dot{\Delta\delta} = \omega_b \Delta\omega \quad (3.89)$$

$$\dot{\Delta\omega} = -\frac{K_1}{M} \Delta\delta - \frac{D}{M} \Delta\omega - \frac{K_2}{M} \Delta e'_q \quad (3.90)$$

$$\dot{\Delta e'_q} = -\frac{K_4}{T_{d0}} \Delta\delta - \frac{1}{T_{d0} K_3} \Delta e'_q + \frac{1}{T_{d0}} \Delta E_{FD} \quad (3.91)$$

$$\dot{\Delta E}_{FD} = -\frac{K_A K_5}{T_A} \Delta \delta - \frac{K_A K_6}{T_A} \Delta e_q' - \frac{1}{T_A} \Delta E_{FD} + \frac{K_A}{T_A} U_{PSS} \quad (3.92)$$

Uyartım sistemi ve PSS ilave edilmiş TMSBG sisteminin durum uzay matrisi Eş. 3.93'deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta \omega} \\ \dot{\Delta E}_q' \\ \dot{\Delta E}_{fd}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ K_1/M & D/M & K_2/M & 0 \\ -K_4/T_{d0}' & 0 & -K_3/T_{d0}' & 1/T_{d0}' \\ -K_A K_5/T_A & 0 & -K_A K_6/T_A & -1/T_A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_q' \\ \Delta E_{fd}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_A/T_A \end{bmatrix} \cdot U_{PSS} \quad (3.93)$$

3.4. Senkron Jeneratör Uyartım Sistemleri

Güç sisteminin kararlılığını artırma da ve kontrolünü sağlamada genel olarak bir uyarıcı ve bir gerilim regülatörünü içeren uyartım sistemleri kullanılır. Senkron makinelerle ilişkin uyartım sistemlerinin, elektrik sistemleri içerisinde oluşan geçici olaylar üzerinde belirgin etkisi vardır. Güç sistemlerinin sürekli hal kararlılık sınırlarının artırılmasında yüksek kazançlı ve sürekli çalışan gerilim regülatörlerinin uygun olduğu görülmüştür. Ancak otomatik gerilim regülatörlü (Automatic voltage regulator, AVR) sistemlerinin, sistemde oluşan elektromekanik salınımların sönümlenmesine dolayısıyla sistemin sürekli hal kararlılığının iyileştirilmesine olan etkileri oldukça sınırlıdır. Bunun yanı sıra, çalışma noktasına bağlı olarak AVR'ler güç sistemine sürekli hal kararlılığını bozucu yönde etki edebilmektedir [15-18].

Uyartım sisteminin görevini tam olarak yerine getirilebilmesi için aşağıdaki performans gereksinimlerini sağlaması gerekmektedir [16, 17, 27];

- Güç sisteminin kararlılığı için yeterli performansa karşılık gelen sistem tepkisine sahip olmalı
- Sınırlama ve koruma fonksiyonları jeneratörün 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) uyarım sistemlerini 3 sınıfa ayırmış olup bunlar DA tipi, ST tipi ve AC tipi uyarım sistem modelleridir. Çizelge 3.1’de bu sınıflandırmayı içeren 19 adet uyarıcı ve regülatörden oluşan uyarım sistem modeli gösterilmiştir. Bu modeller geçici hal ve sürekli hal kararlılık çalışmalarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir [33]

Çizelge 3.1. IEEE uyarıcı modelleri

DC tip uyarıcı	DC1A, DC2A, DC3A, DC4B
AC tip uyarıcı	AC1A, AC2A, AC3A, AC4A, AC5A, AC6A, AC7B, AC8B
ST tip uyarıcı	ST1A, ST2A, ST3A, ST4B, ST5B, ST6B, ST7B

3.4.1. DA tipi uyarım sistem modelleri

Bu tip modelde uyarım sistemi güç kaynağı olarak komütatörlü DA jeneratör kullanılmaktadır. Bu sistemler günümüzde artık yerini AA ve Statik sistemlere terketmiştir. Bu uyarım sistemlerinde bir AA alternatör ve jeneratör alanı için gerekli doğru akım üretmek için sabit veya döner doğrultucular kullanılır. Bu gibi uyarım sistemlerinde yüklenme etkileri önemlidir ve jeneratör uyarım akımının bu sistemlere giriş olarak kullanılması bu etkilerin tam olarak görülmesine imkan verir. Bu sistemlerden bazıları (AA4A tipi) negatif alan kuvveti sağlayabilirken birçoğu negatif alan akımı sağlayamazlar [15, 25, 33].

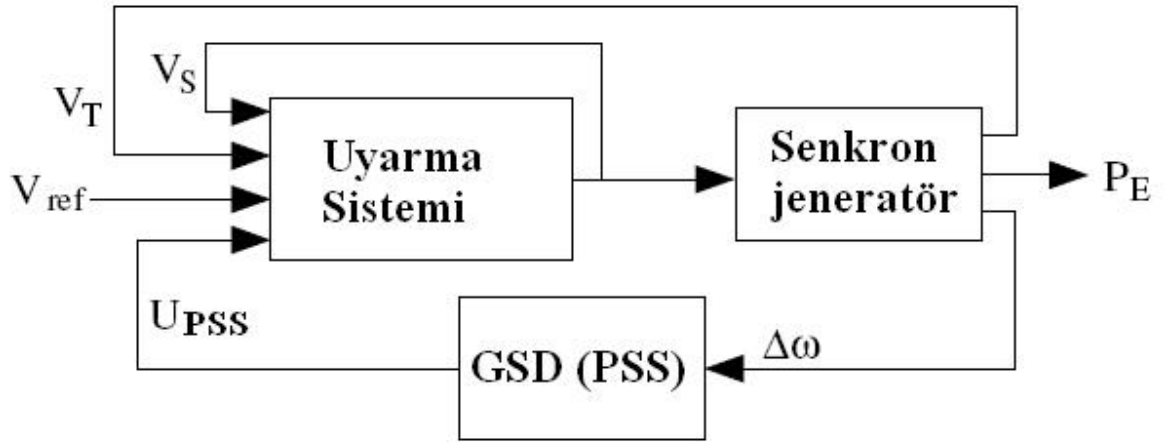
3.4.2. ST tipi uyarım sistem modelleri

Burada senkron makina, uyarım için gereken gücü bir uyarım trafosu ve tristörlü AA/DA dönüştürücüsü üzerinden alır. Gerilimi (bileşik sistemlerde aynı zamanda akımı), uygun bir değere dönüştürmek için bir transformatör kullanır. Doğrultucular jeneratör alanı için gerekli doğru akımı sağlamak üzere kontrollü veya kontrolsüz

olabilirler. Bu sistemlerin çoğundan negatif alan gerilimi elde edilebilir, buna karşılık negatif alan akımı elde edilemez. Bunun için daha detaylı modeller gerekmektedir. Statik sistemlerin çoğunda uyarım gerilimi çok yüksek değerlere çıkabilir. Bu yüzden uyarım sistemini ve jeneratör rotor sargılarını korumak için ilave alan akım sınırlama devreleri kullanılır. Bu gibi ek devreler blok diyagramlarında gösterilmemiştir [15, 25, 33].

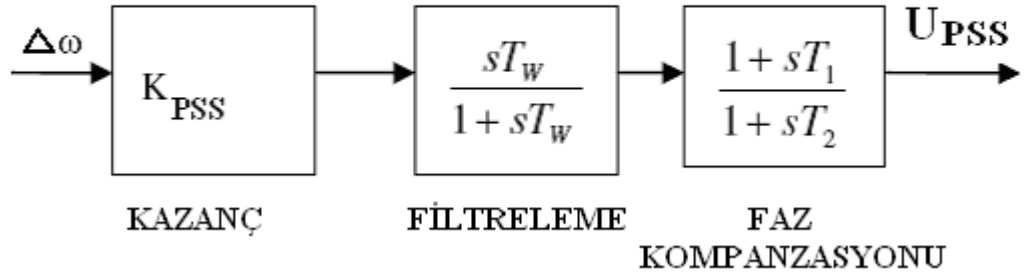
3.5. Güç Sistemi Dengeleyicisi (Power System Stabilizer PSS)

Senkron jeneratör uyarım kontrolü, güç sistem kararlılığı ve elektriksel güç kalitesinin sağlanmasında çok önemli rol oynar. Uyarım sistemleri normalde, yüksek kazanç ve küçük zaman sabitine sahip sistemlerdir. Yani farklı işletme koşullarında sistemde çok çabuk kompanzasyon ve sönümlleme yapabilecek kapasiteye sahiptirler. Yüksek kazançlı uyarım kontrolü genellikle geçici hal kararlılığı sağlar fakat kontrolörün ani cevabında kalıcı düşük frekans salınımları oluşur. Bu da diğer makinelerle arasında dinamik kararsızlık oluşmasına yol açar. Güç sistemlerinde oluşabilecek bozucu etkiler sonucu mekanik ve elektriksel güç dengesinin bozulması durumunda sistemin açısal kararlılığını koruyabilmesi için öncelikle yeterli senkronizasyon momentinin üretilmesi gerekir. Senkronizasyon momentini güçlendirmek adına jeneratörlerin uyarma sistemine etkiyen otomatik gerilim regülatörleri kullanılır. Ancak senkronizasyon momenti kararlılığı tek başına sağlayamaz. Rotor açısının referans değerine göre değişimi karşılayan senkronizasyon momenti, rotor açısının kayma yapmasını engeller. Ancak rotor açısal hızındaki değişimi karşılayan sönüm momentinin eksikliği söz konusu olursa rotor açısı salınımlarının genlikleri azaltılamaz ve kararlılık sağlanamaz. Bu probleme geleneksel çözüm yaklaşımı, jeneratörün uyarmasına ek yardımcı işaretler üreten ve bu şekilde jeneratörde oluşan elektromekanik salınımların söndürülmesine yardımcı bir eleman olan Güç Sistemi Dengeleyicisi (Power System Stabilizer PSS) Şekil 3.6’da olduğu gibi eklemektir [16-19, 21, 22, 29-33].



Şekil 3.6. GSD ve senkron jeneratör bağlantısı

Geleneksel güç sistemi dengeleyicisi Şekil 3.7’de gösterildiği üzere kazanç, filtreleme, faz kompanzasyonu ve işaret sınırlayıcı bloklarından oluşmaktadır.



Şekil 3.7. GSD parametre blok diyagramı

Kazanç

Rotor salınımlarını sönümlemede güç sistemi dengeleyicisi kazancının büyük bir etkisi vardır. Kazanç değeri, geniş bir aralıktaki etkiler göz önünde bulundurularak en büyük sönümleme sağlayacak şekilde belirlenir. Dengeleyici kazancı artıkça bir noktaya kadar sönümlemede artar, fakat kazanç daha fazla artırılırsa sönümlemede düşme gözlenir. İdealde kazanç için 1-20 arasında bir değer seçilebilir

Filtreleme

Filtreleme bloğunun temel amacı yüksek geçiren filtre gibi davranıp, sürekli haldeki değişimlerin jeneratör uç gerilimini değiştirmesini engellemektir. Tw zaman sabiti rotor hızından kaynaklanan salınımları değiştirmeden geçirecek kadar büyük olmalıdır. Tw değeri 1-20 s aralığında seçilirken, istenilen frekanstaki işaretleri değiştirmeyecek kadar büyük, senkron jeneratör geriliminde istenmeyen değişimlere yol açmayacak kadar da küçük olmasına dikkat edilir. 0,8-2 Hz'lik yerel mod salınımları için 1,5 sn'lik değer yeterli iken küçük zaman sabitlerinin düşük frekanslarda büyük faz ilerletmesine neden olmasından dolayı düşük frekanslı bölgesel salınımlarda 10 sn üstünde olması gerekir.

Faz kompanzasyonu

Rotor açısı salınımlarını söndürebilmek için, güç sistemi dengeleyicisi sebebiyle senkron jeneratör rotoruna etkiyen elektriksel momentin, rotor hızı değişimiyle aynı fazda olması gerekir. Kullanılan faz kompanzasyon filtresi uyarma girişi ile elektriksel moment arasındaki kapasitif faz farkını kompanze etmek için kullanılırlar. Eğer faz kompanzasyonunun derecesi küçük istenirse, birinci dereceden tek bir blok yeterli olur. Güç sistemi dengeleyicisinin yerel ve bölgesel salınımlarda sönümle yapması gerektiğinden geniş bir frekans aralığında sönümleme yapacak şekilde tasarlanır.

Sınırlandırıcı

Güç sistemi dengeleyicisi sınırlandırıcısı, dengeleyici pozitif çıkış sınırı, büyük salınımlara, yüksek düzeyde etki etmesi için büyük bir bağıl değer olan 0.1 - 0.2 p u aralığında ayarlanır. Negatif yönde ise -0.05 - -0.1 pu sınırları uygun olup, dinamik cevap için yeterli kontrol aralığı sağlar.

3.5.1. Güç sistemi dengeleyicisi çeşitleri

Giriş sinyalinin farklılıklarına göre güç sistemi dengeleyicisini gruplara ayrılabilir. Pratikte de kullanılan temel dengeleyici çeşitleri aşağıda verilmiştir.

$\Delta\omega$ Güç sistemi dengeleyicisi

Hidrolik santrallerde 1960'lardan beri kullanılan $\Delta\omega$ güç sistemi dengeleyicilerinde en büyük sıkıntı hız sapmalarını ölçecek aletin tasarımında milin kaçması gibi etkenlerden kaynaklanan gürültünün en aza indirilmesidir. Bu düzey gürültü frekansına bağlı olup, 5 Hz'in altındaki gürültülerin oranı % 0,2'den çok olmamalıdır. Çünkü uyarma gerilimindeki düşük frekanslı değişimler terminal geriliminde önemli değişimlere neden olur. Mil dönme hızı frekansı ve mil kaçması, burada en önemli gürültü bileşenlerini oluşturur. Bu tip düşük frekans gürültüler geleneksel elektrik filtreleriyle yok edilemezler. Milin etrafında birkaç turdan alınan sonuçların toplanması yani hız işaretini ölçme yöntemi ile bur sorun giderilir. Termal ünitelerin çoğunda, bazı sınırlamalar olmasına rağmen mil hızının doğrudan ölçülmesine dayanan dengeleyiciler kullanılır. Burulma filtresine ihtiyaç göstermeleri başlıca dezavantajlarıdır. Dengeleyici işaretlerin burulma bileşenlerini azaltmak üzere kullanılan bu filtre, düşük frekanslarda fazın geri kalmasını sağlayarak, kabul edilebilir dengeleyici kazancını sınırlandırır. Genelde bu çok sınırlayıcı olduğundan, dengeleyicinin sistem salınımlarını sönümlemede etkisini azaltır. $\Delta P_e - \omega$ dengeleyicilerle bu sınırlamalar giderilmiş olur.

$\Delta P_e - \omega$ Güç sistemi dengeleyicisi

Eş. 3.94 ivmelendirme gücünden, rotor hız sapmalarıyla orantılı işaretin nasıl türetilceğini göstermektedir. Burada M atalet sabitini, P_m mekrik giriş gücündeki değişimi, P_e elektriksel çıkış gücündeki değişimi ve ω_{eq} eşdeğer hız sapmasını ifade eder.

$$\Delta\omega_{eq} = \frac{1}{2\tau_a} \int (\Delta P_m - \Delta P_e) dt \quad \text{rad/sn} \quad (3.94)$$

Bu tip dengeleyicilerde rotor hız sapmalarıyla orantılı işaret, tahrik gücünden türetilir. Temeli burulma modlarını içermeyen eşdeğer hız sapma işaretinin elde edilmesidir. Hızlı vana hareketlerine bağlı olarak mekanik güç değişiminin bağlı olarak yavaş olması nedeni ile mevcut mekanik gücü temsil için türetilen sinyalin entegrali burulma frekansları içerdiğinden, alçak geçiren bir filtre geçirilmesi gerekir.

Frekans tabanlı güç sistemi dengeleyicisi

Frekans işareti yerel salınım modlarına göre, bölgeler arası büyük salınım modlarına daha duyarlı olduğu için bölgeler arası salınımların sönümlenmesinde, giriş işareti olarak mil hızının kullanılmasından daha iyi sonuç veriler. Bu dengeleyicilerin, hız tabanlı dengeleyicilerde olduğu gibi buhar türbinli ünitelerde kullanılması halinde burulma modlarının filtrelenmesi gerekmektedir.

Dijital güç sistemi dengeleyicisi

Özellikle uyarma sistemlerinin de dijital olarak kontrol edilmesi sonucu, yukarıda anlatılan dengeleyiciler bilgisayar yazılımı haline gelmişlerdir.

4. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

Bu çalışmada yapay zeka teknikleri içerisinde sezgisel teknikler olarak bilinen diferansiyel evrim algoritması (Differential Evolution, DE), parçacık sürüsü optimizasyon algoritması (Particle Swarm Optimization, PSO) ve bu çalışma için önerilen yapay arı kolonisi (Artificial Bee Colony, ABC) algoritması yöntemleri tanıtılarak, bu tekniklerin güç sistem kararlılığı problemlerinde uygulanma yöntemleri üzerine araştırma yapılmıştır. Klasik tekniklerin sahip olduğu erken yakınsama, yerel en küçüklere takılma, hesaplama karmaşıklığının yüksek olması gibi dezavantajlar, sezgisel yaklaşımların kullanımını ortaya çıkarmıştır. Tipik bir sezgisel algoritmanın temel basamakları aşağıdaki gibidir:

Adım 1. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması

Adım 2. Değerlendirme

Adım 3. Tekrarlama

Adım 3.1. Seçme

Adım 3.2. Mutasyon ve yeniden birleştirme

Adım 3.3. Değerlendirme

Durdurma Kriteri Sağlanıncaya Kadar

4.1. Diferansiyel Evrim Algoritması (Differential Evolution, DE)

Diferansiyel evrim algoritması (Differential Evolution, DE) yada diferansiyel gelişim algoritması, özellikle sürekli verilerin söz konusu olduğu problemlerde etkin sonuçlar verebilen, işleyiş ve operatörleri itibarıyla genetik algoritmaya dayanan popülasyon temelli sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. DE ilk defa, genetik algortmadan (GA) esinlenerek ve özellikle sürekli parametrelili problemlerin çözüm performansını artırmaya yönelik olarak ortaya çıkmıştır [34]. DE'nin önerilen iki farklı şeması, dokuz farklı De Jong test fonksiyonları üzerinde uygulanmış ve Nelder&Mead stratejisinin tavllanmış versiyonu ve adaptif tavlama benzetimi yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. DE, gerçek parametrelili optimizasyon problemlerinin çözümü için en son geliştirilmiş evrimsel algoritmalarından biridir.

Popülasyon tabanlı olarak çalışan DE, aynı anda birden çok noktada araştırma yapılabilmektedir. İterasyonlar boyunca, operatörler yardımıyla problemin çözümü için daha iyi sonuçlar araştırılmaktadır. DE algoritmasında kullanılan basit mutasyon işlemi, algoritmanın başarımını geliştirmekte ve onu daha güçlü yapmaktadır. DE, diğer meta sezgisel yöntemlerden farklı olarak, seçim aşamasında, en iyi bireylerin yaşamaya devam etmesi ya da bireylerin her iterasyonda yeniden oluşturulması yerine, popülasyondaki bireyler iterasyonlar boyunca varlıklarını devam ettirmekte ve ancak kendisinden türetilmiş daha iyi bir vektörle yer değiştirmektedirler. Bu özelliğinin yanı sıra diğer özellikleri için de şunlar söylenebilir: hızlı, basit, kolayca kullanılabilir ve değiştirilebilir, etkili küresel en iyiyi bulma kabiliyetli, doğal olarak paralel, kayan nokta formatına bağlı hassasiyet sınırlamalı, matris çarpımları ve sıralama işlemleri olmadığı için hesaplama maliyeti açısından avantajlı, daha önceden tanımlanmış herhangi bir olasılık dağılımlı mutasyon kullanmamaktadır. Algoritma, gerçel sayı formatıyla çalışması nedeniyle, bu formata uygun problemlerde oldukça başarılı sonuçlar vermekte ve çözüm uzayını daha iyi tarayabilmektedir. Mevcut çözümün başarımlı değerinin hesaplanmasının uzun sürebileceği problemlerde, doğal olarak paralel olan yapısı, etkin çözümler elde edilmesine imkan vermektedir [34, 35].

4.1.1. Diferansiyel evrim algoritması terimleri

DE’de kullanılan parametreler genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

N_p : Popülasyon büyüklüğü veya amaç vektör sayısı

D: Değişken sayısı veya amaç vektör sayısı

Cr: Çaprazlama Oranı [0.1,1.0]

G : Nesil (1, 2, 3, ..., Gmax)

F: Ölçekleme faktörü

$x_{j,i,G}$: G neslindeki, i vektörünün j parametresi

$n_{j,i,G+1}$: Mutasyon ve çaprazlamaya tabi tutulmuş ara vektör

$u_{j,i,G+1}$: $x_{j,i,G}$ den bir sonraki nesil için üretilen vektör

$r_{1,2,3}$:Yeni vektörün üretilmesinde kullanılacak rasgele seçilmiş değerler

$r_{1,2,3} \in \{1,2,3, \dots, N_p\}$ $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$

$x_{j,i}^{(l)}, x_{j,i}^{(u)}$: Değişkenlere ait alt ve üst sınır değerleri

4.1.2. Popülasyon yapısı ve parametre sınırları

Sabit büyüklükte popülasyon kullanmakta olan DE algoritmasında N_p , popülasyondaki amaç vektörlerinin sayısına ve D 'de bir amaç vektöründeki parametrelerin sayısına karşılık gelmektedir. DE algoritması paralel formda gerçekleştirilirken, amaç vektörlerinin iki dizisi hafızada tutulur. Birinci dizi mevcut ebeveyn popülasyonu için diğeri ise yeni vektörleri içeren gelecek nesili oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. Başlangıç amaç vektörleri iyi tanımlanmış sınırlamalara sahip bir araştırma uzayından düzgün dağılımla rasgele elemanlar seçilerek oluşturulur. Pratikte, başlangıç parametre sınırları genellikle fiziksel şartlara göre belirlenir. Fiziksel şartlar belirleyici değilse o zaman başlangıç alt ve üst parametre sınırları, küresel en iyiyi ihtiva eden bölgeleri kapsayacak kadar büyük seçilmelidir. Alt ve üst parametre sınırları başlangıç parametreleri için kullanıldıktan sonra algoritmanın başlangıçta verilen sınırlar ötesinde araştırma yapmasına imkan vermek amacıyla ihmal edilebilir. Bununla birlikte sınırlamalar, özellikle düzgün yada düzgüne yakın ani değişim göstermeyen yüzeyler ile çalışıldığında sonsuza gidişin engellenmesi için gereklidir. Başlangıçta eğer iyi bir çözüm tespit edilebilmişse veya mevcutsa, algoritma bu nominal çözüm etrafında dağılmış amaç vektörlerinden oluşan popülasyonla araştırmaya başlayabilir. Ancak bu şekilde bir uygulama araştırmayı bölgeselleştireceğinden pek tavsiye edilmez. Hatırlanması gereken önemli bir nokta, başlangıç parametre değerlerinin bir şekilde rasgele dağıtılmasıdır. Çünkü asıl araştırmayı yönlendiren, amaç vektörleri arasındaki farklardır. Başlangıç popülasyonu oluşturulurken uygun olmayan bir amaç vektörü kabul edilmeyip reddedilebilir ve tekrar üretilebilir. Yeni bir parametre değeri, katı bir sınırlamayı aşarsa o zaman parametreye müsaade edilen herhangi bir değeri atamak için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunların en basiti, parametreye değer olarak aşmış olduğu sınır değerini atamaktır [34, 35]

Başlangıç popülasyonu

Probleme ait değişken sayısı her bir vektöre ait parametre (D) sayısını belirlemektedir. N_P ise kullanıcı tarafından belirlenen değeri üçten büyük amaç vektör sayısıdır. Çünkü DE’de yeni vektörlerin üretilmesi için mevcut vektör dışında üç adet vektör gerekmektedir. Başlangıçta N_P adet D boyutlu vektörden meydana gelen başlangıç popülasyonu Eş. 4.1’deki gibi üretilir [34-36].

$$\forall_i \leq N_P \wedge \forall_i \leq D : x_{j,i,G=0} = x_j^{(l)} + rand_j [0,1] x_j^{(u)} - x_j^l \quad (4.1)$$

ifadedeki $rand_j$ terimi bir rasgele sayı üreticini temsil etmektedir. Başlangıç popülasyonu oluşturulurken aynı zamanda parametrelerin alabileceği en alt ve en üst değerler belirlenmelidir. Yanlış seçilen sınır değerleri ile en iyi sonucun arama uzayı dışında bırakılması olasılığı mevcuttur. Bu bakımdan alt ve üst sınırların uygun değerlerde seçilmesi başarılı sonuçlara ulaşılma olasılığı arttırılabilir. Bu kriter algoritmanın başarılı sonuç vermesi için önemlidir. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması sırasında çeşitli olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılabilir ve hangi yoğunluk fonksiyonunun kullanılacağı, genel maksimumun yerinin bilinmesi ile doğrudan ilişkilidir. Eğer maksimumun yeri biliniyorsa bir gauss dağılımı çok daha çabuk yakınsama sağlayacaktır fakat eğer maksimumun yeri önceden kestirilemiyorsa parametreleri düzgün dağıtmak sonuca ulaşma olasılığını arttırmaktadır [35, 36].

4.1.3. Mutasyon

Mutasyon popülasyon içerisinden rasgele seçilen bir popülasyon bireyine, yine rasgele seçilen iki vektörün ölçeklendirilmiş farkını ekleyen bir süreçtir. Mutasyona uğramış vektör Eş. 4.2’deki gibi hesaplanır [34]:

$$v_{i,G} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (4.2)$$

Burada, r_1, r_2, r_3 $[1, N_P]$ aralığında değişen birbirinden farklı tamsayılardır. F ise 0'dan büyük $[0, 2]$ aralığında değişen bir ölçek faktörüdür. Bu nedenle her hedef vektör $X_{i,G}$ için yeni bir $v_{i,G+1}$ mutant vektörünün oluşturulması gerekmektedir. Rasgele seçilen iki popülasyon bireyi $X_{r2,G}$ ve $X_{r3,G}$ 'nin farkının yine rasgele seçilen üçüncü bir $X_{r1,G}$ vektörüne F ile ağırlıklandırılarak eklenmesi yoluyla mutant vektör elde edilir. Mutasyona uğramış vektör, yeni bir aday vektörün oluşturulması için kullanılacaktır. Mutasyonun parametrelerden birinin Eş. 4.2'de verilen aralığın dışına çıkması durumunda bu parametre aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir:

$$\begin{aligned} v_{i,G} < v_{i,G}^l \text{ ise } v_{i,G} &= v_{i,G}^l \\ v_{i,G} > v_{i,G}^u \text{ ise } v_{i,G} &= v_{i,G}^u \end{aligned} \quad (4.3)$$

Mutasyon işlemi ağırlıklı farklar esasına dayandığı için baz vektörünün ve farkı oluşturan vektörlerin nasıl seçileceği önemli bir husustur. Bu vektörlerin mutasyon şemasında $r_1=r_2$ gibi tekrarlanması algoritmanın yakınsamasını düşürebilmektedir. Çaprazlama ile beraber mutasyon şeması, algoritmanın çalışma prensibinin temel unsuru olup baz vektörlerinin seçimi ise çaprazlama ile beraber algoritmanın stratejisini belirlemektedir. DE için çeşitli mutasyon şemaları aşağıda verilmiştir [34-36].

Klasik DE

$$v_{i,G} = x_{r1,G} + F.(x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (4.4)$$

Eş. 4.4 klasik DE algoritması için kullanılan mutasyon şemasıdır. Bu şemanın çaprazlama işlemi için genel olarak binom dağılımı kullanılmaktadır.

DE\target-to-best\1\bin

$$v_{i,G} = x_{i,G} + F.(x_{opt,G} - x_{i,G}) + F.(x_{r1,G} - x_{r2,G}) \quad (4.5)$$

Eş. 4.5 birçok araştırmacı tarafından tercih edilmektedir ve “DE\target-tobest\1\bin” notasyonu ile gösterilmektedir. Bu mutasyon şemasında baz vektörü en iyi birey ile hedef vektör (x_{iG}) arasında bir çizgi üzerinde uzanan bir vektördür. Bu mutasyon şeması genel olarak binom dağılımlı çaprazlama işlemi ile kullanılmaktadır.

DE\best\1\bin

$$v_{i,G} = x_{opt,G} + F.(x_{r1,G} - x_{r2,G}) \quad (4.6)$$

Eş. 4.6 şeması “DE\best\1\bin” olarak gösterilmektedir ve binom dağılımlı çaprazlama ile birlikte kullanılmaktadır. Baz vektörü olarak doğru sonuca en yakın olan popülasyonun en iyi bireyini almaktadır. Yakınsaması klasik DE şemasına göre daha hızlıdır fakat parametre sayısının büyük olduğu problemler için sonuç vermemektedir.

DE\best\1\bin, with uniform jitter

$$v_{i,G} = x_{opt,G} + F_j.(x_{r1,G} - x_{r2,G}), F_j = k.ran(0,1) + F, k \in \mathbb{R}^+, k << 1 \quad (4.7)$$

Eş. 4.7’de gösterilen şemanın “DE\best\1\bin” e göre yakınsaması daha hızlıdır ve “DE\best\1\bin, with uniform jitter” olarak gösterilir. Bu işlem “DE\best\1\bin” için yapılan işlem ile aynıdır fakat “DE\best\1\bin”de kullanılan statik mutasyon faktörü yerine dinamik bir mutasyon faktörü kullanılmaktadır. Dinamik bir mutasyon faktörünü üretme işlemi; statik mutasyon faktörü ile birden çok küçük pozitif bir gerçel sayının, $[0,1)$..aralığında rastgele üretilen bir gerçel sayı ile çarpımının toplanması ile gerçekleştirilebilir. “DE\best\1\bin, with uniform jitter” için binom dağılımlı çaprazlama tercih edilmektedir ve “DE\best\1\bin” de olduğu gibi parametre sayısının büyük olduğu problemler için sonuç vermemektedir.

DE\rand\1\bin, with per-vector-dither

Eş. 4.8’deki şema “DE\rand\1\bin, with per-vector-dither” olarak gösterilmektedir.

$$v_{i,G} = x_{r0,G} + F_d \cdot (x_{r1,G} - x_{r2,G}), F_d = F + rand(0,1)(1 - F) \quad (4.8)$$

Burada mutasyon faktörü “DE\best\1\bin, with uniform jitter” de olduğu gibi dinamikdir.

DE\rand\1\bin, with per-generation-dither

$$v_{i,G} = x_{r0,G} + F_{d,g} \cdot (x_{r1,G} - x_{r2,G}), F_{d,g} = F + rand(0,1)(1 - F) \quad (4.9)$$

Eş. 4.9’da ise “DE\rand\1\bin, with per-generation-dither” olarak gösterilmektedir ve “DE\rand\1\bin, with per-vector-dither” den farkı dinamik mutasyon faktörünün her vektör için değil, her nesil için oluşturulmasıdır.

DE\rand\1\bin: either-or-algorithm

$$v_{i,G} = \begin{cases} x_{r0,g} + F(x_{r1,g} - x_{r2,g}), \gamma < P_{mu} \\ x_{r0,g} + K(x_{r1,g} + x_{r2,g} - 2x_{r0,g}), \gamma \geq P_{mu}, K = P_{mu}(F + 1) \end{cases} \quad (4.10)$$

Eş. 4.10 ifadesini mutasyon şeması olarak alan bir DE algoritması “DE\rand\1\bin: either-or-algorithm” olarak gösterilmektedir. Bu ifadede P_{mu} terimi mutasyon olasılığını, γ ise $[0,1)$ aralığında rasgele bir sayıyı göstermektedir. Eğer üretilen sayı mutasyon olasılığından küçükse klasik DE mutasyonu yapılmaktadır. Rasgele üretilen sayı mutasyon olasılığından büyük veya mutasyon olasılığına eşitse klasik DE’de kullanılan mutasyon faktörü yerine $K = P_{mu}(F + 1)$ ile tanımlanan mutasyon faktörü gelmektedir.

4.1.4. Çaprazlama

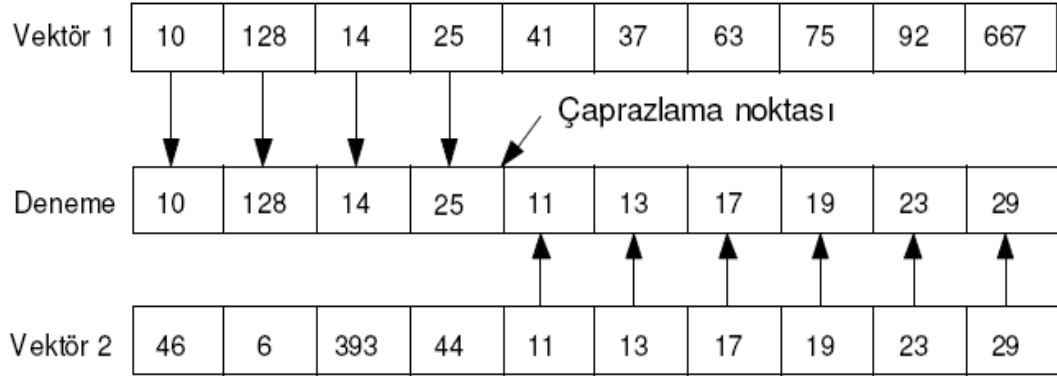
Çaprazlamada, mutasyon sonucu elde edilen mutant vektörü $v_{i,G}$ ve hedef vektör $x_{i,G}$ kullanılarak sonraki nesil için deneme vektörü $u_{i,G+1}$ üretilir. Deneme vektörüne ait her bir parametre Cr olasılıkla mutant vektöründen, $1-Cr$ olasılıkla o anki mevcut vektörden seçilir. 0 ile 1 arasında üretilen rasgele sayı, Cr 'den küçükse gen, mutant vektöründen, aksi durumda da mevcut hedef vektörden seçilir. Burada amaç Cr olasılıkla, genin üretilen yeni mutant vektöründen alınmasıdır. Hiçbir gen mutant vektöründen alınmıyorsa, en az bir genin mutant vektöründen alınması garanti altına alınır. $[1,n]$ aralığında, rasgele bir parametre indisi belirlenir. Rasgele belirlenen bu indis işlem yapılan parametre indisi ile aynı olduğunda, bu gen ya da bu parametre mutant vektöründen alınır. Deneme vektörü $u_{i,G+1}$ Eş. 4.11'deki gibi hesaplanarak bulunur:

$$u_{i,j,G+1} = \begin{cases} v_{i,j,G} & \text{rand}(0,1) \leq Cr \text{ yada } j = j_{\text{rand}} \\ x_{i,j,G} & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4.11)$$

Çaprazlama işlemi çeşitli şekillerde yapılabilmekte olup tek-nokta, N-nokta, üstel ve düzgün dağılımlı (binom) çaprazlama bunlara örnek olarak gösterilebilir [36].

Tek-nokta çaprazlama

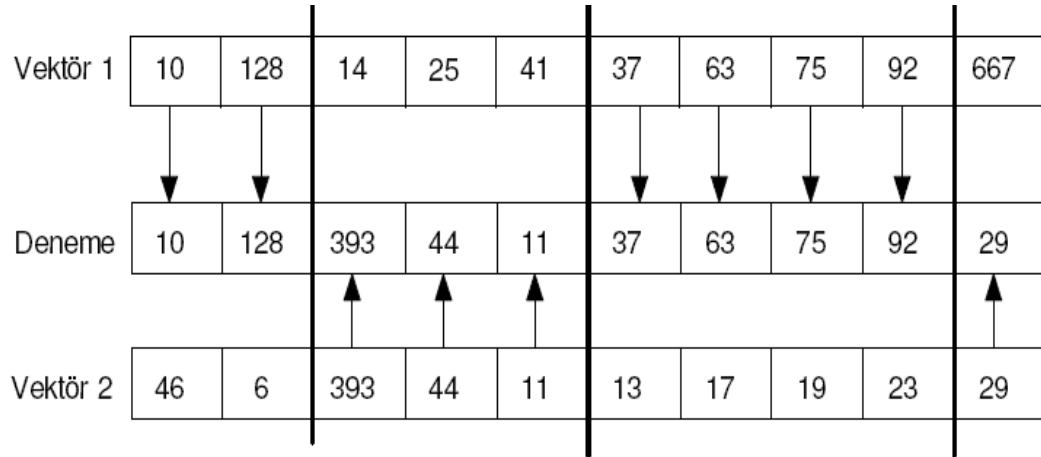
Rasgele seçilen bir çaprazlama noktasının solunda kalan parametreler 1. vektörden, sağında kalan parametreler de 2. vektörden alınmaktadır. Şekil 4.1'de tek-nokta çaprazlama işleminin sonucunda oluşacak deneme vektörü gösterilmiştir. Genetik algoritmaların çoğunluğunda iki deneme vektörü oluşturulmaktadır. Çaprazlama noktasının solundaki parametreleri ilk deneme vektörü 1. vektörden, ikinci deneme vektörü ise 2. vektörden almaktadır ve çaprazlama noktasının sağı için bu durum tam tersidir.



Şekil 4.1. Tek-nokta çaprazlama ile deneme vektörünün oluşturulması

N-nokta çaprazlama

Deneme vektörünü oluşturacak iki vektör rasgele $n+1$ parçaya bölünmektedir. Deneme vektörüne aktarılabilecek her parça sırasıyla farklı bir vektörden gelmektedir. Şekil 4.2’de 3-nokta çaprazlama için deneme vektörünün oluşturulması gösterilmektedir.

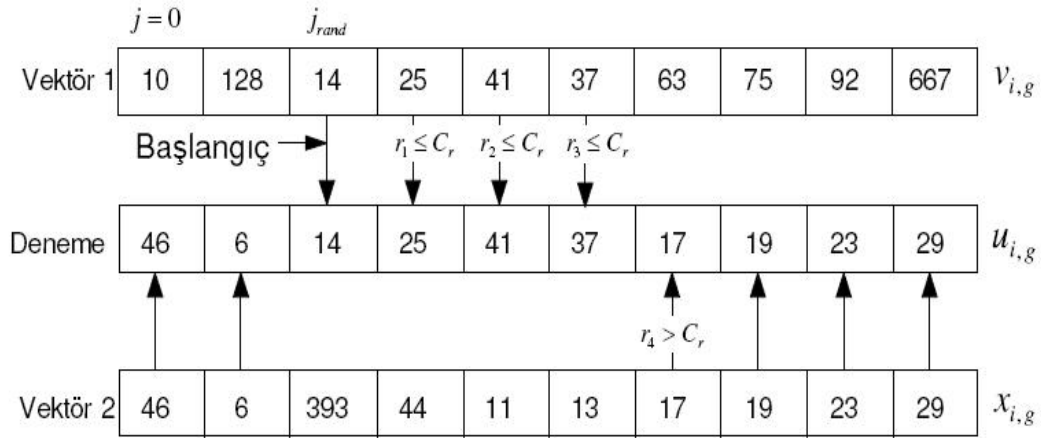


Şekil 4.2. 3-nokta çaprazlama ile deneme vektörünün oluşturulması

Üstel çaprazlama

Bir parametrenin rasgele seçilerek 1. vektörden deneme vektörüne kopyalanması ile başlamaktadır. Bu işlemden sonra önceden belirlenmiş, çaprazlama olasılığı

denilebilecek bir sayı ile 0 ile 1 arasında üretilen rasgele bir sayı karşılaştırılmaktadır. Rasgele üretilen sayı çaprazlama olasılığından küçük olduğu sürece parametreler 1. vektörden gelmektedir. Rasgele üretilen sayı çaprazlama olasılığından büyük olduğu ilk andan itibaren bütün parametreler 2. vektörden kopyalanmaktadır. Şekil 4.3’de DE için üstel çaprazlama işlemiyle deneme vektörünün oluşturulması gösterilmiştir.



Şekil 4.3. DE için üstel çaprazlama ile deneme vektörünün oluşturulması

Düzgün dağılımlı (binom) çaprazlama

DE algoritmasında düzgün dağılımlı çaprazlama işlemi üstel çaprazlamada olduğu gibi öncelikle rasgele bir başlangıç parametresi seçip bu parametreyi 1. vektörden deneme vektörüne kopyalamaktadır. Bu işlemden sonra her parametre için üretilen 0 ile 1 arasında rasgele bir sayı ile çaprazlama başlangıç olasılığı karşılaştırılmaktadır. Eğer üretilen sayı çaprazlama olasılığından küçük veya eşit ise parametre 1. vektörden, büyük ise 2. vektörden alınmaktadır.

4.1.5. Seçim

Genelde popülasyon tabanlı çalışan evrimsel algoritmaların en iyi sonuca yakınsama sağlanabilmesi için her nesilde popülasyonun güncellenmesi gerekmektedir. Çoğu zaman iyyinin hayatta kalması prensibine dayanan bu işlem, yeni üretilen vektörlerin

hangi şartlar altında popülasyona girebileceğini tanımlayan bir kriterdir. Seçim operatörü ile mevcut nesil ve üretilen yeni vektörler değerlendirilerek yeni nesil oluşturulur. Vektörlerin yeni nesilde yer alma olasılıkları uygunluk fonksiyonu değerleri karşılaştırılarak belirlenir. Turnuva seçim işlemi rasgele seçilmiş vektör çiftleri arasında bir dizi yarışma gerçekleştirmek suretiyle yeni nesil üyesini belirlemektedir. Tipik olarak yarışan vektörler ebeveyn-çocuk popülasyonundan seçilir ve en fazla kazanan vektörlerin gelişmesine müsaade edilir. Evrim stratejisi (evolution strategy), alternatif olarak birleştirilmiş ebeveyn-çocuk popülasyonunun en iyi performans gösteren üyelerinin gelişimine müsaade edildiği deterministik bir seçim işlemi kullanmaktadır. Her iki işlemin dezavantajı, her nesil sonunda popülasyonun kalite değerlerine göre sıraya dizilme maliyetidir. DE seçim işleminde, yeni üretilen vektör, ebeveynine göre daha gelişmiş veya en azından aynı gelişme seviyesinde değilse ebeveyn vektör en az bir nesil daha popülasyonda kalmaya devam etmekte ve başka bir vektörle yer değiştirmemektedir. Bir başka seçim metodu ise yaş ve amaç fonksiyonu değeri tabanlı seçim metodudur. Bu metotta μ birey içeren bir popülasyon için γ . deneme vektörü karşılaştırılmaktadır. Bir deneme vektörü ile ona karşılık gelecek bir popülasyon, bireyin amaç fonksiyon değeri iyi olan sonraki popülasyon için seçilmektedir. Klasik DE’de bu işlemi gerçekleştirmektedir. Deneme vektörü oluşturulduktan sonra $u_{i,G}$ ve $x_{i,G}$ vektörleri arasından amaç fonksiyonu değeri daha uygun olan vektör bir sonraki neslin bireyi olmaktadır. Eğer seçimi $u_{i,G}$ kazanmışsa kendisiyle kıyaslanan $x_{i,G}$ vektörünün yerini almaktadır; aksi durumda $x_{i,G}$ vektörü en az bir nesil daha popülasyonun bireyi olarak kalmaktadır. Bu işlem Eş. 4.12’de gösterilmiştir

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G}, & f(u_{i,G}) \leq f(x_{i,G}) \\ x_{i,G}, & f(u_{i,G}) > f(x_{i,G+1}) \end{cases} \quad (4.12)$$

Bir seçim kriteri için yeterli bir zamanda genel en iyiye ulaşabiliyor denilebiliyorsa bu seçim kriteri için “elitisttir” denilmektedir. Bu bakımdan yaş amaç fonksiyonu değeri seçimi için elitisttir denilebilir. Çünkü her ne kadar kazanmış bir vektörün kaybetmiş başka bir vektörden daha kötü olma ihtimali olsa da popülasyon yerel en

iyiyi bünyesinde bulundurmaktadır. Bu seçime birebir seçim de denilmektedir [34, 35].

4.2. Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması (Particle Swarm Optimization)

Doğadaki kusursuz olarak işleyen düzen, tarih boyunca insanlara esin kaynağı olmuştur. Gündelik hayatımızı kolaylaştıran bir çok buluş doğadaki sistemlerden ve varlıkların birbirleri ile olan etkileşimlerinden esinlenilerek icat edilmiştir. Varlıkların birbiri ile olan bu etkileşimi belirli problemler karşısında en iyi çözümü bulabilmelerine yardımcı olmaktadır. Bir etkileşim sonrası her bir parçacık kendi doğrusunu güncellerken aynı zamanda bütün toplumun mutlak doğruya ulaşmasına yardımcı olmaktadır. Parçacıkların kendi doğrularından yola çıkarak ve çevrelerindeki parçacıklarla etkileşerek ürettikleri toplumsal mutlak doğruya ulaşma süreci, topluma adaptasyon süreci olarak nitelendirilebilir. Kennedy ve Eberhart adaptasyonu üç ana kısımda incelemişlerdir. Bunlardan birincisi, insanlar komşularıyla etkileştiklerinin farkındadırlar ve onlardan bir şeyler kaparken onlara bir şeyler aktarırlar. İkincil olarak sosyal öğrenme ile bilginin yayılımı, grup seviyesinde gelişmekte olan bir süreçtir. Üçüncül olarak etkileşimler, yerel olmasına rağmen, etkileri kültür sayesinde uzak parçacıklara taşınır. Bunun da ötesinde, farklı etkileşimlerin birleşimi sonucu daha güçlü yöntemler doğabilir. Bu çalışmalar sayesinde günümüzde sosyal sistemlerden esinlenilerek ortaya çıkarılmış birçok yöntem çok parametrelili ve çok değişkenli optimizasyon problemlerine çözüm bulmak için kullanılmaktadır. Kennedy ve Eberhart, kuş sürülerinin davranışlarını inceleyerek son yıllarda ortaya atılan sürü zekasına dayalı algoritmalarından biri olan Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması (Particle Swarm Optimization, PSO) tekniğini geliştirmişlerdir [37]. Kuş ve balık sürülerinin yerini bilmedikleri bir yiyeceği aramaları ya da belli bir yere giderken birbirleriyle iletişim kurarak o yere ulaşmalarından esinlenilen PSO, kuş ve balık sürülerinin iki boyutlu davranışlarının bir benzetimidir. PSO'da arama işlemi genetik algoritmalarda olduğu gibi popülasyondaki parçacıklar tarafından belirlenen nesil sayısınca yapılır. Her bireye parçacık ve parçacıklardan oluşan popülasyona da sürü (swarm) adı verilir.

4.2.1. Parçacık sürüşü optimizasyon algoritması terimleri

PSO'da kullanılan terimler aşağıdaki gibi açıklanmaktadır:

Pozisyon vektörü: Pozisyon vektörü $x_{i,j}^k$ ile gösterilir. Burada yer alan $x_{i,j}^k$ k. iterasyonda i. parçacığının j boyutlu pozisyon vektöründeki birinci elemanını gösterir.

Hız vektörü: Hız vektörü, parçacığın bir sonraki pozisyonunu başka bir ifadeyle yeni çözümü bulmada etkili olan en önemli faktördür. Hız vektörü $v_{i,j}^k$ ile gösterilir. Burada yer alan $v_{i,j}^k$ k. iterasyonda i. parçacığın j boyutlu hız vektöründeki birinci elemanını göstermektedir.

Yerel en iyi değer: Bir parçacığın o ana kadar elde edilmiş en iyi amaç fonksiyon değerine sahip pozisyonudur yani çözümdür. Sürüde bulunan parçacık sayısı kadar her iterasyonda yerel en iyi bulunur. Amaç fonksiyonu yerine uygunluk fonksiyonları da kullanılabilir.

Yerel en iyi komşular: Her iterasyonda parçacık sayısı kadar elemandan oluşan bir vektördür. Bu vektör, yerel en iyi değerlere sahip pozisyon vektörü olarak tanımlanır. Bir sürüdeki i. parçacığın yerel en iyi komşuları; şeklinde ifade edilir. Buradaki p_{i1} yerel en iyi vektörün 1. değerini göstermektedir.

Global en iyi değer: Elde edilen en iyi amaç fonksiyonu yada uygunluk fonksiyonu değeri ve bu değere sahip parçacığın çözümdür.

Global en iyi komşular: Her iterasyonda bulunan global en iyi değerlere sahip pozisyon değerleridir. Bir çözüm uzayında en fazla iterasyon sayısı kadar global en iyi hesaplanır. Buradaki g_1 global en iyi vektörün 1. değerini göstermektedir.

Parçacığın tecrübesi (c_1): Sosyal parametre olarak da adlandırılır. Parçacığın önceki iterasyonlarda elde ettiği en iyi sonuçların, bir sonraki iterasyona etkisidir.

Sürünün tecrübesi (c_2): Kavramsal parametre olarak da adlandırılır. Sürüde önceki iterasyonlarda en iyi sonuca sahip parçacığın sonuçlarının bir sonraki iterasyona etkisidir.

Atalet ağırlığı: Bir önceki hız vektörünün mevcut hız vektörü üzerindeki etkisini kontrol eden parametreye atalet ağırlığı denir ve w şeklinde gösterilir. Atalet ağırlığının parçacıkta global ve yerel araştırma kabiliyeti arasında değişim etkisi vardır. Eğer atalet ağırlığı yüksek bir değer alınırsa parçacık global bir şekilde arama gerçekleştirir, bu değer küçük alınması ise yerel bir arama gerçekleştirir. Hızın optimal çözümün bulunmasında, parçacıkların optimalin bulunduğu pozisyonu aşmalarını yada optimele yaklaşımda geç kalmayı önlemek amacıyla bazı problemlerde önemli bir rolü olabilmektedir [37-38].

4.2.2. Parçacık sürüsü optimizasyon algoritmasının işleyişi

PSO algoritması, tüm parçacıkların arama uzayına rasgele olarak yerleştirilmesiyle başlar ve her adımda parçacıkların pozisyonları güncellenir. Her bir parçacık kendi pozisyonunu, bir önceki tecrübesinden yararlanarak bir önceki sürüdeki en iyi pozisyona doğru ayarlar. Belirli bir hız ile hareket eden bu parçacıklar en iyi sonucu bulmak için arama işlemini sürdürürler [38].

Kuşların uzayda, yerini bilmedikleri yiyeceği aramaları, bir problem için en uygun çözümü aramaya benzetilmiştir. Kuşlar yiyecek ararken aralarında iletişim kurarak yiyeceğe en yakın olan kuşu takip ederler. Her tekil çözüm, arama uzayındaki bir kuştur. Parçacığın uygunluk fonksiyonu değeri, parçacığın her birim hareketinin sonunda bulunduğu koordinatlarını bir uygunluk fonksiyonuna göndermesi ile belirlenir. Bir parçacık, pozisyonunu (koordinatlarını), hızını (çözüm uzayındaki her boyutta ne kadar hızla ilerlediği), şimdiye kadar elde ettiği en iyi uygunluk değerini ve bu değeri elde ettiği pozisyonu hafızasında tutar.

PSO’da bulunan parçacıkların, her birinin ayrı bir hızı vardır. Her nesilde parçacıklar kendi hızlarını, en iyi parçacığa göre yenilerler. Böylece yeni nesil, bir öncekine göre daha iyi duruma gelir. Tüm parçacıklar en iyi parçacığa yaklaşırken, kullanılan rasgele operatörler sayesinde, bir sonraki nesilde, bir önceki neslin en iyisini seçebilirler. İşte nesiller arasındaki bu hızlı iyileşme PSO’nun sonuca hızla yaklaşmasını sağlamaktadır [38, 39].

Sürüdeki her bir parçacık çok boyutlu arama uzayında bir çözümü yani pozisyonu temsil eder. Parçacıklar, ilk pozisyonlarını rasgele belirler, daha sonra arama uzayı içinde adım adım hareket eder ve verilen amaç fonksiyonu için çözümleri arar. PSO, parçacıklar arasındaki bilgi paylaşımını esas almaktadır. Her bir parçacık optimuma ulaşmak isterken yeni pozisyonunu, kendi önceki tecrübelerinden ve bir önceki sürüdeki (ya da iterasyondaki) en iyi pozisyonu dikkate alarak bulur. Global komşular, her bir iterasyonda (optimum noktaya doğru yapılan her bir hareket) sürü içerisindeki en iyi uygunluk fonksiyonu değerini veren parçacığın değerleridir. Her bir iterasyonda bir global komşu değeri vardır. Yerel komşular ise ilk iterasyonda her bir parçacığın aynı zamanda pozisyon değerleridir ve her iterasyonda parçacık sayısı kadar yerel en iyi ortaya çıkar. Her bir parçacık, global ve yerel komşu değerlerini kullanarak bir önceki iterasyonda en iyi değere sahip parçacığın pozisyonuna doğru hareket eder. Arama işleminin tamamlanması veya durdurma kriteri genellikle parçacıklardan en az birinin en iyiye ulaşması yada iterasyon sayısıdır. PSO’da parçacıklardan en az birinin en iyiye ulaşması beklenir. Başka bir deyişle, en iyi sonuca her parçacığın ulaşması beklenmez, önemli olan sürü içerisinde bir parçacığın en iyiye ulaşmasıdır. Kısacası, önemli olan sürünün başarısıdır [37-39].

Algoritmanın adımları şu şekildedir;

1. Popülasyonun oluşturulması; parçacıklar, rastgele üretilen başlangıç pozisyonları ve hızları ile birlikte oluşturulur. J adet parametreden oluşan n adet parçacık için popülasyon parçacık matrisi Eş. 4.13’de ifade edilmiştir.

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & \dots & x_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & \dots & x_{nj} \end{bmatrix}_{n \times j} \quad (4.13)$$

Parçacık sürü matrisindeki i 'ninci parçacık Eş. 4.14'deki gibi ifade edilir.

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}] \quad (4.14)$$

2. Uygunluk değerlerinin hesaplanması; popülasyon içindeki tüm parçacıkların uygunluk değerleri hesaplanır.

3. En iyi üyenin bulunması; her nesilde bütün parçacıklar bir önceki nesilde de bulunan en iyi ile karşılaştırılır. Eğer daha iyi birey varsa yer değiştirilir. Önceki en iyi uygunluk değerini veren i . parçacığın pozisyonu

$$pbest_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ij}] \quad (4.15)$$

şeklinde ifade edilir.

4. Global en iyinin bulunması; nesildeki en iyi değer, global en iyi değerden daha iyi ise yer değiştirilir. En iyi global her iterasyonda tüm parçacıklar için tektir ve Eş. 4.16 ile gösterilir:

$$gbest_i = [g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{ij}] \quad (4.16)$$

5. i . parçacığın hızı

$$v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ij}] \quad (4.17)$$

olarak ifade edilir. İki en iyi değerin bulunmasından sonra parçacık hızları ve konumları aşağıda verilen nolu Eş. 4.18 ve Eş. 4.19'a göre güncellenir. Pozisyon ve hızların yenilenmesi;

$$v_{ij} = W.v_{ij} + c_1.r_1.(p_{ij} - x_{ij}) + c_2.r_2.(p_{gj} - x_{ij}) \quad (4.18)$$

$$x_{ij} = x_{ij} + v_{ijD} \quad (4.19)$$

6.Durdurma kriteri sağlanıncaya kadar adımları tekrar et. Durdurma kriteri sağlanıncaya kadar adım 2-5 tekrar edilir. Literatürde bulunan on üç çeşit sonlandırma kriteri aşağıda isimleri verilen altı sınıfta toplanabilir [39, 40]:

- Referans kriteri: Sürünün belirli bir yüzdesi bir optimuma yakınsamışsa sonlandırılır.
- Tükenme tabanlı kriter: Belirli nesil sayısı, amaç fonksiyon değerlendirme sayısı yada merkezi işlem birimi zamanı sonlandırma için kriter sayılır.
- İyileşme tabanlı kriter: Eğer küçük ilerlemeler elde ediliyorsa algoritma sonlandırılabilir.
- Hareket tabanlı kriter: Parçacıkların hareketine bağlı sonlandırma kriteridir ve iki versiyonu bulunmaktadır.
- Dağılım tabanlı kriter: Parçacıklar birbirine çok yakınsa yakınsamaya ulaşılmıştır. Bu kriterin de, ilk üçü parametre uzayında sonuncusu da amaç uzayında uygulanan dört versiyonu bulunmaktadır.
- Birleşik kriter.

4.3. Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony, ABC) Algoritması

Günümüzde problemlerin çözümünde kullanılan, biyolojik ve sosyal sistemlerden esinlenilerek ortaya konulmuş birçok yöntem vardır. Biyolojik sistemlerin başka bir çeşidi olan sosyal sistemler, özellikle bireyin çevresiyle ve diğer bireylerle olan etkileşimini ve kolektif davranışlarını incelemektedir. Bu davranışlar “sürü zekası” olarak adlandırılmaktadırlar. Ayrıca sürü zekası, kendi kendini idare edebilen

yapıdaki basit bireyler grubunun ortaklaşarak bir zeka geliştirmesi olarak da tanımlanabilir. Doğadan esinlenen algoritmaların yeni bir dalı olan sürü zekâsı yaklaşımı, böceklerin içgüdüsel problem çözme becerilerini kullanan etkili meta-sezgisel yöntemler geliştirebilmek için böcek davranışlarının modellenmesine odaklanmıştır.

Sürü zekası, bağımsız yapıdaki basit bireyler topluluğunun müşterek bir zeka geliştirmesidir. Bu ise ortamdaki etmenlerin, ortama müdahale ederek iletişim kurmaları ve birbirlerinin hareketlerini düzenlemeleri ile kendinden organizasyon (“Self-Organization”) denen iki mekanizma üzerine kuruludur. Ortamdaki etmenlerin 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 [41,42].

Sürü zekası için önemli bir kriter olan kendinden organizasyonun temel özellikleri pozitif geri besleme, negatif geri besleme, salınımlar ve çoklu etkileşimdir [41-43]. Aşağıda bu temel özelliklerin ne anlama geldiği açıklanmıştır:

Pozitif geri besleme: Pozitif geri besleme daha uygun yapıların bulunmasına sağlayan davranışlardır. Arıların dans etmeleri yoluyla bireylerin bir işe yönlendirilmeleri pozitif geri beslemeye örnek olarak verilebilir.

Negatif geri besleme: Belli bir iş konusunda, yiyecek tüketiminde yada yarışma durumlarında doyuma gitmeyi önlemek için negatif geri besleme mekanizmasına ihtiyaç duyulur.

Dalgalanmalar: Yeni yiyecek kaynak keşiflerinin yapılabilmesi için rasgele dolaşımlar gibi düşünülebilir. Rasgele keşifler veya hatalar, sürüde bulunan bireylerin yeni çözümlerin üretmesini sağladığından, yeniden oluşum ve yapılanma açısından önem taşımaktadır.

Çoklu Etkileşimler: Sürüde bulunan bir bireyin diğer bireye ait bilgiyi kullanabilmesi ve böylece sürü içinde bilgi dağılımını sağlaması ile ifade edilmektedir.

Doğada arılar, yiyecek kaynaklarından nektar toplama, buldukları yiyecek kaynakları ile ilgili bilgileri kanat çırpma şeklinde gerçekleştirdikleri danslar ile kolonideki diğer arılara bildirme ve araştırmaya çıkacak arıların da rasgele araştırma yerine diğer arıların sahip oldukları bu kaynak bilgisinden faydalanarak daha bol yiyecek kaynağına daha kısa sürede ve az enerji harcayarak ulaşma işlemlerini tabii olarak gerçekleştirmektedirler. Arıların nektar, polen veya bal elde etmek için gittikleri kaynaklara yiyecek kaynakları denmektedir. Bir yiyecek kaynağının değeri bir çok faktöre bağlı olmasına rağmen sadece kaynağın zenginliği basitlik açısından tek bir kriter olarak alınabilir.

Bu çalışmada temel alınan Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony, ABC) Algoritması ilk olarak 2005 yılında Karaboğa tarafından önerilmiş olup, bal arılarının yiyecek arama davranışını taklit eden popülasyon tabanlı sezgisel bir optimizasyon tekniğidir [44].

4.3.1. Bal arısı kolonisi'nin davranışları

Bal arıları topluluk yaşamı sürdüren sosyal böcekler olarak, herhangi bir yuvada koloni oluştururlar. Bal arısı kolonisi, bir kraliçe (Ana arı), birkaç yüz erkek arı ve 10-80 bin işçi arıdan oluşur. Görünüş olarak birbirinden farklı olan bu üç arıdan kraliçe arı ve işçi arılar dişidir. Koloni popülasyonunun en büyük bölümünü işçi arılar oluştururlar. Morfolojik olarak nektar taşımalarını sağlamak için geniş bir mideleri, polen taşıyabilmek için polen sepetçikleri vardır. Bir arı kolonisi tabiatla her yönde uzak mesafelere (10 km üzeri) yayılarak verimli nektar ve polen kaynaklarını kullanabilme yeteneğine sahiptir [45]. Bir koloninin başarısı iyi kaynakları eş zamanlı olarak kullanabilme becerisiyle ilişkilidir. Bu paralel araştırma ve kaynak kullanma sürecinde, iyi nektar veya polen kalitesine sahip alanlar daha az enerji harcayarak daha fazla arı tarafından ziyaret edilirken, nispeten düşük kalitedeki kaynaklar daha az sayıda arı tarafından ziyaret edilmektedir.

4.3.2. Bal arısı kolonisi modeli

Bu modelde bal arılarının kendinden organizasyon özellikleri şu şekilde ifade edilebilir [43]:

- Pozitif geri besleme: Yiyecek kaynaklarındaki nektar miktarı gözücü arıların onları ziyaret sayısı ile gelişir.
- Negatif geri besleme: Bir yiyecek kaynağının araştırma süreci terk edildiğinde arıların o kaynağa gitmesi durdurulur.
- Dalgalanmalar: Yeni yiyecek kaynaklarının keşfi için rast gele bir arama sürecinin kaif arılar vasıtasıyla yapılması.
- Çoklu etkileşim: Arılar, dans alanında ki yiyecek kaynağı pozisyonları hakkındaki bilgilerini paylaşırlar.

Tereshko reaksiyon-difüzyon tabanlı bal arı kolonisi yiyecek arama davranışlarını modellemiş ve bu davranışlar içinde arı kovanında nasıl bir haberleşme belirledikleri üzerine çalışmıştır. Bu model koloninin yiyecek arama davranışındaki yiyecek temini ve tespit edilen yiyecek kaynaklarının terke edilmesi olmak üzere iki baskın bileşen üzerine kurulmuştur. Bu davranışın temeli görevi belli olan arıların görevi belirsiz olan arılara yiyecek kaynaklarının yerini paylaşmasıdır. Bu paylaşımlar ve haberleşmeler arıların yaptıkları çeşitli danslar ile olmaktadır [46]. Burada :

Yiyecek kaynakları: Arıların nektar, polen veya bal elde etmek için gittikleri kaynaklardır.

Görevi belirli işçi arılar: Daha önceden belli kaynaklara ait nektarın kovana getirilmesinden sorumlu olan işçi arılar aynı zamanda ziyaret ettiği kaynağın kalitesi ve konumu ile ilgili bilgiyi kovanda bekleyen diğer arılarla paylaşırlar.

Görevi belirsiz işçi arılar: Bu arılar yiyecek kaynaklarından nektar toplama arayışında olan arılardır. İçsel bir dürtüye veya bir dış etmene bağlı olarak rasgele kaynak arayışında olan kaşif arılar ve kovanda bekleyerek görevi belirli işçi arılar

tarafından paylaşılan bilgiyi kullanarak yeni bir kaynağa yönelen gözcü arılar olmak üzere iki çeşit görevi belirsiz işçi arı vardır. Kaşif arılar toplam koloni sayısının ortalama %5-10'u kadardır.

ABC Algoritmasının, problem çözümünde kullanılması için öncelikli olarak problemin iyi analiz edilmesi ve algoritmanın temel işleyişine uygun modellemenin yapılması gerekir. Yapay arı kolonisi algoritmasında, bir koloni de üç grup arı bulunmaktadır. Bunlar; işçi, gözcü ve kaşif arılardır. Koloninin yarısı işçi yarısı da gözcü arı olmak üzere modelde görevli arı sayısı kadar yiyecek kaynağı bulunmaktadır. Yiyecek kaynağına ait nektar miktarı o yiyecek kaynağının temsil ettiği çözümün kalite (fitness) değerini belirlemektedir. Dolayısıyla ABC algoritması en fazla nektara sahip kaynağın yerini bulmaya çalışarak uzaydaki çözümlerden problem için en uygununu bulmaya çalışmaktadır.

4.3.3. Yapay arı kolonisi algoritmasının işleyişi

ABC algoritmasında başlangıçta ayarlanması gereken bazı parametreler vardır. Bunlar yiyecek kaynağı sayısı, tekrarlama sayısı, sınır değeri, alt ve üst sınır değerleri ve amaç fonksiyonudur.

Başlangıç popülasyonu

Verilen problem için uygun üst ve alt sınırlar belirlenerek, bu sınırlar içerisinde başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulur. Oluşturulan popülasyonun ilk yarısı modelde kullanılmak üzere alınır. Amaç fonksiyonu kullanılarak popülasyon için hesaplanan uygunluk değerlerinden en iyi değerler elde edilir.

İşçi Arıların algoritmaya etkisi

Bu aşamada komşuluk ilişkilerinden faydalanılarak yeni bir popülasyon oluşturulur. Bir önceki popülasyon ve uygunluk değerleri hafızada tutulur. Oluşturulan yeni popülasyonun modelde verilen alt ve üst sınırların dışına taşmaması için bir kontrol

yapılır. Eğer herhangi bir taşma var ise alt sınırın altındaki değerler alt sınır değerine üst sınırın üstündeki değerler ise üst sınır değerine eşitlenir. Yine başlangıç aşamasında olduğu gibi amaç fonksiyonu kullanılarak popülasyon için hesaplanan uygunluk değerlerinden en iyi değerler elde edilir. Burada Greedy seçimi yapılarak değerler elde edilir.

Gözcü arıların algoritmaya etkisi

Greedy seçimi kullanılarak elde edilen uygunluk değeri rastsal bir değer ile karşılaştırılır. Uygunluk değeri rastsal değerden büyük ise yine komşuluk ilişkilerinden faydalanılarak yeni bir popülasyon oluşturulur. Her aşamada olduğu gibi bu aşamada da amaç fonksiyonu kullanılarak greedy seçimi yardımı ile uygunluk değerleri hesaplanır.

En iyi değerın bulunması

Modelde bir çevrim içerisindeki en iyi değer ve her bir popülasyon için en iyi değerler hafızada tutulur. Burada daha önce bulduğumuz en küçük global değer çevrim içi değerden büyük ise artık bu yeni değer en küçük global değer yerine geçer.

Kaşif arıların algoritmaya etkisi

Kaşif arıların arama yapmaya başlamaları için modelde belirtilen sınır değerini aşp aşmadığı kontrol edilir. Eğer belirtilen sınır değeri aşılmış ise yeni bir popülasyon oluşturulur. Daha önceki aşamalarda olduğu gibi uygunluk değeri hesaplanarak bir döngü için aramalar tamamlanmış olur.

5. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Benzetim çalışmaları için esas alınan doğrusallaştırılmış güç sistem modelindeki K1 - K6 sabitlerinin hesaplanması Bölüm 3.3.2'deki eşitliklerde (Bkz. Eş. 3.77-3.88) verilmiştir. Bu çalışmada güç sistemi dengeleyici parametrelerinin optimizasyon için kullanılacak geleneksel güç sistemi dengeleyicisi parametre (K_{PSS} , T_w , T_1 ve T_2) aralıkları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Güç sistem dengeleyicisi parametre aralıkları

GSD Parametreleri	K_{PSS}	T_w	T_1	T_2
Alt Değer	1	1	0.2	0.02
Üst Değer	50	50	1.5	0.15

5.1. Geleneksel Güç Sistemi Dengeleyicisi

Geleneksel güç sistem dengeleyicisinin (conventional power system stabilizer, CPSS) parametrelerini seçebilmek için aşağıdaki eşitliklerden yararlanılmıştır.

Adım 1

Karakteristik eşitlikte bütün sönümlmeleri $\zeta_n = 0$ ihmal edersek

$$Ms^2 + \omega_b K1 = 0 \quad (5.1)$$

Eş. 5.1'in çözümü

$$s = \pm \omega_n \quad (5.2)$$

İle doğal frekans elde edilir. Eş. 5.2'de

$$\omega_n = \sqrt{\frac{w_b K_1}{M}} \quad (5.3)$$

olarak ifade edilir.

Adım 2

Güç sistem dengeleyicisi işareti ile E_q' arasındaki faz gecikmesi Eş. 5.4 ile hesaplanır:

$$G_E = \frac{K_A K_3}{(1 + sT_A)(1 + sT_{d0}'K_3) + K_A K_3 K_6} \quad (5.4)$$

Adım 3

$\Delta\omega$ kontrol sinyali olarak kullanılır ise Eş. 5.5'in fazı ile Eş. 5.4'deki G_E 'nin faz açısı toplamı sıfırı vermelidir ($\angle G_C + \angle G_E = 0$).

$$G_C = \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^p \quad (5.5)$$

Adım 4

Güç sistemi dengeleyicisi kazancını hesaplayabilmek için Eş. 5.6 kullanılır:

$$K_{PSS} = \frac{2\zeta_n \omega_n M}{K_2 |G_C(j\omega_n)| |G_E(j\omega_n)|} \quad (5.6)$$

5.2. Sezgisel Yöntemler İle GSD Parametre Ayarı

Yapay zekanın bir alt sınıfı olan sezgisel yöntemlere dayalı optimizasyon algoritmaları ile güç sisteminin rotor açısal kararlılığı içerisinde sürekli hal analiz cevapları MATLAB simülasyon çalışmaları ile incelenmiştir. Güç sisteminde oluşan

küçük bozucu etkilerinin sönümlemesi amacı ile sisteme eklenen GSD'lerin parametreleri (K_{PSS} , T_w , T_1 ve T_2) DE, PSO ve önerilen ABC tabanlı algoritmalar ile ayarlanmıştır.

Bu algoritmalar genel olarak amaç fonksiyonu belirli bir değere ulaştığında veya maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında sonlanırlar. Amaç fonksiyonları, çok farklı biçimlerde tanımlanabilir ve sezgisel algoritmaların kilit noktalarından biridir. Yanlış bir amaç fonksiyonu ile çözümü çok kolay olan problemler için bile algoritma yakınsama sağlamayabilir.

DE, PSO ve tez çalışması için önerilen ABC algoritmalarının ortak kullandığı amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } (J_1 + J_2 + J_3) \\
 & \text{Subject to} \\
 & K_{PSS}^{\min} \leq K_{PSS} \leq K_{PSS}^{\max} \\
 & T_w^{\min} \leq T_w \leq T_w^{\max} \\
 & T_1^{\min} \leq T_1 \leq T_1^{\max} \\
 & T_2^{\min} \leq T_2 \leq T_2^{\max}
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Eş.5.7'de $J = J_1 + J_2 + J_3$ değerleri güç sistemine uygulanan bozucuların (V_{ref} , T_{mech} ve V_{ref} ile T_{mech}) etkilerinin ayrı ayrı algortmada etkili olabilmesi için eklenmiştir. Burada Eş. 5.7 ile verilen ifadeyi güç sistemi dengeleyicisi parametre ayarları için özelleştirirsek parametrelerin optimizasyonu için Eş. 5.8'i elde etmiş oluruz [47-49]:

$$\text{Minimize } J = \int_0^{t_{sim}} \Delta \omega(t) dt \tag{5.8}$$

K_{PSS}, T_w, T_1, T_2

Burada $\Delta \omega$ rotor hız değişimini ifade ederken t_{sim} ise benzetim çalışmalarında kullanılan zamanı ifade eder. Her üç algoritma için kullanılan değişkenler Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Algoritmelerde (ABC, PSO ve DE) kullanılan değişkenler

	ABC	PSO	DE
Parametre Sayısı	4	4	4
Popülasyon Büyüklüğü	40	40	40
İterasyon Sayısı	100	100	100
Hedef Hata	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}
Alt Değer	1 / 1 / 0.2 / 0.02	1 / 1 / 0.2 / 0.02	1 / 1 / 0.2 / 0.02
Üst Değer	50 / 50 / 1.5 / 0.15	50 / 50 / 1.5 / 0.15	50 / 50 / 1.5 / 0.15
Limit Değeri	10	---	---
Ölçeklendirme Faktörü	---	---	$F \in [0,2]$
Çaprazlama Oranı	---	---	$Cr \in [0,2]$
Öğrenme Faktörü	---	$c1=c2=2$	---
Eylemsizlik Ağırlığı	---	$w \in [0.8, 1.2]$	---

Bu çalışmada güç sisteminin geniş alan çalışma durumları için $0.1 < P < 1.2$ ve $0.1 < Q < 1.0$ olarak seçilmiştir. Ayrıca küçük bozucu girişler olarak referans gerilim değişimi ve mekanik güç değişimi ilave edilmiştir. Bu değişimlerde sırası ile birinci durumda V_{ref} , ikinci durumda T_{mech} ve üçüncü durumda hem V_{ref} hem de T_{mech} bozucu girişi uygulanmıştır.

5.3. GSD Parametre Ayarı Benzetim Çalışmaları

Bütün çalışmalar için Çizelge 5.3'deki yük durumları dikkate alınmıştır. Fakat birkaç durumda rasgele yük durumları için de benzetim çalışmaları yapılmıştır. Durum 1-22'ye kadar olan çalışmalar geleneksel GSD (CPSS), DE tabanlı GSD (DEPSS), PSO tabanlı GSD (PSOPSS) ve önerilen ABC tabanlı PSS (ABCPSS)'yi kapsamaktadır. Durum 23-26 arası yapılan çalışmalar ABCPSS ve PSO-ABCPSS ile yapılan çalışmaları kapsamaktadır. Algoritmalar da kullanılan güç sistem parametreleri ve daha önceki bölümlerde K1-K6 sabitlerinin hesaplanması ile ilgili eşitliklerin elde edilmesi EK-1'de elde edilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan optimizasyon algoritmalarının yazılım kodları MATLAB ile yazılmıştır. Bu algoritmalara ait yazılım kodları sırası ile DE algoritması EK-2, PSO algoritması EK-3 ve önerilen ABC algoritması EK-4'de verilmiştir.

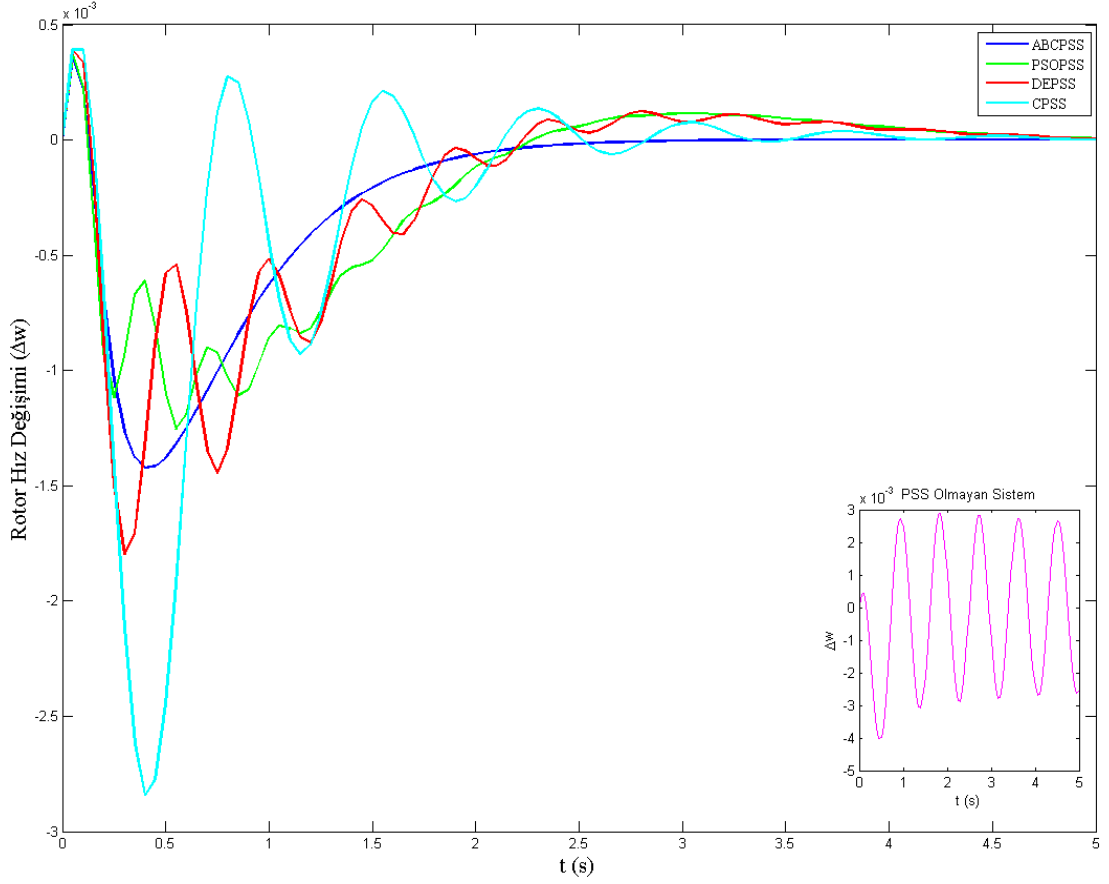
Çizelge 5.3 Benzetim Çalışmalarında Kullanılan Yük Durumları

Yük	P	Q
Normal	1.0	0.01
Hafif	0.7	0.2
Ağır	1.2	0.3

Durum 1, Durum 2 ve Durum 3

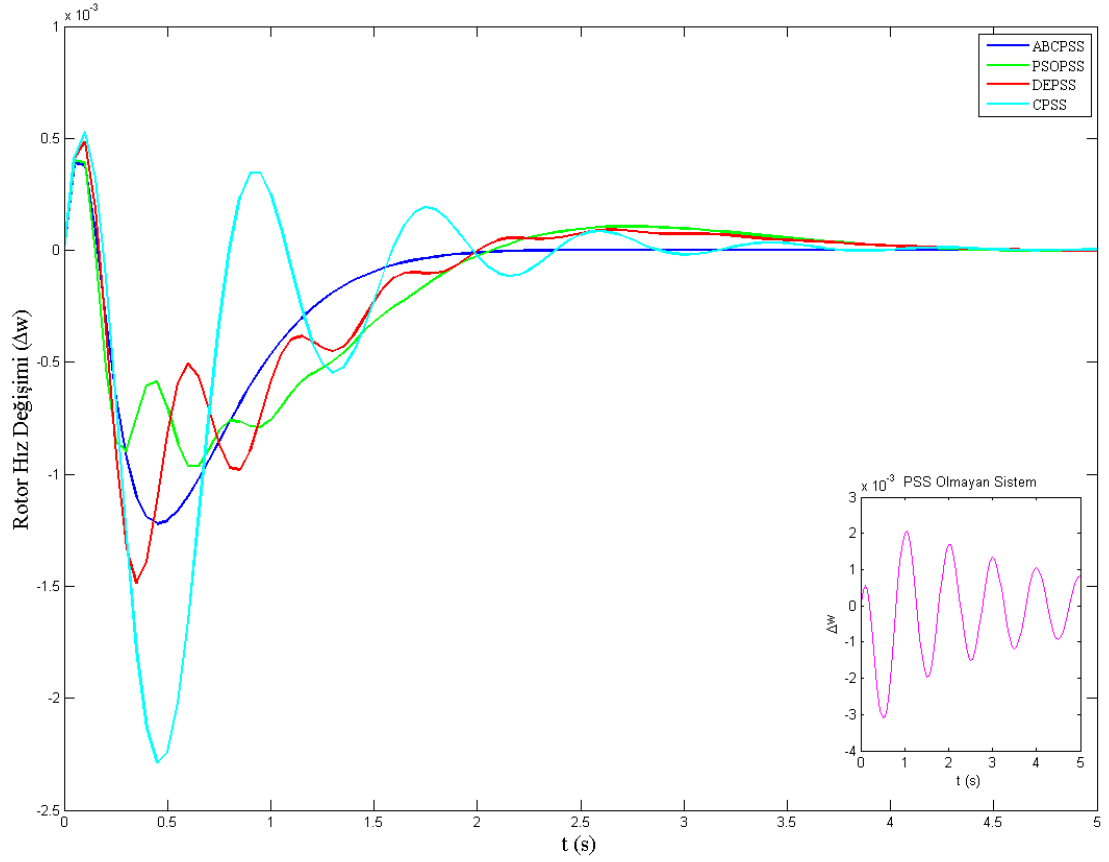
Bütün durumlarda hem V_{ref} hem de T_{mech} bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Durum 1 normal yük durumunu, Durum 2 hafif yük durumunu ve Durum 3 ağır yük durumunu ifade etmektedir. Kullanılan uyartım sistemi bloğu $\frac{K_A}{1+sT_A}$ ile ifade edilir.

Her üç durum içinde geleneksel GSD (CPSS), DE tabanlı GSD (DEPSS), PSO tabanlı GSD (PSOPSS) ve önerilen ABC tabanlı PSS (ABCPSS)'in zamana bağlı $\Delta\omega$ değişimleri şekillerde gösterilmiştir. Ayrıca GSD'siz sistem cevabı da şekillere eklenmiştir.



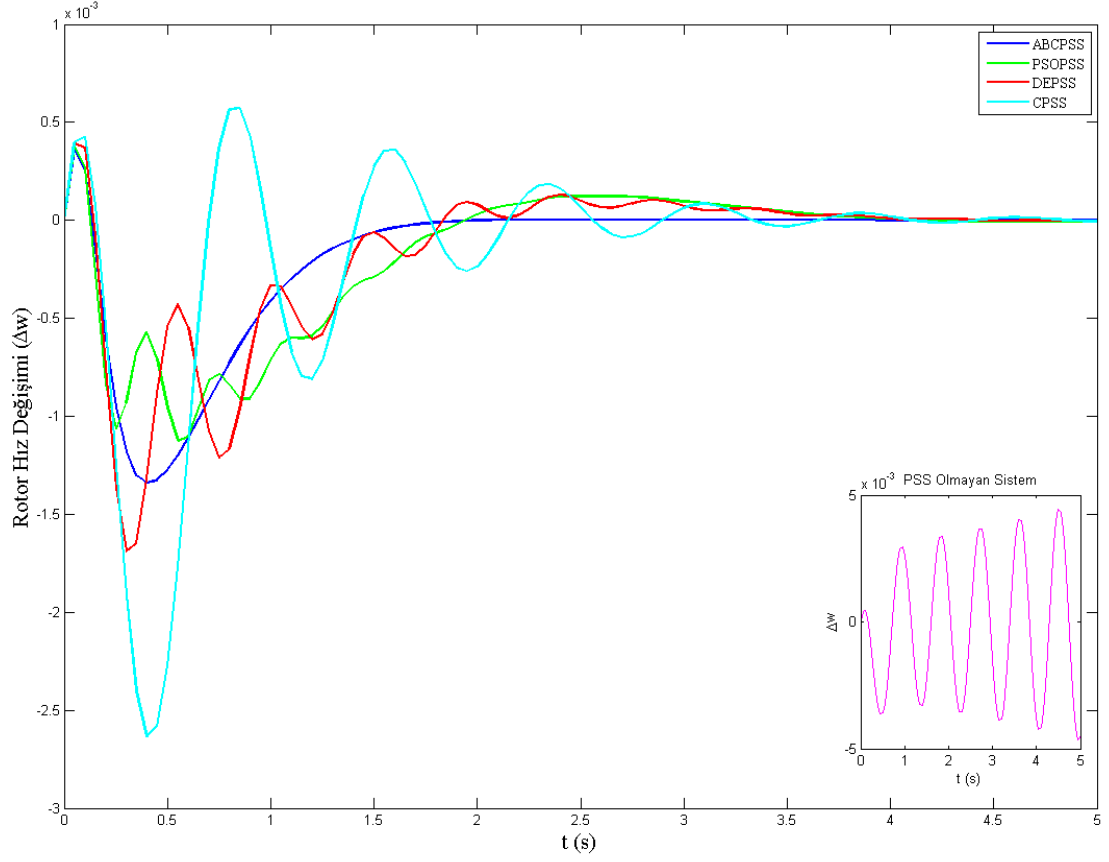
Şekil 5.1. Durum 1 için rotor hız değişimi

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere PSS olmayan güç sisteminde salınımlar artarak kararsızlığa doğru gitmektedir. Sisteme CPSS ilavesi ile 5 s’ye kadar yaklaşık 6 tepe değeri kadar azalan salınımlar yaparak sistemin kararlı hale oturduğu gözlenmiştir. DEPSS ve PSOPSS ise zaman eksenine boyunca salınım yapmaz iken CPSS’e göre sadece kendi üzerlerinde salınımlar yaparak 5 s olmadan kararlı hale gelmiştir. Önerilen ABCPSS yapısı ise her üç PSS yapısına göre şekilde de açıkça görüldüğü gibi hem kendi üzerinde hem de zaman eksenine boyunca salınım yapmadan yaklaşık 2,5 s’de sistemin kararlı hale gelmesine yardımcı olmuştur.



Şekil 5.2. Durum 2 için rotor hız değişimi

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere PSS olmayan güç sisteminde salınımlar azalarak kararlılığa doğru gitmektedir. Fakat sistemin kararlı hale gelme süresi diğer PSS yapılarına göre oldukça fazladır. Sisteme CPSS ilavesi ile 5 s’den önce yaklaşık 4 tepe değeri kadar azalan salınımlar yaparak sistemin kararlı hale oturduğu gözlenmiştir. DEPSS ise zaman eksenini boyunca salınım yapmaz iken CPSS’e göre sadece kendi üzerinde salınımlar yaparak 4 s civarından kararlı hale gelmiştir. Buna karşın PSOPSS’in kendi üzerindeki salınımları daha az olmakla birlikte ilk birkaç saniyedeki salınımlar gözlenmiştir. PSOPSS’de DEPSS gibi 4 s civarından kararlı hale gelmiştir. Her üç PSS yapısı salınım yaparak kararlı hale gelirken önerilen ABCPSS yapısı ise salınım yapmadan 2 saniye gibi bir oturma zamanı ile sistemin kararlı hale gelmesini sağlamıştır.



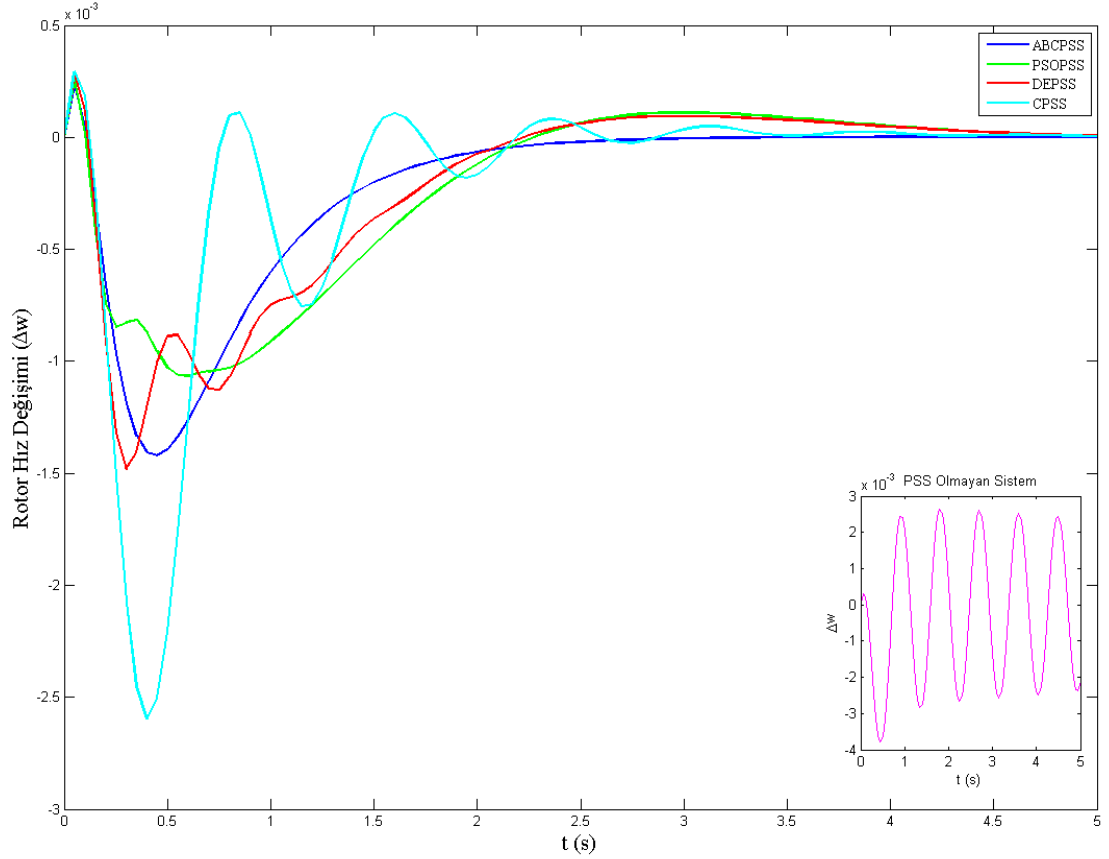
Şekil 5.3. Durum 3 için rotor hız değişimi

PSS olmayan güç sisteminde Şekil 5.3’de görüldüğü üzere salınımlar artarak kararsızlığa doğru gitmektedir. Sisteme CPSS ilavesi ile 5 s’den sonra yaklaşık 5 tepe değeri kadar azalan salınımlar yaparak sistemin kararlı hale oturduğu gözlenmiştir. DEPSS ve PSOPSS ise zaman eksenine boyunca salınım yapmaz iken CPSS’e göre sadece kendi üzerlerinde salınımlar yaparak 4. saniye civarında kararlı hale gelmiştir. Önerilen ABCPSS yapısı ise birinci saniye içinde pozitif ve negatif ekseninde iki tepe değeri ile her üç PSS yapısına göre daha az tepe değerli salınımlar ile 1,5 saniye gibi kısa bir sürede kararlı hale gelmiştir.

Durum 4, Durum 5 ve Durum 6

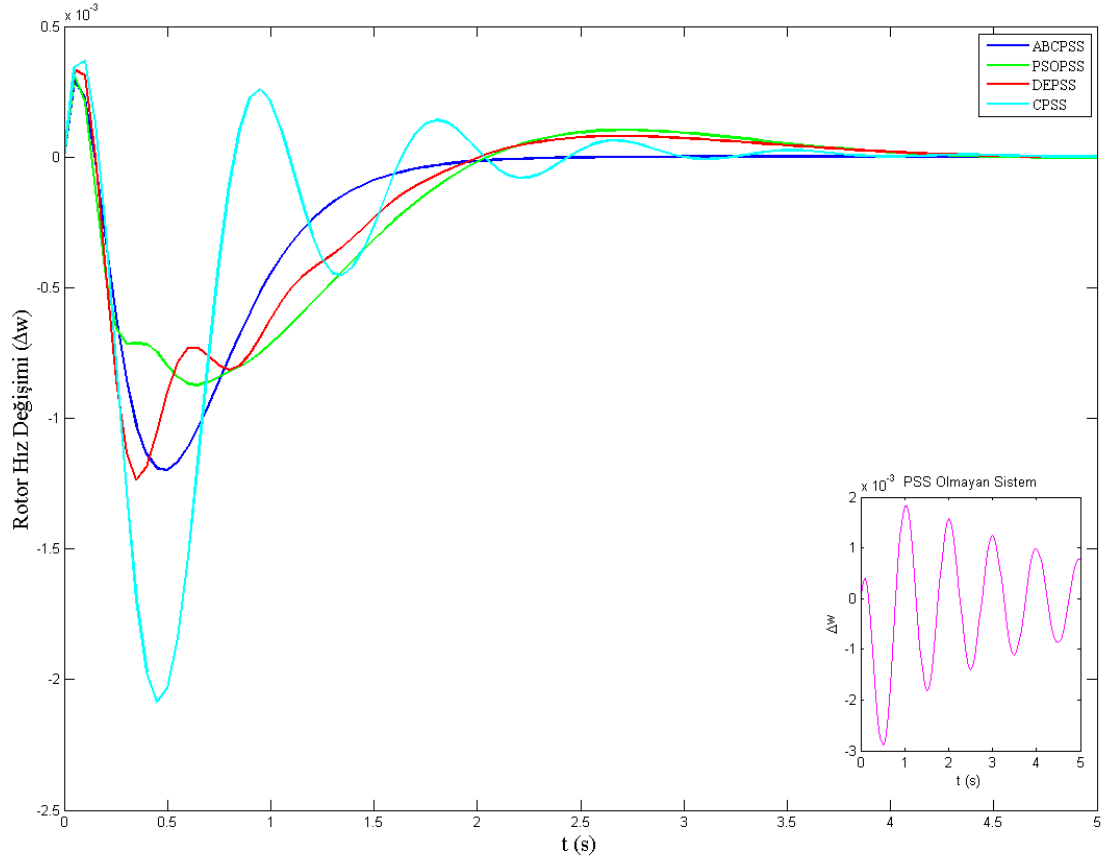
Durum 4 normal yük durumunu, Durum 5 hafif yük durumunu ve Durum 6 ağır yük durumunu ifade etmektedir. Bir önceki durumlarda olduğu gibi hem V_{ref} hem de

T_{mech} bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Durum 1-3'den farklı olarak kullanılan uyarım sistemi bloğu K_A ile ifade edilir. Her üç durum içinde geleneksel GSD (CPSS), DE tabanlı GSD (DEPSS), PSO tabanlı GSD (PSOPSS) ve önerilen ABC tabanlı PSS (ABCPSS)'in zamana bağlı $\Delta\omega$ değişimleri şekillerde gösterilmiştir.



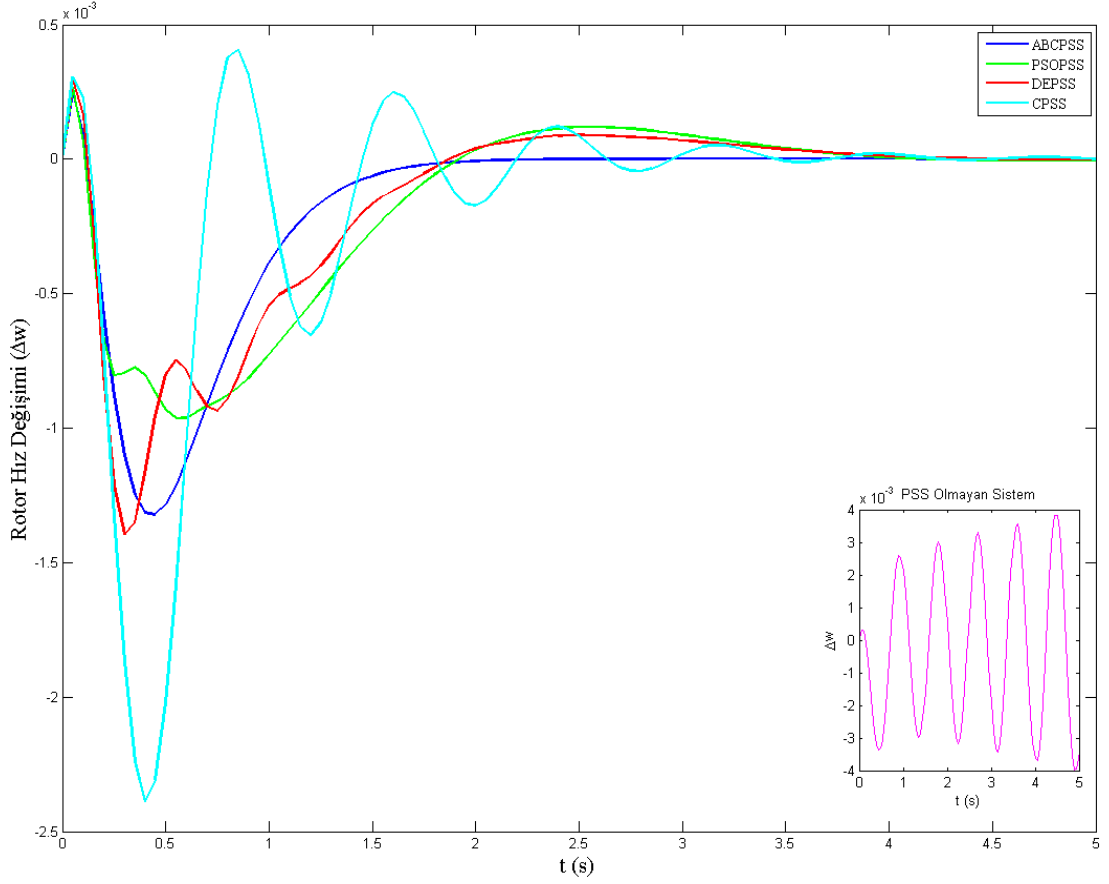
Şekil 5.4. Durum 4 için rotor hız değişimi

Şekil 5.4 ve Şekil 5.1'de güç sistemindeki yük durumları ve güç sistemine uygulanan bozucu girişler aynı olmakla beraber güç sistemi modelinde kullanılan uyarım sistemi bloğu farklıdır. Şekil 5.1'de de ifade edildiği gibi önerilen ABCPSS yapısı her üç PSS yapısına göre daha keskin ve daha net bir sonuç vermektedir. Bununla birlikte uyarım sisteminin değişimi ile her üç PSS yapısının daha kararlı bir halde ve daha az bir oturma zamanı ile cevap verdiği görülmektedir.



Şekil 5.5. Durum 5 için rotor hız değişimi

Benzer olarak Durum 5 için Durum 2’de kullanılan güç sistemi modelinden tek farkı kullanılan uyarım sistemi bloğudur. Şekil 5.2’de de görüldüğü gibi PSS olmayan sistemin kararlı hale gelmesi Şekil 5.5’de de görüldüğü gibi 5 saniyeden daha fazla sürededir. CPSS, DEPSS ve PSOPSS yapıları uyarım sistem bloğu etkisi ile Şekil 5.2’ye göre daha az bir oturma zamanı ile kararlı hale gelmiştir. Fakat önerilen ABCPSS yapısının bu uyarım bloğu değişiminden etkilenmediği ve daha dayanıklı bir PSS tasarımı gerçekleştiği gözlenmiştir.



Şekil 5.6. Durum 6 için rotor hız değişimi

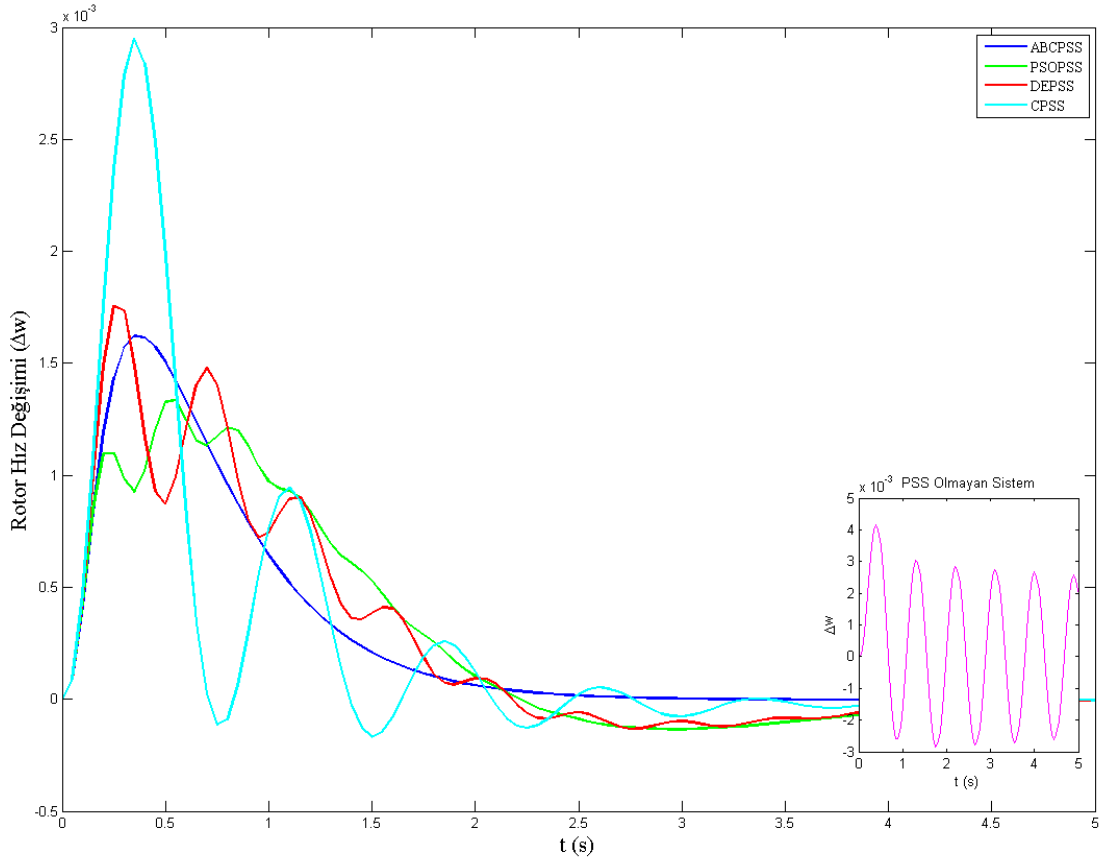
Şekil 5.6’da PSS olmayan sistemin kararlı hale gelmesinin sağlanamadığı ve kararsızlığa doğru gittiği görülmektedir. Durum 3’deki uyarım bloğu değişse bile Şekil 5.6’da ABCPSS, güç sisteminin kararlılığını Şekil 5.3’deki gibi sağladığı görülmektedir. Bunun yanı sıra diğer üç PSS yapısının bu değişimden olumlu yönde etkilendiği açıkça görülmektedir. Fakat yine de güç sistem cevabı olarak ABCPSS yapısına göre belirgin bir üstünlük kuramamışlardır.

Durum 7, Durum 8, Durum 9 ve Durum 10

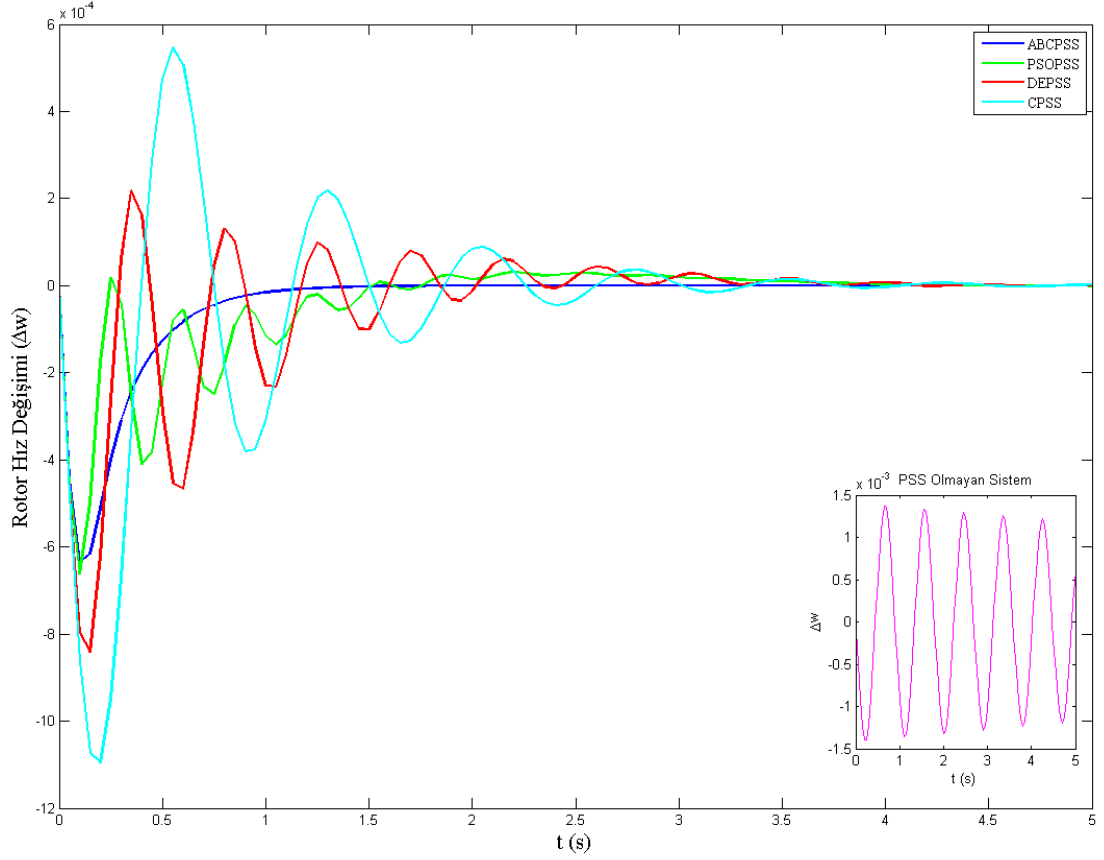
Durum 7-10 için yapılan bütün çalışmalar normal yük durumu göz önüne alınarak yapılmıştır. Durum 7 ve Durum 8’de kullanılan uyarım sistemi bloğu $\frac{K_A}{1+sT_A}$ iken

Durum 9 ve Durum 10’da kullanılan uyarım sistemi bloğu K_A ’dir. Durum 7 ve

Durum 9’da sadece $-V_{ref}$ bozucu giriş olarak uygulanmışken Durum 8 ve Durum 10 için ise sadece $-T_{mech}$ bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Her dört durum içinde geleneksel GSD (CPSS), DE tabanlı GSD (DEPSS), PSO tabanlı GSD (PSOPSS) ve önerilen ABC tabanlı PSS (ABCPSS)’in zamana bağlı $\Delta\omega$ değişimleri şekillerde gösterilmiştir.

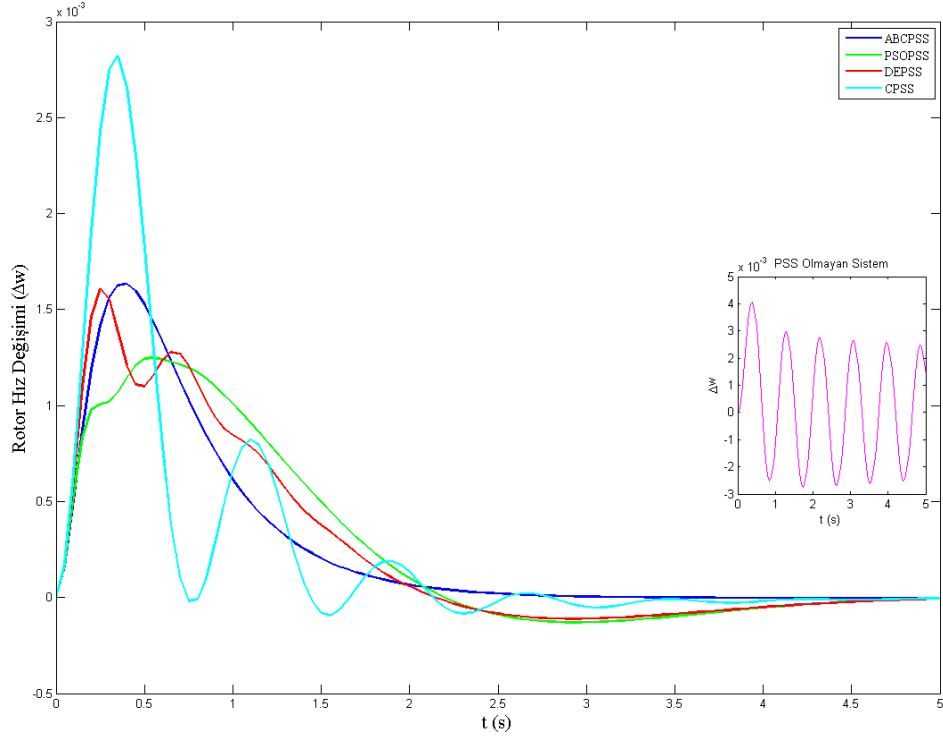


Şekil 5.7. Durum 7 için rotor hız değişimi

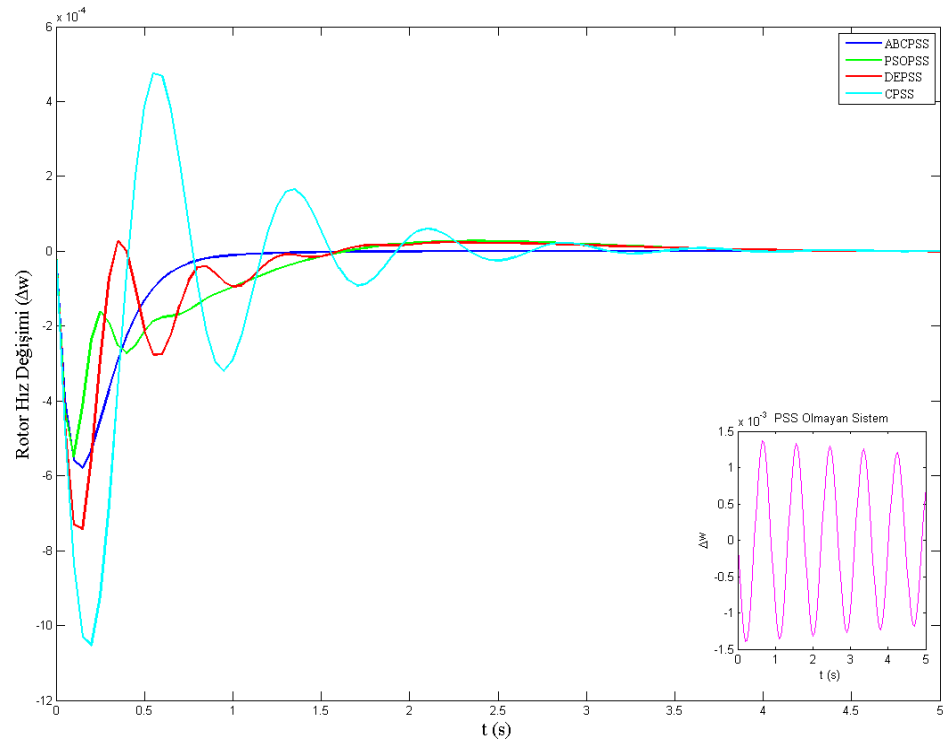


Şekil 5.8. Durum 8 için rotor hız değişimi

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de güç sistem modeli aynı olmakla birlikte tek fark Şekil 5.7’de bozucu giriş olarak $-V_{ref}$ ve Şekil 5.8’de $-T_{mech}$ uygulanmıştır. Şekil 5.8 için PSS olmayan sistemin kararlı hale gelmesinin sağlanamadığı ve kararsızlığa doğru gittiği fakat Şekil 5.7’de uzun zaman olsa da sistemin kararlılığa gittiği görülmektedir. Şekil 5.7’de ABCPSS yapısının 2,5 saniyede sönümle sağladığı görülürken Şekil 5.8’de 1 saniye gibi bir sürede sönümlemeye ulaştığı görülmüştür. Bu farklı bozucu değişimlerin ABCPSS yapısını etkilemediği görülürken diğer üç PSS yapısının özellikle Şekil 5.8’de kendi eksenleri üzerinde daha çok salınım yaparak kararlılığa gittiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.9. Durum 9 için rotor hız değişimi

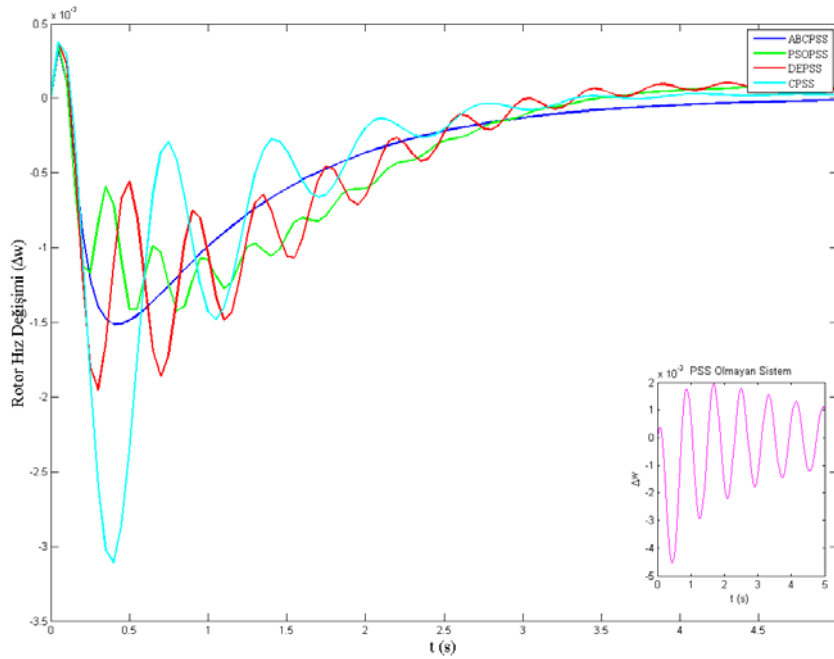


Şekil 5.10. Durum 10 için rotor hız değişimi

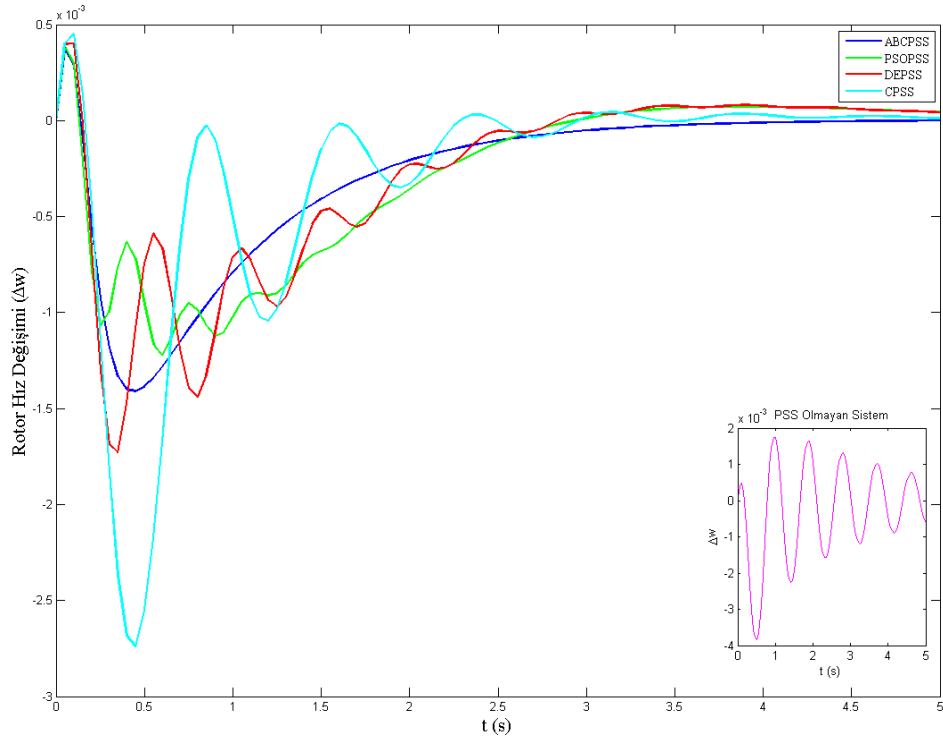
Durum 9 ve Durum 10’u ifade eden Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’daki bozucu girişler sırası ile Durum 7 ve Durum 8’deki gibidir. Bu şekillerin Durum 7-8’den tek farkı uyarım bloğunun farklı olmasıdır. Şekil 5.9’da görüldüğü gibi PSS yapıları hemen hemen aynı özellikleri gösterirken Şekil 5.10’da da görüldüğü üzere önerilen ABCPSS yapısı diğer durumlarda olduğu gibi daha dengeli ve dayanıklı bir sonuç üretmektedir.

Durum 11, Durum 12 ve Durum 13

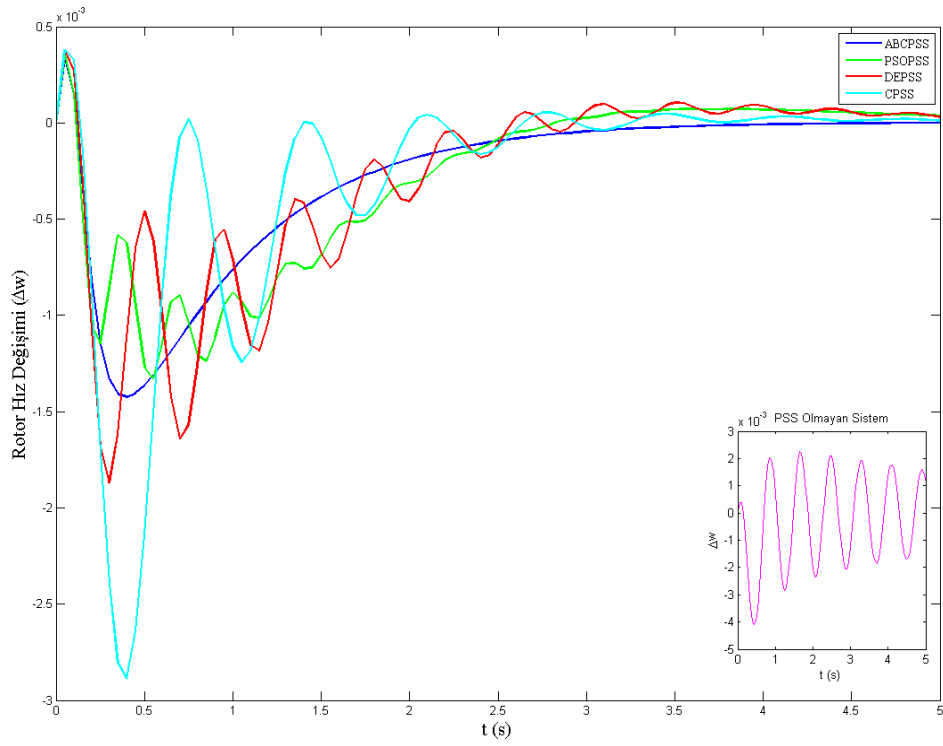
Bu çalışma Durum 1, Durum 2 ve Durum 3’deki bozucu giriş, yük durumları ve kullanılan uyarım sistemi bloğu $\frac{K_A}{1+sT_A}$ ile aynı iken iletim hattı empedansı x_e yarı değerine düşürülmüştür. Bu durumda iletim hattı empedansının önemi optimizasyon algoritmalarının çalışma aralığında bu değerin olmamasıdır. Her üç durum içinde geleneksel GSD (CPSS), DE tabanlı GSD (DEPSS), PSO tabanlı GSD (PSOPSS) ve önerilen ABC tabanlı PSS (ABCPSS)’in zamana bağlı $\Delta\omega$ değişimleri şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Durum 11 için rotor hız değişimi



Şekil 5.12. Durum 12 için rotor hız değişimi

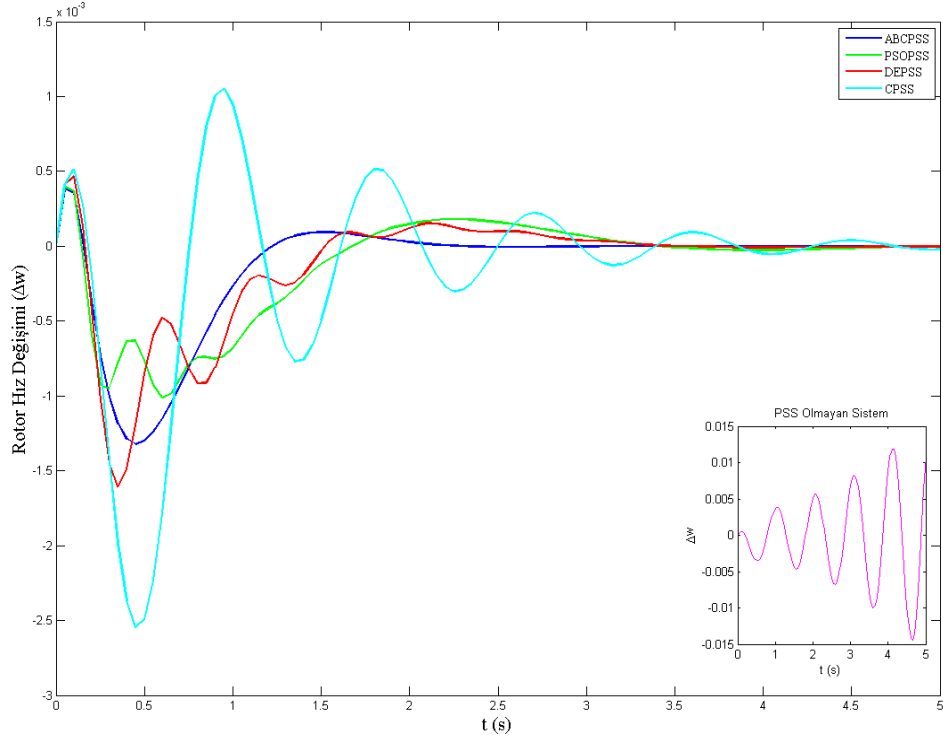


Şekil 5.13. Durum 13 için rotor hız değişimi

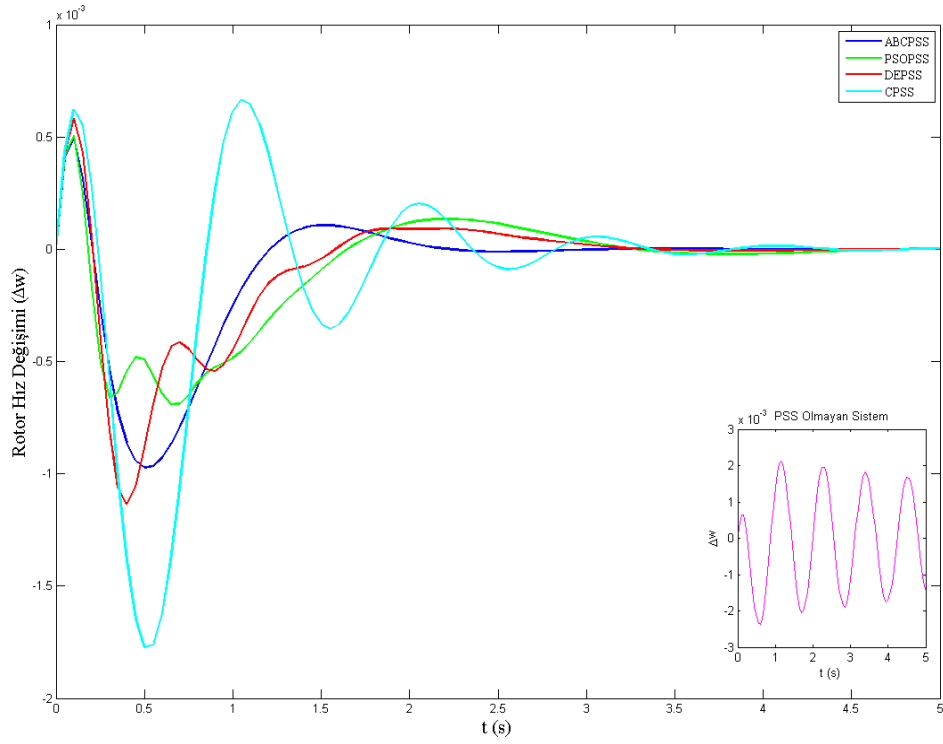
Şekil 5.11-13'deki sistem cevabını veren PSS parametreleri bu tez çalışmasında belirtilen geniş bölge çalışma aralığının dışında seçilmiş bir nokta olması sebebiyle diğer durumlara göre daha önem arz etmektedir. Daha önce belirtilen Durum1-3 ile aynı özellikleri taşıyan bu sistemde en önemli fark iletim hattı empedansının yarı değerinde olmasıdır. Bu durumların Şekil 5.1-3 ile kıyaslandığında CPSS, DEPSS ve PSOPSS yapılarının daha fazla salınım yaparak 5 saniye öncesinde kararlılığa ulaşmadığı görülmüştür. Fakat önerilen ABCPSS yapısının 3 saniye civarındaki oturma zamanı ile yine keskin ve salınım yapmadan sistemi kararlı hale götürdüğünü şekillerden açıkça görmekteyiz.

Durum 14, Durum 15 ve Durum 16

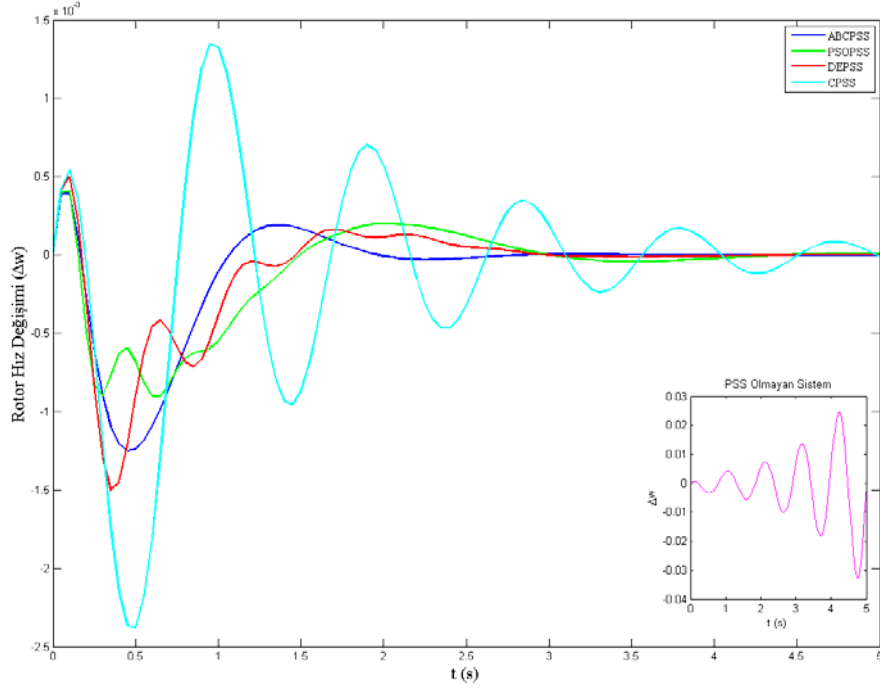
Bu çalışma Durum 11, Durum 12 ve Durum 13'deki bozucu giriş, yük durumları ve kullanılan uyartım sistemi bloğu $\frac{K_A}{1+sT_A}$ ile aynı iken iletim hattı empedansı (x_e) normal değerinin iki katına çıkarılmıştır. Durum 11-13'de olduğu gibi optimizasyon algoritmalarının çalışma aralığında bu değer olmaması yapılan çalışmaları daha önemli kılmaktadır. Her üç durum içinde geleneksel GSD (CPSS), DE tabanlı GSD (DEPSS), PSO tabanlı GSD (PSOPSS) ve önerilen ABC tabanlı PSS (ABCPSS)'in zamana bağlı $\Delta\omega$ değişimleri şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Durum 14 için rotor hız değişimi



Şekil 5.15. Durum 15 için rotor hız değişimi



Şekil 5.16. Durum 16 için rotor hız değişimi

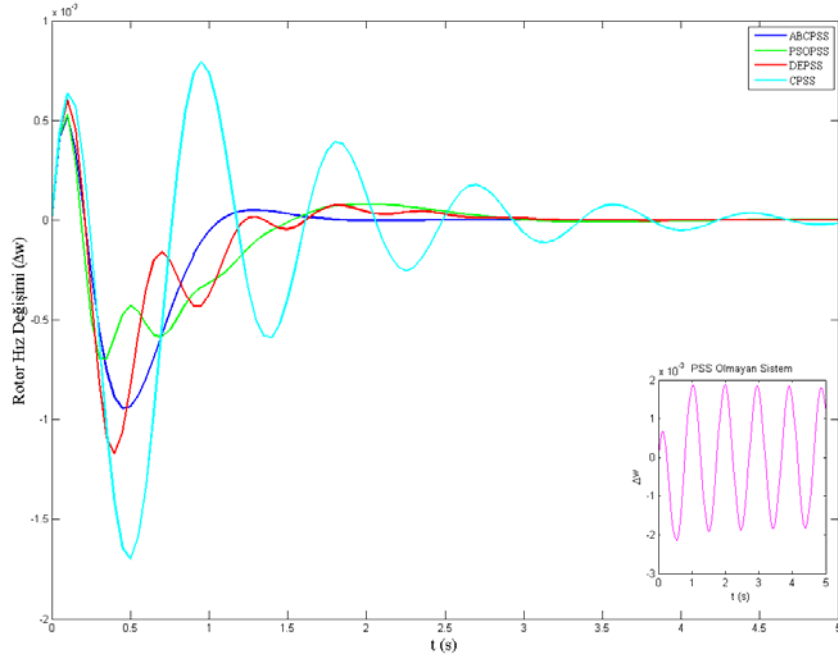
Durum 14-16'yı ifade eden şekillerde iletim hattı empedansı (x_e) normal değerinin iki katına çıkarılarak benzetim çalışmaları elde edilmiştir. Bütün PSS yapılarının önemli derece etkilendiği bu değişiklik yine çalışma aralığı dışında elde edilen sistem cevabı olması sebebiyle önemlidir. Her ne kadar ABCPSS diğer yapılara nazaran kendi üzerinde salınım yapmadan kararlılığa ulaştada diğer PSS yapılarına yakın bir oturma zamanı ile sönümlemeyi başarmıştır. Özellikle bu durumda PSS olmayan sistemin çok çabuk kararsızlığa gittiği görülmektedir.

Durum 17 ve Durum 18

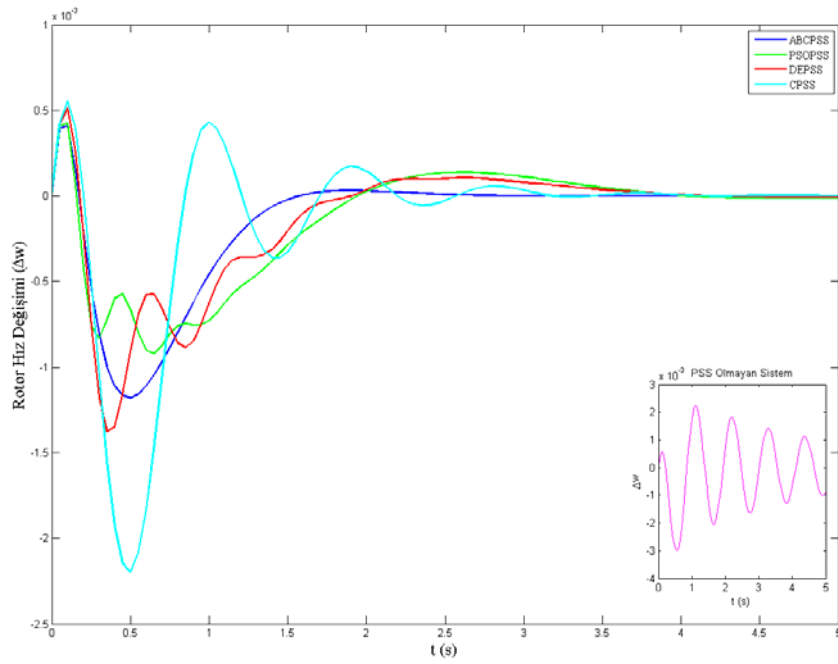
Durum 17 ve Durum 18'de yük durumu Çizelge 5.3'teki yük durumundan farklıdır. Bu çalışmadaki yük durumu rasgele olarak seçilmiştir. Durum 17 için iletim hattı empedansı (x_e) normal değerinde Durum 18'de ise iletim hattı empedansı (x_e) normal değerinin iki katına çıkarılmıştır. Bütün durumlarda hem V_{ref} hem de T_{mech} bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Kullanılan uyarım sistemi bloğu $\frac{K_A}{1+sT_A}$ ile ifade edilir.

Her iki durum içinde geleneksel GSD (CPSS), DE tabanlı GSD (DEPSS), PSO

tabanlı GSD (PSOPSS) ve önerilen ABC tabanlı PSS (ABCPSS)'in zamana bağılı $\Delta\omega$ değişimleri şekillerde gösterilmiştir. Ayrıca GSD'siz sistem cevabı da şekillere eklenmiştir.



Şekil 5.17. Durum 17 için rotor hız değişimi

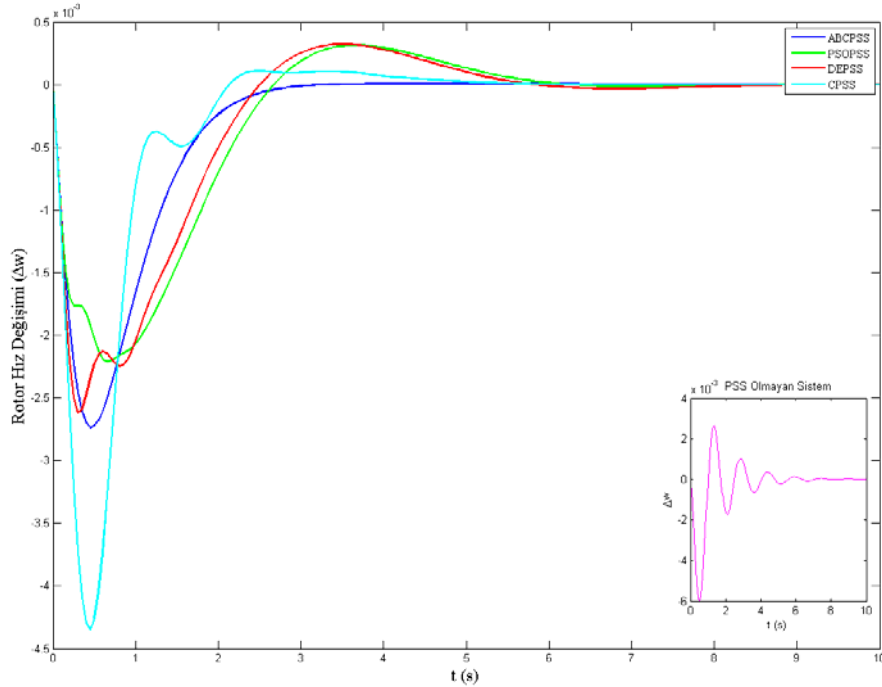


Şekil 5.18. Durum 18 için rotor hız değişimi

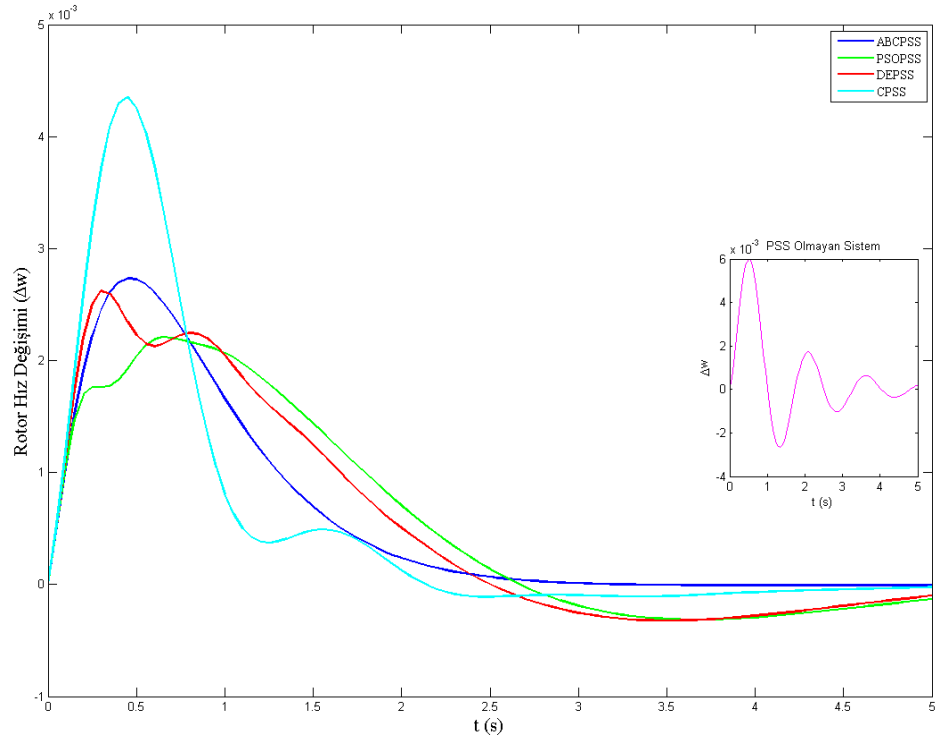
Bu tez çalışmasında şimdiye kadar yapılan çalışmalardaki yük durumları Çizelge 5.3'deki yük durumundan farklı değildir. Fakat Şekil 5.17-18'deki yük durumları çalışma aralığı içinde rasgele seçilmiş yük durumlarıdır. Şekil 5.17-18'deki PSS yapıları benzer cevaplar üretirken ABCPSS yapısının daha net sönümleme sağladığı görülmektedir.

Durum 19, Durum 20, Durum 21 ve Durum 22

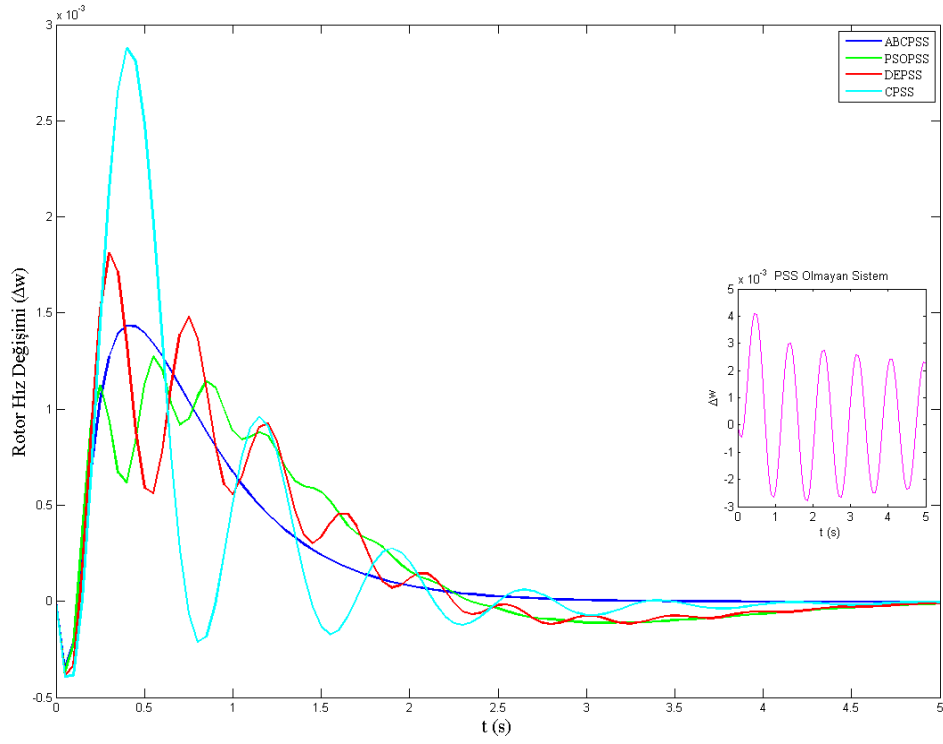
Durum 19-22 için yapılan bütün çalışmalar rasgele yük durumu göz önüne alınarak yapılmıştır. Uyartım sistemi bloğu $\frac{K_A}{1+sT_A}$ iken Durum 19'da V_{ref} ve $-T_{mech}$, Durum 20'de $-V_{ref}$ ve T_{mech} , Durum 21'de $-V_{ref}$ ve $-T_{mech}$ ve Durum 22'de $-V_{ref}$ ve $-T_{mech}$ bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Her dört durum içinde geleneksel GSD (CPSS), DE tabanlı GSD (DEPSS), PSO tabanlı GSD (PSOPSS) ve önerilen ABC tabanlı PSS (ABCPSS)'in zamana bağlı $\Delta\omega$ değişimleri şekillerde gösterilmiştir.



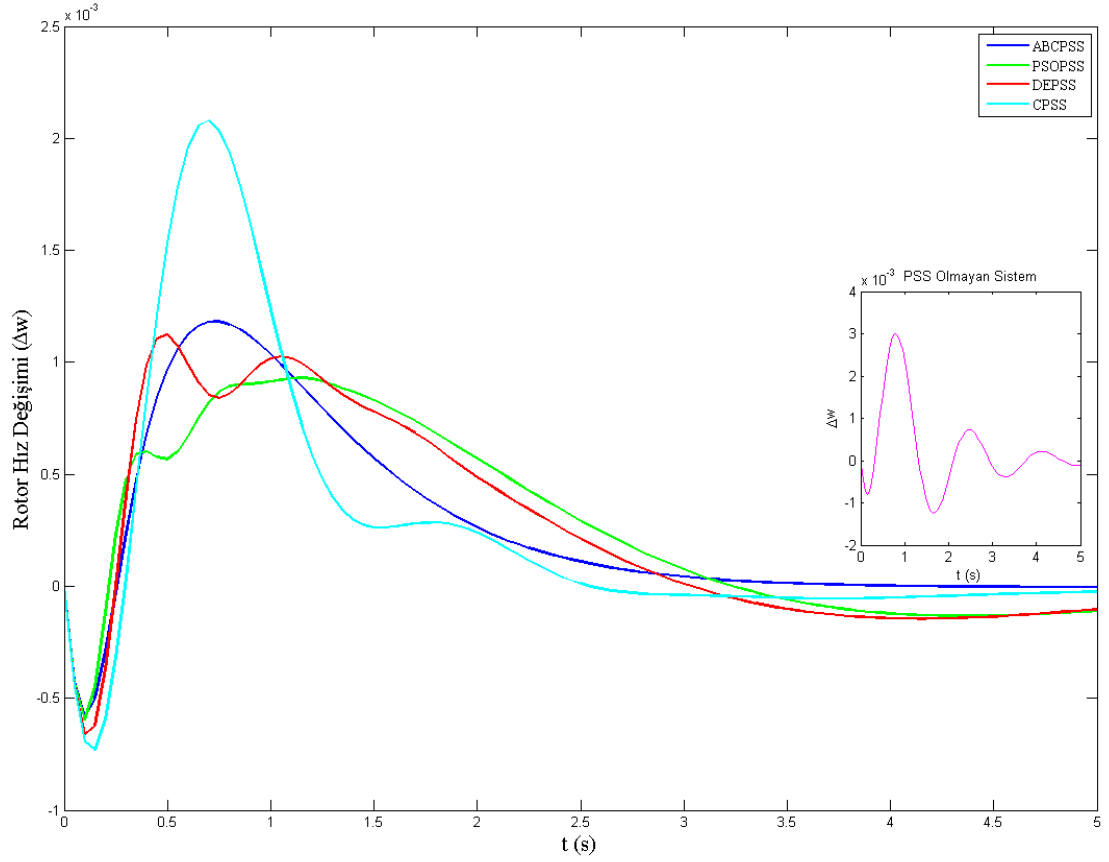
Şekil 5.19. Durum 19 için rotor hız değişimi



Şekil 5.20. Durum 20 için rotor hız değişimi



Şekil 5.21. Durum 21 için rotor hız değişimi



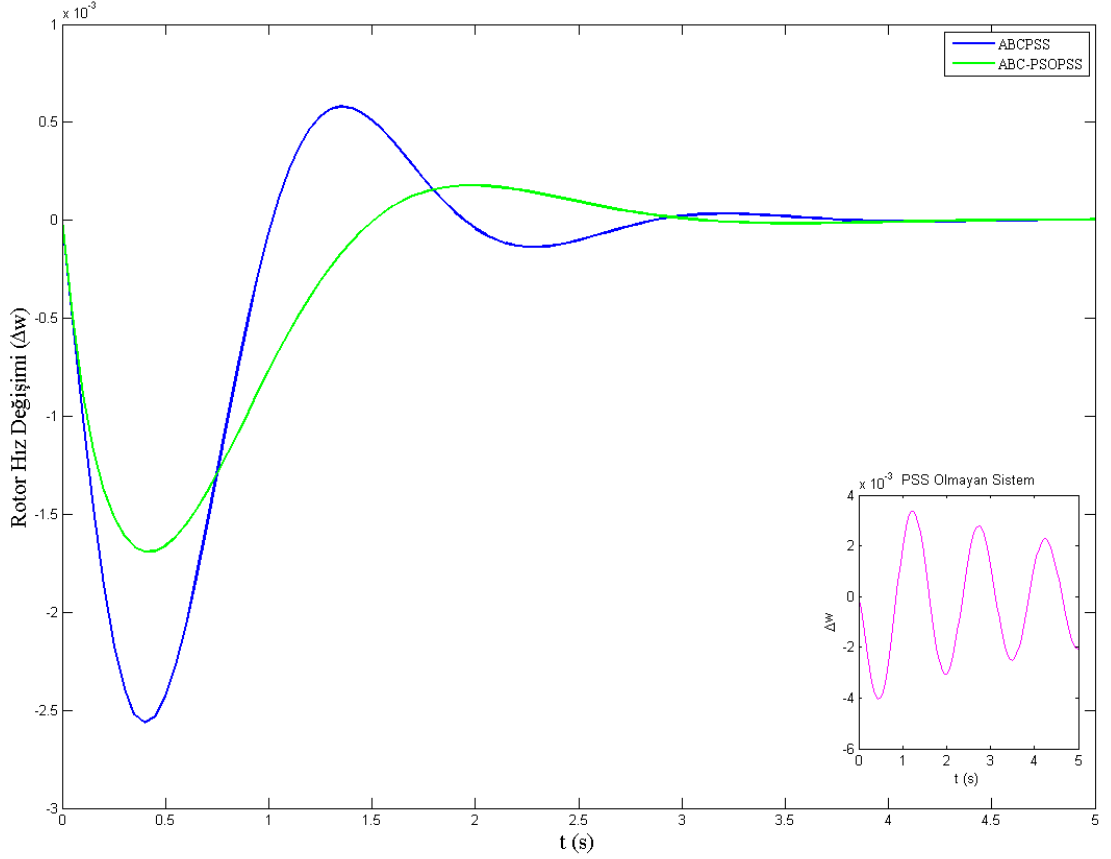
Şekil 5.22. Durum 22 için rotor hız değişimi

Şekil 5.19-22’de de görüldüğü gibi benzer cevaplar veren PSS yapıları özellikle Durum 19, 20, 22’de sistemde PSS yapısı olmasa bile sistemin kararlılığa gittiği gözlenmektedir. Her dört durumda Çizelge 5.3’ün dışında seçilmiş fakat çalışma aralığı içinde rasgele seçilmiş yük durumları kullanılmaktadır. Ayrıca her durum içinde ayrı bozucu girişler uygulanmıştır. Şekil 5.21 dışındaki şekillerden de görüldüğü üzere her üç PSS yapısının nispeten ABCPSS yapısına yakın cevaplar ürettiği fakat Şekil 5.21’de ABCPSS’in salınımsız sönümlemeye ulaştığı gözlemlenmiştir.

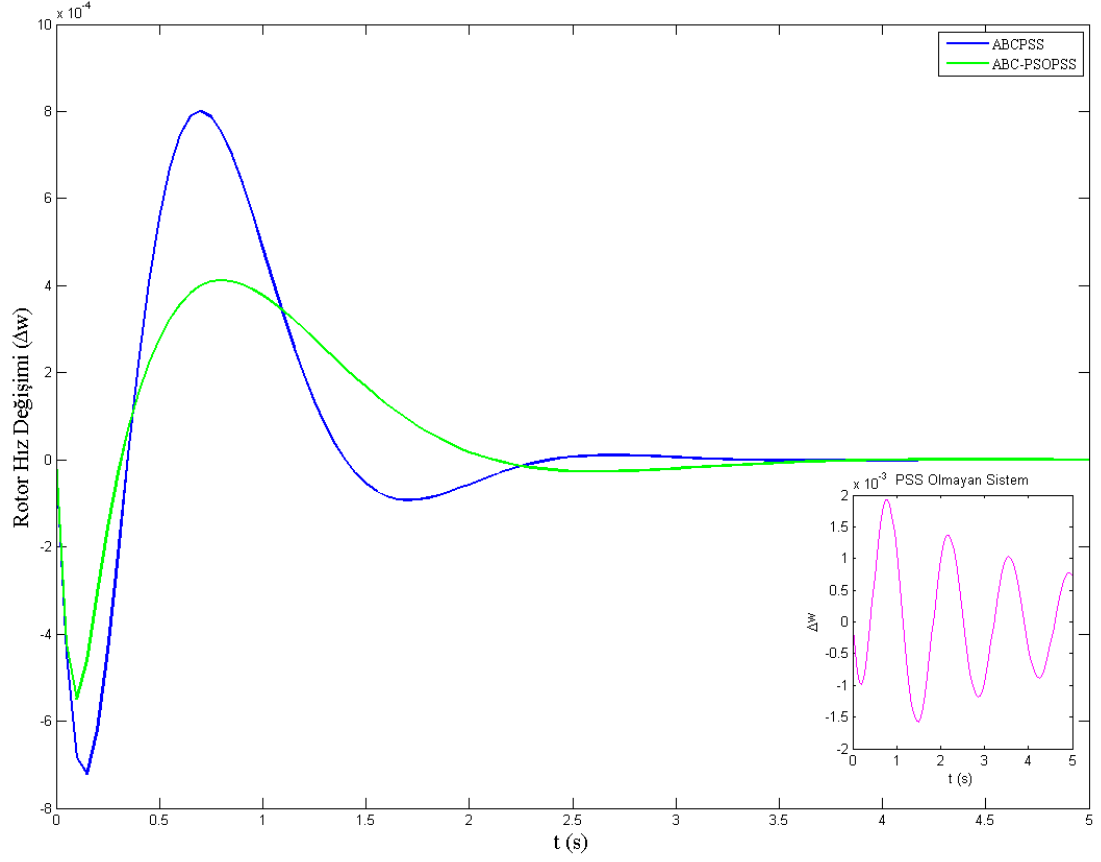
Durum 23, Durum 24, Durum 25 ve Durum 26

Durum 23-26 için yapılan bütün çalışmalar rasgele yük durumu göz önüne alınarak yapılmıştır. Uyarım sistemi bloğu $\frac{K_A}{1+sT_A}$ iken Durum 23’de V_{ref} ve T_{mech} , Durum

24'de $-V_{ref}$ ve $-T_{mech}$, Durum 25'de $-V_{ref}$ ve T_{mech} ve Durum 26'da V_{ref} ve $-T_{mech}$ bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Her dört durum içinde önerilen ABC tabanlı PSS (ABCPSS) ve PSO destekli ABC tabanlı PSS (PSO-ABCPSS)'in zamana bağlı $\Delta\omega$ değişimleri şekillerde gösterilmiştir.

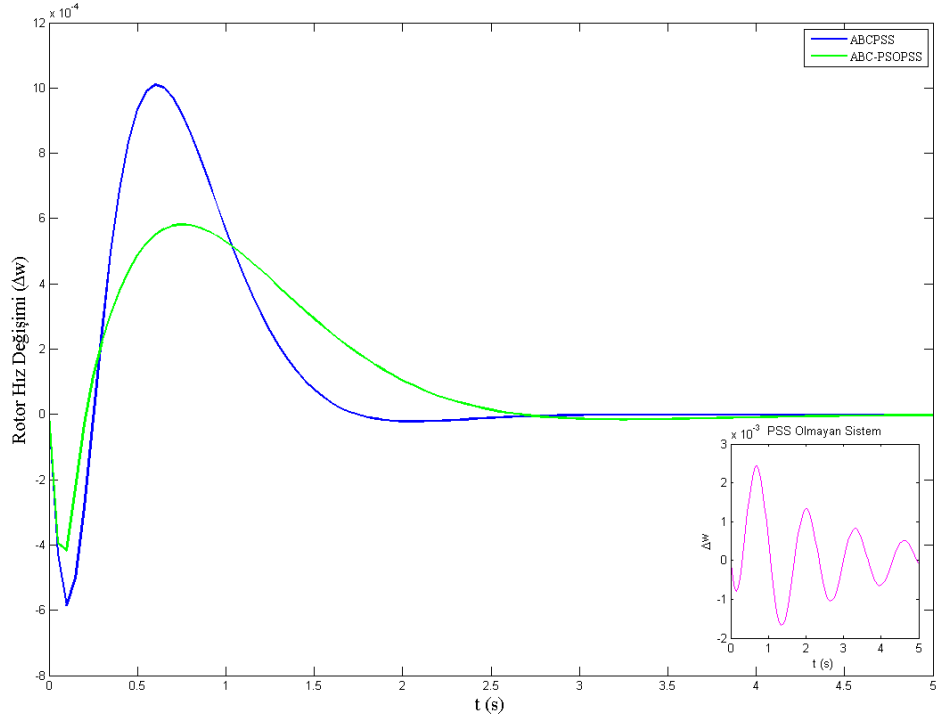


Şekil 5.23a. Durum 23a için rotor hız değişimi

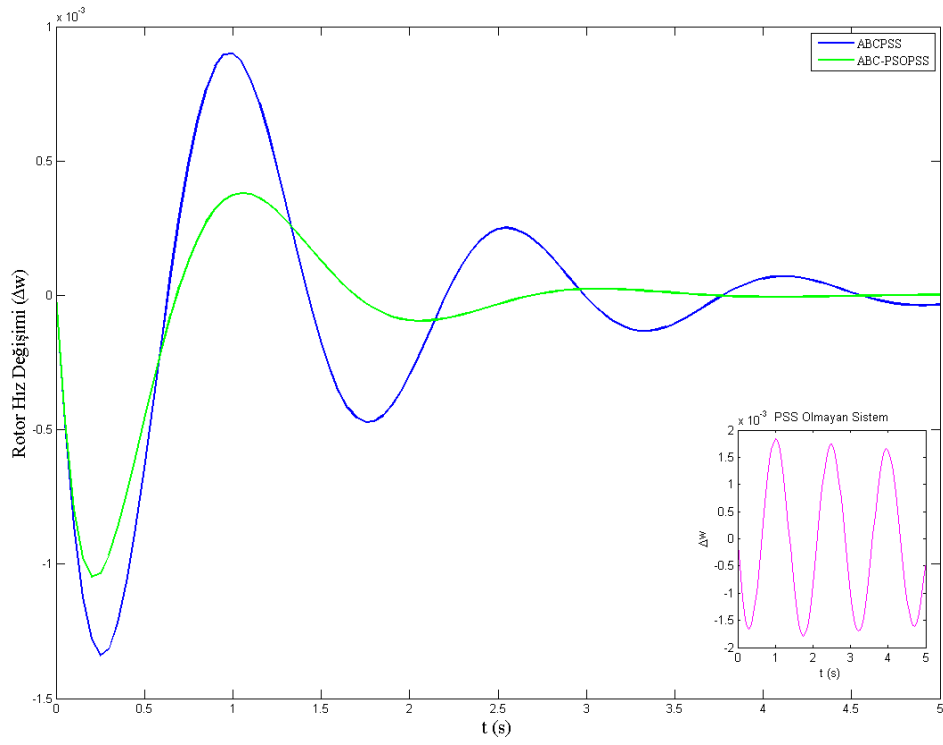


Şekil 5.23b. Durum 23b için rotor hız değişimi

Durum 23'ü ifade eden Şekil 5.23'deki sistem cevapları aynı sistemin iki defa çalıştırılmasından oluşmaktadır. Durum 23 için yük durumunun rasgele olması sebebi ile güç sistem modeli cevabıda değişmektedir. Bu değişim her iki PSS yapısı (ABCPSS ve PSO-ABCPSS)için şu ifadeyi kullanmamıza olanak sağlar: hem ABCPSS hemde PSO-ABCPSS yapısı dayanıklı ve güçlü bir yapıya sahiptir. Şekil 5.23'den de görüleceği üzere her iki PSS yapısıda 3 saniye civarında kararlı hale gelmektedir.

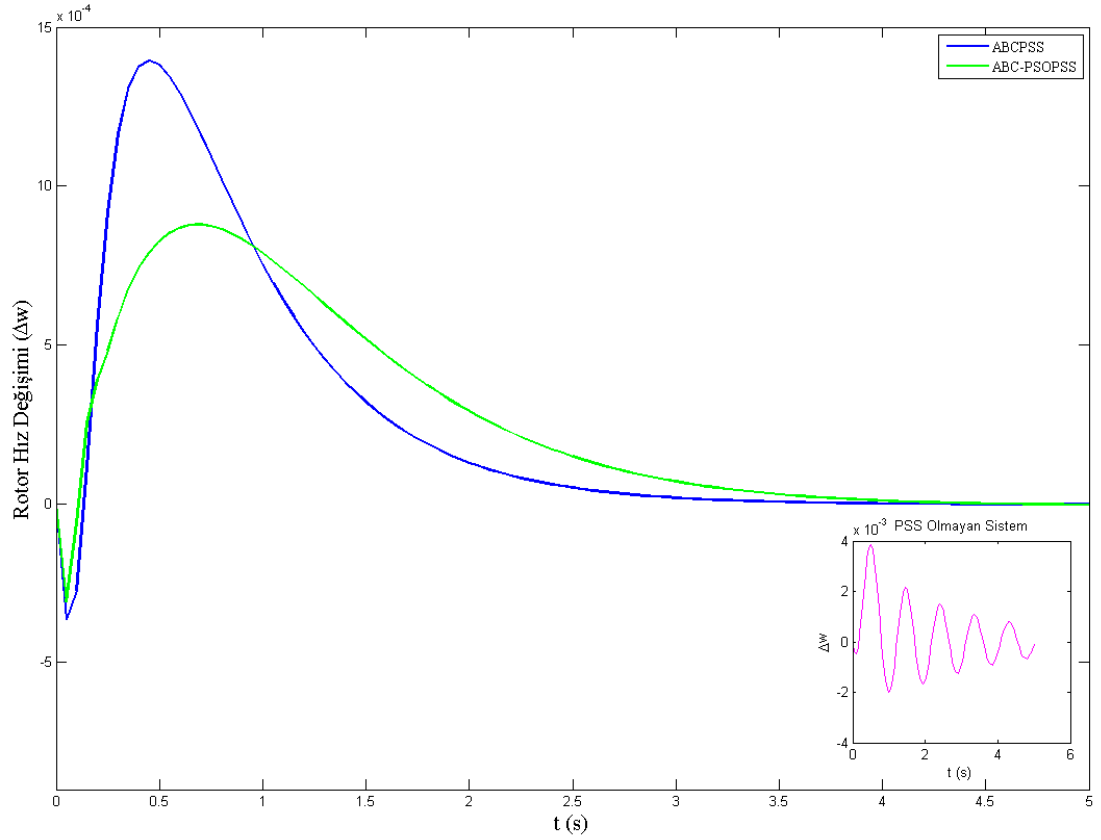


Şekil 5.24a. Durum 24a için rotor hız değişimi

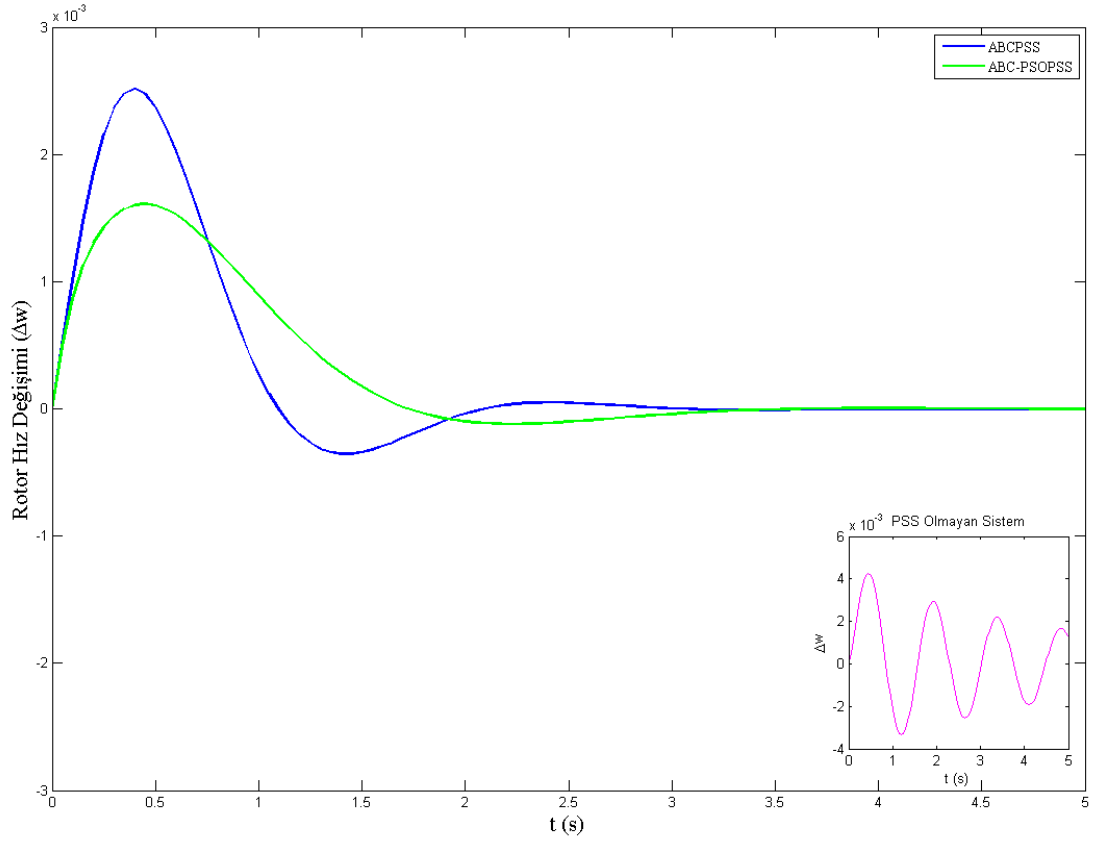


Şekil 5.24b. Durum 24b için rotor hız değişimi

Durum 24'ü ifade eden Şekil 5.24a'daki sistem cevabı diğer durumlarda olduğu gibi 5 saniyenin altında kararlılığı sağlar iken rasgele yük durumu seçimi nedeniyle Şekil 5.24b'de sistem kararlılığı 5 saniyeyi aşmaktadır. Şekil 5.24b'de görüldüğü üzere PSO-ABCPSS yapısı daha kararlı bir sistem cevabı üretmekte olup 5 saniye civarında sönümlenme sağlamıştır.

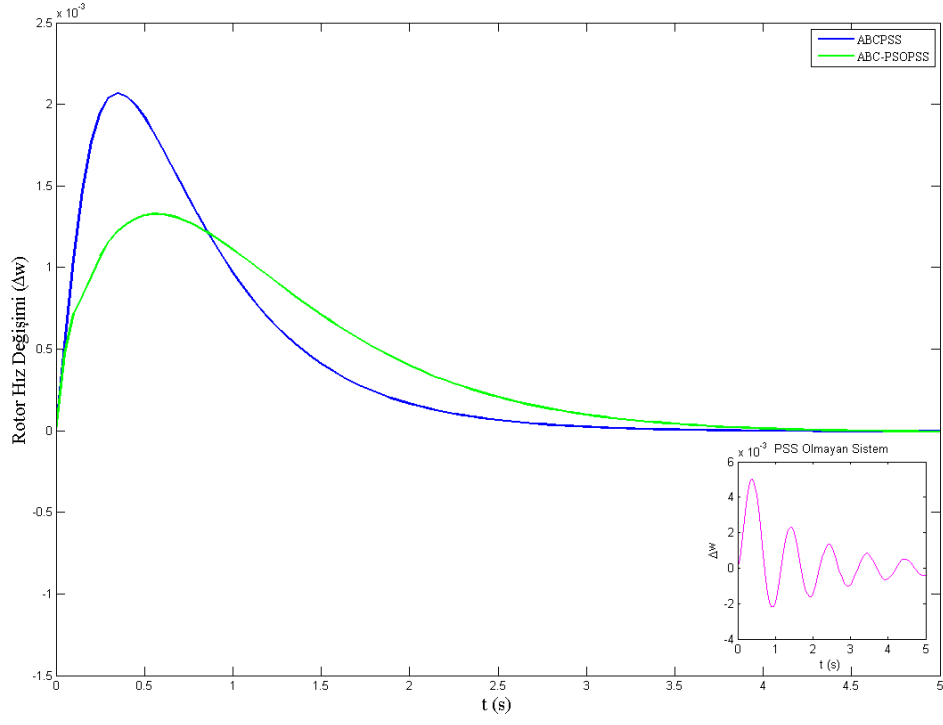


Şekil 5.25a. Durum 25a için rotor hız değişimi

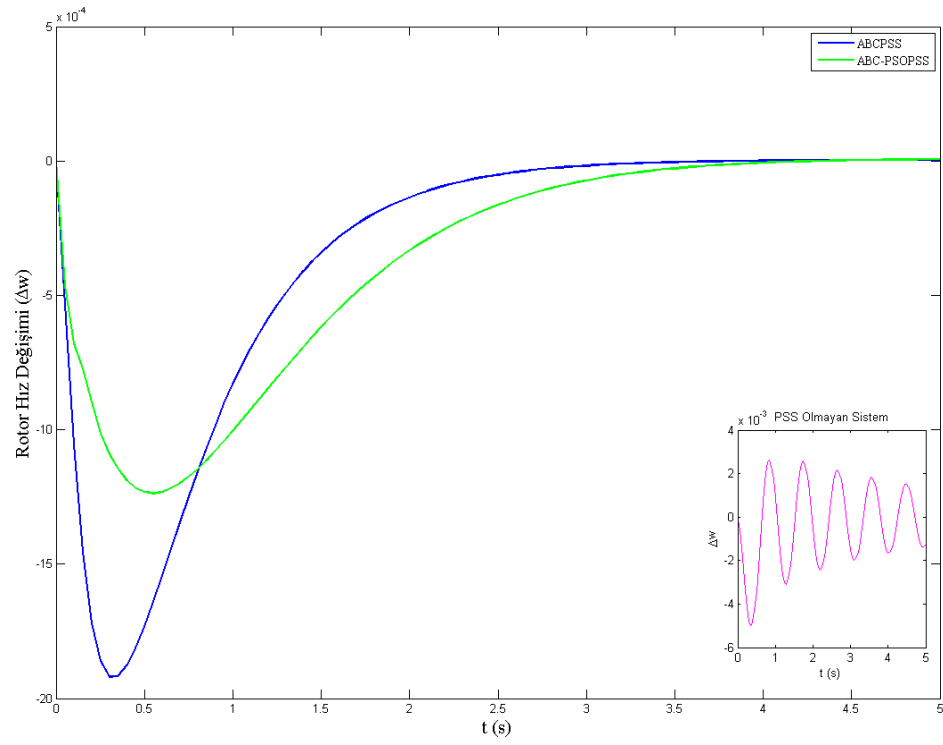


Şekil 5.25b. Durum 25b için rotor hız değişimi

Şekil 5.25’de de görüldüğü gibi PSO-ABCPSS’in sisteme etkisi ABCPSS ile benzerlik göstermektedir. Şekillerden de görüleceği üzere her iki PSS yapısında 3 saniye civarında kararlı hale gelmektedir.



Şekil 5.26a. Durum 26a için rotor hız değişimi



Şekil 5.26b. Durum 26b için rotor hız değişimi

Durum 26'yı ifade eden Şekil 5.26 diğer durumlarda olduğu gibi ABCPSS yapısının kararlılığını göstermektedir. Bununla birlikte önerilen ABC algoritmasının PSO ile desteklenmesi ile elde edilen yeni PSS yapısının da ABCPSS gibi dayanıklı ve kararlı olduğu görülmektedir.

Bu şekillerden de görüldüğü üzere önerilen ABCPSS yapısı diğer durumlarda olduğu gibi hem çalışma alanı içinde hemde farklı bozucu girişler uygulandığında ve bunlara ilaveten çalışma aralığı dışındaki dayanıklılığı ve kararlılığı ile diğer PSS yapılarından farklı ve üstün olduğunu göstermiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada rotor açısal kararlılığını sağlamak için geleneksel güç sistemi dengeleyicisi parametrelerinin en uygun değerleri yapay arı kolonisi algoritması ile bulunmuştur. Yapay arı kolonisi algoritmasının kesin ve doğruya en yakın çözümü bulma prensibinden faydalanılarak yeni bir güç sistem dengeleyicisi tasarımı yapılmıştır. Böylece sürekli ve dayanıklı bir güç sistem kararlılığı sağlanmıştır.

Çalışmanın ilk safhasında önerilen ABC tabanlı PSS ile diğer PSS yapıları karşılaştırılmıştır. Bu yapılar sırası ile geleneksel, DE tabanlı ve PSO tabanlı PSS'lerdir. Güç sisteminin geniş alan bölgesi bir başka deyişle küçük bozucu girişlere ve sistem değişkenlerine karşı PSS yapılarının dayanıklılığı ve cevap verme süreleri benzetim çalışmalarında incelenmiştir. Tüm PSS yapıları için aynı koşullar altında sistem cevabı incelenmiş olup bazı durumlarda rasgele bozucu girişler ve yük durumları için PSS yapılarının sistem cevabına katkısı çalışmalara eklenmiştir. Benzetim çalışmaları çıktılarından da anlaşılacağı üzere ABC tabanlı PSS'in diğer PSS yapılarına üstünlüğü görülmektedir.

Çalışmanın ikinci safhasında ise güç sistemi dengeleyicisi parametre ayarı için kullanılmamış fakat literatürde daha önceden bilinen ABC algoritmasının karma bir algoritma halinde çalışması durumunda güç sistemi cevabının ne olacağı araştırılmıştır. Bu sebeple ABC algoritmasının en iyi değeri bulmada 3 ana aşamasından biri olan kaşif arı safhasının PSO algoritması ile desteklenmesi sonucu elde edilen yeni algoritma ile benzetim çalışmaları tezde sunulmuştur. Bu yeni algoritma PSO destekli ABC olarak bir başka deyişle PSO-ABCPSS olarak çalışmalarda ifade edilmiştir. Her iki PSS yapısının karşılaştırılması farklı bozucular ve rasgele yük durumları için ikişer defa ardı ardına yapılmıştır. Bu rasgelelikten amaç aynı koşullar altında her iki PSS yapısının da bir önceki kararlılığını sağlayıp sağlamadığını test etmektir. Benzetim çalışmaları sonucu PSO-ABCPSS yapısının da güç sistemi rotor açısı kararlılığı için dayanıklı ve etkin bir kontrol sağladığı açıkça görülmüştür.

Sonuç olarak bu çalışmada güç sistemi dengeleyicisi parametrelerin en uygun değerde seçimi için literatürde bu konuya uygulanmamış olan yapay arı kolonisi (ABC) önerilmiş ve yapılan benzetim çalışmaları sonucu diğer güç sistemi dengeleyicisi yapılarına olan üstünlüğü elde edilen çıktılar sonucu gösterilmiştir. Ayrıca önerilen ABC algoritmasının geliştirilmesi için yeni bir uygulama yapılmıştır. Bu yeni uygulama PSO-ABCPSS olarak çalışmalarda ifade edilmiştir.

Bu tez çalışma konusu kapsamında ileriye dönük yapılabilece çalışmalar ve öneriler aşağıda sunulmuştur:

Bu tez çalışmasında tasarlanan yapay arı kolonisi algoritması tabanlı güç sistemi dengeleyicisinin benzetim çalışmalarının yanı sıra laboratuvar ortamında güç sistem modeli oluşturularak ve gerekli yazılımlar bu modele entegre edilerek pratik bir uygulama yapılabilir.

Tez çalışmasının tek makine sonsuz güçlü bara sistemi benzetim çalışmaları yerine çok bölgeli güç sistemlerinde uygulamasına çalışılabilir.

Bu tez çalışmasında kullanılan ABC algoritmasında kullanılan popülasyon oluşturma aşamasında farklı yöntemler kullanılarak geliştirilmesi için çalışmalar yapılabilir. Ayrıca algoritma içinde en uygun değeri bulurken kullanılan aşamalar için ayrı bir uygunluk değeri kullanılması her aşamanın önem değeri artırılabilir.

Bu tez çalışmasında önerilen PSO destekli ABC algoritması geliştirilerek literatüre karma bir algoritma olarak sunulabilir.

KAYNAKLAR

1. Vandiver, B., Apostolov, A. and Steinhauser, F., "Testing of phasor measurement units", **63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers**, College Station, 1-5 (2010).
2. Gupta, R. Bandyopadhyay, B. And Kulkarni, A.M., "Design of power system stabiliser for single-machine system using robust periodic output feedback controller", **IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, United Kingdom, 211-216 (2003).
3. Gurralla, G. and Sen, I., "A modified Heffron-Phillip's model for the design of power system stabilizers", **International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference**, New Delhi, 1-6 (2008).
4. Larsen, E. V. and Swann D.A., "Applying power system stabilizers part I: general concepts", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-100 (6): 3017-3024 (1981).
5. Larsen, E. V. and Swann D.A., "Applying power system stabilizers part II: performance objectives and tuning concepts", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-100 (6): 3025-3033(1981).
6. Larsen, E. V. and Swann D.A., "Applying power system stabilizers part III: practical considerations", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-100 (6): 3017-3024 (1981).
7. Yang, T.C., "Applying H_{∞} optimisation method to power system stabiliser design part 1: single-machine infinite-bus systems", **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 19(1): 31-35(1997).
8. Chi-Jui, W. And Yuan-Yih, H., "Design of self-tuning PID power system stabilizer for multimachine power systems", **IEEE Transactions on Power Systems**, 3(1): 1059-1064 (1988).
9. Hsu, Y.Y. and Su, C. C., "Application of power system stabilizer on a system with pumped storage plant", **IEEE Transactions on Power Systems**, 3(1): 80-86 (1988).
10. Trudnowski, D. J., Smith, J. R., Short, T. A. And Pierre, D. A., "An application of Prony methods in PSS design for multimachine systems", **IEEE Transactions on Power Systems**, 6(1): 118-126 (1991).
11. Chao-Rong Chen, Yuan-Yin Hsu, "Synchronous machine steady-state stability analysis using an artificial neural network", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 6(1): 12-20 (1991).

12. Zhou, E. Z., Malik, O. P. and Hope, G. S., "Theory and method for selection of power system stabilizer location", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 6(1): 170-176 (1991).
13. Al-Duwaish H. N. and Al-Hamouz, Z. M., "A neural network based adaptive sliding mode controller: Application to a power system stabilizer", *Energy Conversion and Management*, 52 (2): 1533-1538 (2011).
14. Nabiyev, V. V., "Yapay Zeka İnsan-Bilgisayar Etkileşimi 3. Baskı", *SeçkinYayıncılık*, Ankara, 25-26 (2010).
15. Rogers, G., "Power System Oscillations, 1st Ed." *Kluwer Academic*, Boston, 1-6, 10-17, 97-100, 129-131, 131-134, 134-137, 139-140 (2000).
16. Kundur, P., "Power System Stability and Control", *McGraw-Hill Professional*, New York, 54-56, 19, 32, 38-39, 45, 699-700, 25, 40, 128-130, 47, 53, 42-43, 703-706, 315-373, 766-782 (1994).
17. Machowski J., Bialek, J. W. And Bumby J. R., "Power System Dynamics and Stability", *John Wiley and Sons*, New York, 1-3, 43, 183, 141-182, 149, 141-145, 235-240, 321-355, 42-43, 145, 355-363, 291-295 (1997).
18. Padiyar, K. R., "Power System Dynamics Stability and Control", *John Wiley and Sons*, Singapore, 1-4, 4, 9-10, 16-20, 11-13, 50, 51-122, 259-260, 10, 255, 250-254, 123-164, 285-305 (2004).
19. Anderson, P. M. and Fouad, A. A., "Power System Control and Stability, 2nd Edition", *The Iowa State University Press*, Iowa, 3-4, 4-7, 16-20, 24, 13-14, 43, 26-31, 21-24, 13-15, (2003).
20. Bikash, P. and Balarko C., "Robust Control in Power Systems 1st ed." Pai M.A. and Stankovic A.M., *Springer*, New York, 6 (2003).
21. Nalbantoğlu M., "Güç sistemlerinin kararlılığı için senkron generatörün uyarımının kayma kipli kontrolü", Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 13-15, 32-34, 16-19, 34-35 (2010).
22. Yazıcı İ., "Model referans kayan kipli kontrolör tabanlı güç sistem kararlayıcı tasarımı", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 23-24, 43-45, 47-49, 24, 22, 50-53 (2008).
23. Kocaarslan, İ. ve Çam, E., "Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load-frequency control", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 27(8): 542-549(2005).
24. Çam, E. ve Kocaarslan, İ., "A fuzzy gain scheduling PI controller application for an interconnected electrical power system", *Electric Power Systems Research*, 73(3): 267-274(2005).

25. Krause, P. C., Wasynczuk, O. and Sudhoff S. D., "Analysis of Electric Machinery", **IEEE Press**, New York, 211-267, 271-296, 298-324, 325-359 (1995).
26. Kyriakides, E. And Heydt, G.T., "Estimation of synchronous generator parameters using an observer for damper currents and a graphical user interface", **Electric Power Systems Research**, 69 (1): 7-16 (2004).
27. Demirören, A., Zeynelgil, L., "Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması", **Birsan Yayınevi**, İstanbul, 70-75, (2004).
28. Ishimaru, M., Yokoyama, R., Neto O.M., and Lee K.W., "Allocation and design of power system stabilizers for mitigating low-frequency oscillations in the eastern interconnected power system in Japan", **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 26(8): 607-618 (2004).
29. Sauer, P. W. and Pai, M. A., "Power System Dynamics and Stability", **Prentice Hall**, New Jersey, 89-93, 262-270, 104-106, 255-261, 270-277 (1998).
30. Ghahremani, E., Karrari, M. And Malik, O. P., "Synchronous generator third-order model parameter estimation using online experimental data", **IET Generation, Transmission & Distribution**, 2(5): 708-719 (2008).
31. Demello, F. P. and Concordia, C., "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control", **IEEE Trans. Power Apparatus and Systems**, PAS-88(4): 316-329 (1969).
32. M. K. El-Sherbiny, D. M. Mehta, "Dynamic system stability part I - investigation of the effect of different loading and excitation systems", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-92(5): 1538-1546 (1973).
33. IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992), "IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies", **IEEE**, 1-85 (2006).
34. Storn, R. and Price, K., "Differential Evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", **Journal of Global Optimization**, 11 (4): 341-359 (1997).
35. Karaboğa, D., "Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları", **Atlas Yayın Dağıtım**, İstanbul, 169-176 (2004).
36. Aksoy, E., "Diferansiyel evrim algoritması ile anten dizilerinde örüntü şekillendirme", Yüksek lisans tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 33, 34-36, 39-45 (2007).

37. Kennedy, J. And Eberhart, R.C., "Particle swarm optimization", *IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948 (1995).
38. Zhang, J. R., Zhang, J., Lok, T. M. and Lyu, M. R., "A hybrid particle swarm optimization-back-propagation algorithm for feedforward neural network training", *Applied Mathematics and Computation*, 185 (2): 1026-1037 (2007).
39. Alataş, B., "Kaotik haritalı parçacık sürü optimizasyonu algoritmaları geliştirme", Doktora tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 35-36 (2007).
40. Zielinski, K., Peters, D. and Laur, R., "Stopping criteria for single-objective optimization particle swarm optimization", *Proceedings of the Third International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems*, Singapor, (2005).
41. Holland, O. And Melhuish, C., "Stigmergy. Self-Organization and Sorting in Collective Robotics", *Artificial Life*, 5(2): 173-202 (1999).
42. Camazine, S., Deneubourg, J-L., Franks, N. R., Sneyd, J., Theraulaz, G. and Bonabeau, E., "Self-Organization in Biological Systems", *Princeton, NJ: Princeton Univ. Press*, 5-29 (2001).
43. Akay, B., "Nümerik optimizasyon problemlerinde yapay arı kolonisi algoritmasının performans analizi", Doktora tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 81-82 (2009).
44. Karaboga, D., "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, technical report-TR06", *Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department*, 1-10 (2005).
45. Winston, M. L., "The biology of the honey bee", *Harvard University Pres*, 35 (3): 316-318 (1988).
46. V., Tereshko, "Reaction-Diffusion Model of a Honeybee Colony's Foraging Behaviour", *Parallel Problem Solving from Nature VI*, M. Schoenauer, et al, *Springer-Verlag*, Berlin, 2000, 807-816 (2000).
47. Gözde, H., Taplamacıoğlu, M.C., Kocaarslan, İ., ve Şenol, M.A., "Particle swarm optimization based pi-controller design to load-frequency control of a two area reheat thermal power system", *Journal of Thermal Science and Technology*, 30(1): 13-21(2010).
48. Gözde H., Taplamacıoğlu M. C., Kocaarslan İ., Çam E., "İki Bölge Güç Sisteminde Parçacık Sürüsü Algoritması İle Yük-Frekans Kontrolü Optimizasyonu", *ELECO 2008, Elektrik - Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 26-30 (2008).

49. Gözde H., Taplamacıoğlu M. C., Kocaarslan İ., Çam E., Particle Swarm Optimization Based Load Frequency Control In A Single Area Power System, ***TPE-2008 Conference Proceedings Forth International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering***, Pitesti , Romanya, 106-110, 4 – 6(2008).

EKLER

EK-1. Güç Sistem Parametrelerinin Hesaplanması

```

global sim_time;

sim_time=10;
global sample_time;
sample_time=0.05;
%-----
KA=50;
TA=0.02;
%-----

for i=1:1:6
    if(i==6)
        P(1,i)=1;
    else
        P(1,i)=-0.1+i*0.2;
    end
end
for i=1:1:8
    if (i==1)
        Q(1,i)=-0.1;
    elseif (i<6)
        Q(1,i)=0.02*+i-0.01;
    else
        Q(1,i)=0.1*i-0.5;
    end
end
j=1;cc=1;
Vt0=1.0;
xe=0.2;
    for i=1:1:length(P)
        for ii=1:1:length(Q)

R=0;
X=xe;
G=0;
B=0;
PE=P(1,i);
QE=Q(1,ii);

VT=Vt0;
H=5;
xd=1.6;
xdussu=0.32;
xq=1.55;
Tdussu=6;
XD=xd;

```

EK-1. (Devam) Güç Sistem Parametrelerinin Hesaplanması

```

XDUSSU=xdussu;
XQ=xq;
TDUSSU=Tdussu;
C1=1+R*X-G-X*B;
C2=R*B+X*X;
R1=R-C2*XDUSSU;
R2=R-C2*XQ;
X1=X+C1*XQ;
X2=X+C1*XDUSSU;
ZEKARESi=R1*R2+X1*X2;
YD=(C1*X1-C2*R2)/ZEKARESi;
YQ=(C1*R1+C2*X2)/ZEKARESi;
VD=(PE*VT)/ sqrt (PE^2+(QE+VT^2/XQ)^2);
Vd0=VD;
VQ= sqrt(VT^2-VD^2);
Vq0=VQ;
IQ=VD/XQ;
Iq0=IQ;
ID=(PE-IQ*VQ)/VD;
Id0=ID;
EQUSSU=VQ+XDUSSU*ID;
Eq0=EQUSSU;
aci0=atand( (C1*VD-C2*VQ-R*ID+X*IQ) / (C2*VD+C1*VQ-X*ID-R*IQ) );
VSONSUZD=(C1*VD-C2*VQ-R*ID+X*IQ);
VSONSUZQ=(C2*VD+C1*VQ-X*ID-R*IQ);
VSONSUZ=sqrt(VSONSUZD^2+ VSONSUZQ^2);
EQUSSU=VQ+XDUSSU*ID;
Equssu=EQUSSU;
FD=(X1*sind(aci0)-R2*cosd(aci0))*VSONSUZ/ZEKARESi;
FQ=(R1*sind(aci0)+X2*cosd(aci0))*VSONSUZ/ZEKARESi;
AA=[0 ;IQ];BB=[FD FQ;YD YQ]; CC=[(XQ-XDUSSU)*IQ;EQUSSU+(XQ-
XDUSSU)*ID ];
DD=AA+BB*CC;
EE=[0 ; VQ/VT];
FF=[-XDUSSU*VQ/VT ; XQ*VD/VT];
GG=EE+BB*FF;

K11K(1,j)=DD(1,1);
K22K(1,j)=DD(2,1);
K33K(1,j)=1/(1+ (XD-XDUSSU)*YD );
K44K(1,j)=(XD-XDUSSU)*FD;
K55K(1,j)=GG(1,1);
K66K(1,j)=GG(2,1);

```

EK-1. (Devam) Güç Sistem Parametrelerinin Hesaplanması

```

K1=K11K(1,j);
K2=K22K(1,j);
K3=K33K(1,j);
K4=K44K(1,j);
K5=K55K(1,j);
K6=K66K(1,j);
Degiskenler(j,:)= [PE QE Vt0 xe];

```

```

j=j+1;

```

```

    end
end

```

```

Kdegerleri=[K11K;K22K;K33K;K44K;K55K;K66K];

```

```

Ksabitleri=Kdegerleri';
Degiskenler1=Degiskenler;
AAA=[Ksabitleri Degiskenler1];
K11_=K11K';
K22_=K22K';
K33_=K33K';
K44_=K44K';
K55_=K55K';
K66_=K66K';
ii=1;
for i=1:length(AAA)
    if ((AAA(i,1)>=0) && (AAA(i,2)>=0) && (AAA(i,3)>=0) && (AAA(i,4)>=0)
    && (AAA(i,6)>=0))

```

```

        AAA1(ii,:)=AAA(i,:);

```

```

%*****
*****

```

```

    K11(ii,:)=K11_(i,:);
    K22(ii,:)=K22_(i,:);
    K33(ii,:)=K33_(i,:);
    K44(ii,:)=K44_(i,:);
    K55(ii,:)=K55_(i,:);
    K66(ii,:)=K66_(i,:);

```

```

%*****
*****

```

EK-1. (Devam) Güç Sistem Parametrelerinin Hesaplanması

```
        ii=ii+1;
    else
        ii=ii;

    end
end

%*****
%*****
K11=K11';
K22=K22';
K33=K44';
K44=K44';
K55=K55';
K66=K66';
K=[K11;K22;K33;K44;K55;K66];
```

EK-2. Diferansiyel Evrim Algoritması MATLAB Kodu

```

clc;

clear all;
close all;
tzaman=cputime;

phesabi

%*****
*****
D = 4; % parametre sayısı (Kpss,T1,T2,Tw)
NP = 2*D; % vektör sayısı
max_iteration = 20; % maksimum iterasyon sayısı
F = 0.7; % ölçekleme faktörü
CR = 0.8;

x_min = [0.1 0.2 0.02 1];
x_max = [50 1.5 0.15 30];

for it = 1:NP,
    for jt = 1:D
        population(it,jt) = x_min(1,jt)+(x_max(1,jt)-x_min(1,jt))*rand(1,1);
    end
end
population_intial=population;

OF_IAE_PSS_121

iteration_counter = 1;
while iteration_counter <= max_iteration

    for it = 1:NP
        r1=1;
        r2=1;
        r3=1;
        while(r1==it) r1=round(1+(NP-1)*rand(1,1)); end
        while(r2==r1 || r2==it) r2=round(1+(NP-1)*rand(1,1)); end
        while(r3==r2 || r3==r1 || r3==it) r3=round(1+(NP-1)*rand(1,1)); end
        jrand = 1+(D-1)*rand(1,1);
        for jt = 1:D
            cross_prob = rand(1,1);
            if (cross_prob < CR) || (jt == round(jrand))
                trial(jt) = population(r3,jt)+F*(population(r1,jt)-population(r2,jt));
            else
                trial(jt) = population(it,jt);
            end
        end
    end
    iteration_counter = iteration_counter + 1;
end
tzaman=cputime-tzaman;

```

EK-2. (Devam) Diferansiyel Evrim Algoritması MATLAB Kodu

```

        end
        if trial(jt) > x_max(1,jt)
            trial(jt) = (trial(jt)+x_min(1,jt))/2;
        end
        if trial(jt) < x_min(1,jt),
            trial(jt) = (trial(jt)+x_max(1,jt))/2;
        end
    end
end

K8=trial(1);
T1=trial(2);
T2=trial(3);
Tw=trial(4);
OF_IAE_PSS_121_1
    cost_trial=temp;
    if cost_trial <= cost(it),
        population(it,:) = trial;
        cost(it) = cost_trial;

    end
end
iteration_counter = iteration_counter+1;
iteration_counter
cost(find(cost==min(cost)));
end

best_cost=find(cost==min(cost));

best_parameters=population(best_cost,:);
Kpss=best_parameters(1);
T1=best_parameters(2);
T2=best_parameters(3);
Tw=best_parameters(4);
tzaman=cputime-tzaman;
save IAE_DEA

```

EK-3. Parçacık Sürüsü Algoritması MATLAB Kodu

```

%PSO >> function for the PSO ALGORITHM

% USAGES: 1.) [fxmin, xmin, Swarm, history] = PSO(psoOptions);
%         2.) [fxmin, xmin, Swarm, history] = PSO;
%         3.) fxmin = PSO(psoOptions);
%         3.) PSO
%         etc.
%
% Arguments : psoOptions--> A Matlab stucture containing all PSO related
options. (see also: get_psoOptions)
% Return Values : [fxmin, xmin, Swarm, history]
%               | | | | _The history of the algorithm. Depicts how the function
value of GBest changes over the run.
%               | | | _The final Swarm. (A matrix containing co-ordinates of all
particles)
%               | | _The co-ordinates of Best (ever) particle found during the PSO's
run.
%               | _The objective value of Best (^xmin) particle.
%
function [fxmin, xmin, Swarm, history] = PSO(psoOptions)

%Globals
global psoFlags;
global psoVars;
global psoSPParameters;
global notifications;
GM = 0; % Global minimum (used in the stopping criterion)
ErrGoal = 1e-10; % Desired accuracy
%

%Initializations
if nargin == 0
    psoOptions = get_psoOptions;
end
%For Displaying
if psoOptions.Flags.ShowViz
    global vizAxes; %Use the specified axes if using GUI or create a new global if
called from command window
    vizAxes = plot(0,0, '.');
    axis([-1000 1000 -1000 1000 -1000 1000]); %Initially set to a cube of this size

    axis square;
    grid off;

```


EK-3. (Devam) Parçacık Sürüsü Algoritması MATLAB Kodu

```

set(vizAxes,'EraseMode','xor','MarkerSize',15); %Set it to show particles.
    pause(1);
end

%End Display initialization

% Initializing variables
success = 0; % Success Flag

iter = 0; % Iterations' counter
fevals = 0; % Function evaluations' counter

% Using params---
% Determine the value of weight change
w_start = psoOptions.SParams.w_start; %Initial inertia weight's value
w_end = psoOptions.SParams.w_end; %Final inertia weight
w_varyfor = floor(psoOptions.SParams.w_varyfor*psoOptions.Vars.Iterations);
%Weight change step. Defines total number of iterations for which weight is
changed.
w_now = w_start;
inertdec = (w_start-w_end)/w_varyfor; %Inertia weight's change per iteration

% Initialize Swarm and Velocity
SwarmSize = psoOptions.Vars.SwarmSize;
%Swarm = rand(SwarmSize, psoOptions.Vars.Dim)*(psoOptions.Obj.ub-
psoOptions.Obj.lb) + psoOptions.Obj.lb;
swarm11=rand(SwarmSize, psoOptions.Vars.Dim);
rangeublb=(psoOptions.Obj.ub-psoOptions.Obj.lb);
k_pss=rangeublb(1,1).*swarm11(:,1)+psoOptions.Obj.lb(1,1);
t_1=rangeublb(1,2).*swarm11(:,2)+psoOptions.Obj.lb(1,2);
t_2=rangeublb(1,3).*swarm11(:,3)+psoOptions.Obj.lb(1,3);
t_w=rangeublb(1,4).*swarm11(:,4)+psoOptions.Obj.lb(1,4);
Swarm=[k_pss t_1 t_2 t_w];

VStep = rand(SwarmSize, psoOptions.Vars.Dim);
%if t_2==
f2eval = psoOptions.Obj.f2eval; %The objective function to optimize.
%Find initial function values.

fSwarm = feval(f2eval, Swarm);
fevals = fevals + SwarmSize;
% Initializing the Best positions matrix and

% the corresponding function values
PBest = Swarm;

```


EK-3. (Devam) Parçacık Sürüsü Algoritması MATLAB Kodu

```

% Set GBest
A = repmat(Swarm(g,:), SwarmSize, 1); %A = GBest. repmat(X, m, n) repeats the
matrix X in m rows by n columns.
B = A; %B will be nBest (best neighbor) matrix

% use neighborhood model
% circular neighborhood is used
if psoOptions.Flags.Neighbor
    for i = 1:SwarmSize
        [fNBest(i), nb(i)] = min(fSwarm( find(nhood(i)) ));
        B(i, :) = Swarm(nb(i), :);
    end
end

% Generate Random Numbers
R1 = rand(SwarmSize, psoOptions.Vars.Dim);
R2 = rand(SwarmSize, psoOptions.Vars.Dim);

% Calculate Velocity
if ~psoOptions.Flags.Neighbor %Normal

    VStep = w_now*VStep + psoOptions.SParams.c1*R1.*(PBest-Swarm) +
psoOptions.SParams.c2*R2.*(A-Swarm);
    else %With neighborhood
        R3 = rand(SwarmSize, psoOptions.Vars.Dim); %random nos for neighborhood
        VStep = w_now*VStep + psoOptions.SParams.c1*R1.*(PBest-Swarm) +
psoOptions.SParams.c2*R2.*(A-Swarm) + psoOptions.SParams.c3*R3.*(B-Swarm);
    end
    % Apply Vmax Operator for v > Vmax

%   changeRows = VStep > psoOptions.SParams.Vmax;
%   VStep(find(changeRows)) = psoOptions.SParams.Vmax;

VStep1 = VStep(:,1)
VStep2 = VStep(:,2)
VStep3 = VStep(:,3)
VStep4 = VStep(:,4)

changeRows1 = VStep(:,1) < psoOptions.SParams.Vmax(1,1)
changeRows2 = VStep(:,2) < psoOptions.SParams.Vmax(1,2)
changeRows3 = VStep(:,3) < psoOptions.SParams.Vmax(1,3)
changeRows4 = VStep(:,4) < psoOptions.SParams.Vmax(1,4)

VStep1(find(changeRows1)) = psoOptions.SParams.Vmax(1,1);

```

EK-3. (Devam) Parçacık Sürüsü Algoritması MATLAB Kodu

```

VStep2(find(changeRows2)) = psoOptions.SParams.Vmax(1,2);
VStep3(find(changeRows3)) = psoOptions.SParams.Vmax(1,3);
VStep4(find(changeRows4)) = psoOptions.SParams.Vmax(1,4);

% Apply Vmax Operator for v < -Vmax

%   changeRows = VStep < -psoOptions.SParams.Vmax;
%   VStep(find(changeRows)) = -psoOptions.SParams.Vmax;

VStep1 = VStep(:,1)
VStep2 = VStep(:,2)
VStep3 = VStep(:,3)
VStep4 = VStep(:,4)

changeRows1 = VStep(:,1) < -psoOptions.SParams.Vmax(1,1)
changeRows2 = VStep(:,2) < -psoOptions.SParams.Vmax(1,2)
changeRows3 = VStep(:,3) < -psoOptions.SParams.Vmax(1,3)
changeRows4 = VStep(:,4) < -psoOptions.SParams.Vmax(1,4)

VStep1(find(changeRows1)) = -psoOptions.SParams.Vmax(1,1);
VStep2(find(changeRows2)) = -psoOptions.SParams.Vmax(1,2);
VStep3(find(changeRows3)) = -psoOptions.SParams.Vmax(1,3);
VStep4(find(changeRows4)) = -psoOptions.SParams.Vmax(1,4);
% ::UPDATE POSITIONS OF PARTICLES::

%Swarm = Swarm + psoOptions.SParams.Chi * VStep; % Evaluate new Swarm
%Swarm=abs(Swarm) % Bizim değerlerimiz 0 dan küçük olmamalı
Swarm1 = Swarm(:,1) + psoOptions.SParams.Chi * VStep(:,1);
Swarm2 = Swarm(:,2) + psoOptions.SParams.Chi * VStep(:,2);
Swarm3 = Swarm(:,3) + psoOptions.SParams.Chi * VStep(:,3);
Swarm4 = Swarm(:,4) + psoOptions.SParams.Chi * VStep(:,4);

Swarm=[Swarm1 Swarm2 Swarm3 Swarm4];

fSwarm = feval(f2eval, Swarm);
fevals = fevals + SwarmSize;

% Updating the best position for each particle
changeRows = fSwarm < fPBest;
fPBest(find(changeRows)) = fSwarm(find(changeRows));
PBest(find(changeRows), :) = Swarm(find(changeRows), :);

lastbpart = PBest(g, :);
% Updating index g

```

EK-3. (Devam) Parçacık Sürüsü Algoritması MATLAB Kodu

```

[fGBest, g] = min(fPBest);

%Update Best. Only if fitness has improved.
if fGBest < lastbpf
    [fBest, b] = min(fPBest);
    Best = PBest(b,:);
end

%%OUTPUT%%
if psoOptions.Save.Interval & (rem(iter, psoOptions.Save.Interval) == 0)
    history((size(history,1)+1), :) = [iter, fBest];
end

if psoOptions.Disp.Interval & (rem(iter, psoOptions.Disp.Interval) == 0)
    disp(sprintf('%4d\t\t%.5g\t\t%.5d', iter, fGBest, fevals));
end
if psoOptions.Flags.ShowViz
    [fworst, worst] = max(fGBest);
    DrawSwarm(Swarm, SwarmSize, iter, psoOptions.Vars.Dim, Swarm(g,:),
vizAxes);
end

%%TERMINATION%%
if abs(fGBest-psoOptions.Obj.GM) <= psoOptions.Vars.ErrGoal    %GBest
    success = 1;
elseif abs(fBest-psoOptions.Obj.GM)<=psoOptions.Vars.ErrGoal    %Best
    success = 1
else
    lastbpf = fGBest; %To be used to find Best
end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%                                %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[fxmin, b] = min(fPBest);
xmin = PBest(b, :);

history = history(:,1);
%Comment below line to Return Swarm. Uncomment to return previous best
positions.
% Swarm = PBest; %Return PBest

```

EK-4. Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu

```

clear all

close all
clc
tzaman=cputime;
run phesabi

% Set ABC Control Parameters
ABCOpts = struct( 'ColonySize', 4, ... % Number of Employed Bees+ Number of
Onlooker Bees
    'MaxCycles', 5,... % Maximum cycle number in order to terminate the algorithm
    'ErrGoal', 1e-20, ... % Error goal in order to terminate the algorithm (not used
in the code in current version)
    'Dim', 4, ... % Number of parameters of the objective function
    'Limit', 2, ... % Control paramter in order to abandone the food source
    'lb', [0.1 0.2 0.02 1], ... % Lower bound of the parameters to be optimized
    'ub', [50 1.5 0.15 50], ... %Upper bound of the parameters to be optimized
    'ObjFun', 'ABC_IAE', ... %Write the name of the objective function you want to
minimize
    'RunTime',1); % Number of the runs

GlobalMins=zeros(ABCOpts.RunTime,ABCOpts.MaxCycles);
for r=1:ABCOpts.RunTime
% Initialise population
Range = repmat((ABCOpts.ub-ABCOpts.lb),[ABCOpts.ColonySize
ABCOpts.Dim/4]); % Bölü 4 yapınca 10*4 lük yaptı diğer türlü olmuyor
Lower = repmat(ABCOpts.lb, [ABCOpts.ColonySize ABCOpts.Dim/4]); % Bölü 4
yapınca 10*4 lük yaptı diğer türlü olmuyor
Colony = rand(ABCOpts.ColonySize,ABCOpts.Dim) .* Range + Lower;

Employed=Colony(1:(ABCOpts.ColonySize/2),:);

%evaluate and calculate fitness
ObjEmp=feval(ABCOpts.ObjFun,Employed);
FitEmp=calculateFitness(ObjEmp);

%set initial values of Bas
Bas=zeros(1,(ABCOpts.ColonySize/2));

GlobalMin=ObjEmp(find(ObjEmp==min(ObjEmp),end));

GlobalParams=Employed(find(ObjEmp==min(ObjEmp),end),:);

```

EK-4. (Devam) Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu

```

Cycle=1;
while ((Cycle <= ABCOpts.MaxCycles)),

    %% Employed phase
    Employed2=Employed;
    for i=1:ABCOpts.ColonySize/2

        Param2Change=fix(rand*ABCOpts.Dim)+1;
        neighbour=fix(rand*(ABCOpts.ColonySize/2))+1;
        while(neighbour==i)
            neighbour=fix(rand*(ABCOpts.ColonySize/2))+1;
        end;

        Employed2(i,Param2Change)=Employed(i,Param2Change)+(Employed(i,Param2Ch
        ange)-Employed(neighbour,Param2Change))*(rand-0.5)*2;
        if (Employed2(i,Param2Change)<ABCOpts.lb(Param2Change))
            Employed2(i,Param2Change)=ABCOpts.lb(Param2Change);
        end;
        if (Employed2(i,Param2Change)>ABCOpts.ub((Param2Change)))
            Employed2(i,Param2Change)=ABCOpts.ub(Param2Change);
        end;

    end;

    %-----
    ObjEmp2=feval(ABCOpts.ObjFun,Employed2);
    FitEmp2=calculateFitness(ObjEmp2);
    %-----
    [Employed ObjEmp FitEmp
    Bas]=GreedySelection1(Employed,Employed2,ObjEmp,ObjEmp2,FitEmp,FitEmp2,
    Bas,ABCOpts);

    %Normalize
    NormFit=FitEmp/sum(FitEmp);

    %%%% Onlooker phase
    Employed2=Employed;
    i=1;

    t=0;
    while(t<ABCOpts.ColonySize/2)

        t=t+1;
        if(rand<NormFit(i))

```

EK-4. (Devam) Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu

```

Param2Change=fix(rand*ABCOpts.Dim)+1;
neighbour=fix(rand*(ABCOpts.ColonySize/2))+1;
while(neighbour==i)
    neighbour=fix(rand*(ABCOpts.ColonySize/2))+1;
end;

Employed2(i,:)=Employed(i,:);

Employed2(i,Param2Change)=Employed(i,Param2Change)+(Employed(i,Param2Change)-Employed(neighbour,Param2Change))*(rand-0.5)*2;
if (Employed2(i,Param2Change)<ABCOpts.lb(Param2Change))
    Employed2(i,Param2Change)=ABCOpts.lb(Param2Change);
end;

if (Employed2(i,Param2Change)>ABCOpts.ub(Param2Change))
    Employed2(i,Param2Change)=ABCOpts.ub(Param2Change);
end;

%-----
ObjEmp2=feval(ABCOpts.ObjFun,Employed2);
FitEmp2=calculateFitness(ObjEmp2);
%-----

[Employed ObjEmp FitEmp
Bas]=GreedySelection1(Employed,Employed2,ObjEmp,ObjEmp2,FitEmp,FitEmp2,
Bas,ABCOpts,i);

end;

i=i+1;
if (i==(ABCOpts.ColonySize/2)+1)
    i=1;
end;
end;

%%%Memorize Best
CycleBestIndex=find(FitEmp==max(FitEmp));
CycleBestIndex=CycleBestIndex(end);
CycleBestParams=Employed(CycleBestIndex,:);
CycleMin=ObjEmp(CycleBestIndex);

if CycleMin<GlobalMin

```


EK-4. (Devam) Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu

```

        GlobalMin=CycleMin;
        GlobalParams=CycleBestParams;
    end
    GlobalMins(1,Cycle)=GlobalMin;
    %% Scout phase
    ind=find(Bas==max(Bas));
    ind=ind(end);
    if (Bas(ind)>ABCOpts.Limit)
        Bas(ind)=0;
        Employed(ind,:)=random('Uniform',ABCOpts.lb,ABCOpts.ub);
    end;
    %-----
    ObjEmp=feval(ABCOpts.ObjFun,Employed);
    FitEmp=calculateFitness(ObjEmp);
    %-----
    fprintf('Cycle=%d ObjVal=%g\n',Cycle,GlobalMin);

    Cycle=Cycle+1

end % End of ABC
end % for end

Kpss=GlobalParams(1,1);
T1=GlobalParams(1,2);
T2=GlobalParams(1,3);
Tw=GlobalParams(1,4);
tzaman=cputime-tzaman;
save IAE_ABC
%*****
*****

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EKE, İbrahim
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 16.05.1976 Kırıkkale
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 582 33 14
 e-mail : ibrahimeke@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Kırıkkale Ün. Elektrik-Elektronik Müh.	2004
Lisans	Fırat Ün. Elektrik-Elektronik Müh.	2000
Lise	Kırıkkale Anadolu Lisesi	1994

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-2011	Gazi Üniversitesi	Arş. Gör.
2000-2004	Kırıkkale Üniversitesi	Arş. Gör.

Yabancı Dil

İngilizce