T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR TÜRBİNİ İÇEREN BİR GÜÇ SİSTEMİNİN GEÇİCİ HAL KARARLILIĞININ GÜÇ SİSTEMİ DENGELEYİCİSİ KULLANILARAK KARGA ARAMA ALGORİTMASI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

HAMDULLAH YOKUŞ

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. ALİ ÖZTÜRK

DÜZCE, 2022

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR TÜRBİNİ İÇEREN BİR GÜÇ SİSTEMİNİN GEÇİCİ HAL KARARLILIĞININ GÜÇ SİSTEMİ DENGELEYİCİSİ KULLANILARAK KARGA ARAMA ALGORİTMASI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Hamdullah YOKUŞ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Salih TOSUN
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Mert YILDIRIM
Düzce Üniversitesi _____

Doç. Dr. Faruk YALÇIN
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Murat FİDAN
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi _____

Tez Savunma Tarihi: 21/04/2022

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

21 Nisan 2022

Hamdullah YOKUŞ

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen TİK üyesi hocalarımız Doç. Dr. Salih TOSUN ve Doç. Dr. Mert YILDIRIM'a ve diğer jüri üyesi hocalarımıza şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca fedakârlık gösteren ve desteklerini esirgemeyen sevgili eşim Esma YOKUŞ'a ve çocuklarım Asude ve Furkan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Üzerimde çok emeği olan sevgili annem Düriye YOKUŞ'a ve babam Remezan YOKUŞ'a ithaf olunur.

21 Nisan 2022 **Hamdullah YOKUŞ**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ vii

ÇİZELGE LİSTESİ ix

KISALTMALAR x

SİMGELER xi

ÖZET xiii

ABSTRACT xiv

EXTENDED ABSTRACT xv

1. GİRİŞ 1

2. RÜZGÂR ENERJİSİ 10

2.1. RÜZGÂR GÜCÜNÜN TEMEL DENKLEMİ: KİNETİK ENERJİ AKISI VE RÜZGÂR ENERJİSİ YOĞUNLUĞU 11
2.2. BIÇAK SÜPÜRME ALANI 14
2.3. RÜZGÂR TÜRBİNİ ÇEŞİTLERİ 15
2.3.1. Sabit Hızlı Rüzgâr Türbini 15
2.3.2. Değişken Rotor Direncine Sahip Değişken Hızlı Rüzgâr Türbini 15
2.3.3. Değişken Hızlı Çift Beslemeli Endüksiyon Generatörlü Rüzgâr Türbini 16
2.3.4. Tam Dönüştürücülü Değişken Hızlı Rüzgâr Türbini 17
2.4. RÜZGÂR TÜRBİNİ GENERATÖRLERİNİN GÜÇ SİSTEMLERİNİN PERFORMANSINA ETKİSİ 18

3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK 21

3.1. GÜÇ SİSTEMİ KARARLILIĞININ SINIFLANDIRILMASI 23
3.1.1. Rotor Açısı Kararlılığı 24
3.1.2. Küçük Sinyal Kararlılığı 25
3.1.3. Geçici Hal Kararlılığı 26
3.2. GERİLİM KARARLILIĞI 26
3.2.1. Küçük Bozulma Gerilim Kararlılığı 29
3.2.2. Büyük Bozulma Gerilim Kararlılığı 29
3.3. FREKANS KARARLILIĞI 29
3.4. RÜZGAR TÜRBİNİ ÇEŞİTLERİNİN GEÇİCİ HAL KARARLILIKLARININ ANALİZİ 31
3.4.1. Sabit Hızlı Rüzgâr Türbini 31
3.4.2. Değişken Rotor Direncine Sahip Değişken Hızlı Rüzgâr Türbini 34
3.4.3. Değişken Hızlı Çift Beslemeli Endüksiyon Generatörlü Rüzgâr Türbini 36
3.4.4. Tam Dönüştürücülü Değişken Hızlı Rüzgâr Türbini 38
3.5. SALINIM DENKLEMLERİ 38
3.5.1. Euler Metoduyla Salınım Denklemlerinin Analizi 42

4. GÜÇ SİSTEMİ DENGELEYİCİSİ 47

4.1. GÜÇ SİSTEMİ DENGELEYİCİSİNİN TEMEL KAVRAMLARI 48
4.2. GÜÇ SİSTEMİ KARARLILIK CİHAZLARINA GENEL BAKIŞ 49

5. META-SEZGİSEL ALGORİTMALAR 54

5.1. GENETİK ALGORİTMA-GENETİC ALGORİTHM (GA) 55
5.2. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU-PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO) 57
5.3. KARINCA KOLONİSİ OPTİMİZASYONU-ANT COLONY OPTIMIZATION (KKO) 62
5.4. YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI-ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITM (YAKA) 66
5.5. KARGA ARAMA ALGORİTMASI-CROW SEARCH ALGORITHM (KAA) 68
5.6. PROBLEMİN TANITIMI 69
5.7. PSS'İN YAPISI 70
5.7.1. Kazanç Bloğu 71
5.7.2. Temizleme Filtresi 71
5.7.3. Faz Kompanzasyonu 71
5.8. PROBLEMİN FORMÜLASYONU 72
5.8.1. Amaç Fonksiyonu ve PSS Ayarı 72
5.9. PROBLEMİN KKO, YAKA, GA VE PSO İLE ÇÖZÜMÜ 73

6. KARGA ARAMA ALGORİTMASIYLA TEK MAKİNALI SONSUZ BARALI BİR GÜÇ SİSTEMİNDE GÜÇ SİSTEMİ DENGELEYİCİSİNİN PARAMETRELERİNİN BULUNMASI 78

6.1. GÜÇ SİSTEMİ MODELİ 80
6.2. KAA İLE PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ 82
6.2.1. Optimizasyon için KAA'nın Uygulanması 86
6.3. KAA İLE PROBLEMİN ÇÖZÜMÜNDE ELDE EDİLEN BULGULAR 89

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 94

8. KAYNAKLAR 97

ÖZGEÇMİŞ 107

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. U hızıyla A alanından geçen rüzgârın hava akımı şeması [60]. 12
Şekil 2.2. Rüzgâr türbini kanatlarının süpürme alanı. 14
Şekil 2.3. Sabit hızlı rüzgâr türbininin şematik gösterimi. 15
Şekil 2.4. Değişken rotor direncine sahip değişken hızlı rüzgâr türbini şematik gösterimi. 16
Şekil 2.5. Değişken hızlı çift beslemeli endüksiyon generatörlü rüzgâr türbini şematik gösterimi. 17
Şekil 2.6. Tam dönüştürücülü değişken hızlı rüzgâr türbini şematik gösterimi. 18
Şekil 3.1. Güç Sistemi Kararlılığının Sınıflandırılması. 24
Şekil 3.2. Rüzgâr türbini içeren örnek bir güç sistemi. 31
Şekil 3.3. Rotor açısının zamana göre değişimi. 32
Şekil 3.4. Rotor açısının zamana göre değişimi. 33
Şekil 3.5. Generatör hızının zamana göre değişimi. 33
Şekil 3.6. Rotor açısının zamana göre değişimi. 34
Şekil 3.7. Rotor açısının zamana göre değişimi. 35
Şekil 3.8. Generatör hızının zamana göre değişimi. 35
Şekil 3.9. Rotor açısının zamana göre değişimi. 36
Şekil 3.10. Rotor açısının zamana göre değişimi. 37
Şekil 3.11. Generatör hızının zamana göre değişimi. 37
Şekil 3.12. Salınım eğrisi hata 0,3 saniyede temizlendiğinde. 45
Şekil 3.13. Salınım eğrisi hata 0,4 saniyede temizlendiğinde. 45
Şekil 3.14. Salınım eğrisi hata 0,5 saniyede temizlendiğinde. 46
Şekil 5.1. PSO algoritması akış şeması [124]. 61
Şekil 5.2. İki boyutlu bir problemle ilgili olarak iki bileşenden oluşan bir t yinelemesinde hız vektörü[124]. 62
Şekil 5.3. İki boyutlu bir problemle ilgili olarak iki bileşenden oluşan bir iterasyonda güncellenen konum vektörü [124]. 62
Şekil 5.4. KAA'nın sözde kodu 69
Şekil 5.5. Yaygın olarak kullanılan PSS'in yapısı[135][136]. 71
Şekil 5.6. PSS'siz, konvansiyonel ve KKO tabanlı PSS için generatörün hız sapması (1. durum) [130]. 74
Şekil 5.7. PSS'siz, konvansiyonel ve KKO tabanlı PSS için generatörün hız sapması (2. durum) [130]. 74
Şekil 5.8. PSS'siz, konvansiyonel ve KKO tabanlı PSS için generatörün hız sapması (3. durum) [130]. 75
Şekil 5.9. Sistemin hat toprak arızası durumunda gerilim büyüklüğünün PSS'siz, GA tabanlı PSS'li ve YAKA tabanlı PSS'li değişimi [133]. 76
Şekil 5.10. Sistemin hat toprak arızası durumunda generatör hızının PSS'siz, GA tabanlı PSS'li ve YAKA tabanlı PSS'li değişimi [133]. 76
Şekil 5.11. Sistemin üç faz hatası durumunda generatör hızının PSS'siz, GA tabanlı PSS'li ve YAKA tabanlı PSS'li değişimi [133]. 77
Şekil 6.1. KAA'da 1. durum arama mekanizması 80
Şekil 6.2. Tek Makinalı Sonsuz Baralı (SMIB) Sistem Modeli. 81
Şekil 6.3. PSS tarafından uyarılan hız düzenleyicili ve uyarma sistemli SMIB'nin simulink modeli. 85
Şekil 6.4. KAA'nın akış şeması. 88

Şekil 6.5. PSS'li ve PSS'siz hız sapması (Δω). 91
Şekil 6.6. KAA, PSO ve GA tabanlı PSS için generatörün hız sapması. 91
Şekil 6.7. KAA, PSO ve GA tabanlı PSS için generatörün alan akımı. 92
Şekil 6.8. KAA, PSO ve GA tabanlı PSS için Generatörün aktif gücü. 92
Şekil 6.9. KAA, PSO ve GA tabanlı PSS için mekanik güç..... 93

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 6.1. Optimizasyon problemini çözmek için KAA, PSO ve GA parametreleri konfigürasyonu. 84
Çizelge 6.2. Optimize edilmiş PSS parametre değerleri. 85
Çizelge 6.3. KAA, PSO ve GA için değerlendirme süresi. 86

KISALTMALAR

AA	Alternatif akım
AP	Farkındalık olasılığı
AVR	Otomatik voltaj regülatörü
BT	Bakteri toplayıcılık
BTO	Biyocoğrafya tabanlı optimizasyon
ÇBAG	Çift beslemeli asenkron generatör
DA	Doğru akım
EA	Evrimsel algoritmalar
GA	Genetik Algoritma
KAA	Karga arama algoritması
KKO	Karınca kolonisi optimizasyonu
PSO	Parçacık sürü optimizasyonu
PSS	Güç sistemi dengeleyicisi
RGY	Rüzgâr gücü yoğunluğu
SA	Simüle edilmiş tavlama
SCIG	Sincap kafesli asenkron generatör
SMIB	Tek makina sonsuz bara
TA	Tabu arama
WBSI	En zayıf veri yolu duyarlılığı endeksi
YAKA	Yapay arı kolonisi algoritması
YSA	Yapay sinir ağları
YVDA	Yüksek voltaj doğru akım
YZ	Yapay zekâ

SİMGELER

ω_s	Elektriksel açısal hız
C_p	Güç katsayısı
E_{fd}	Alan voltajı
E'_q	Generatör dahili
K_A	Denetleyicinin statik kazancı
K_p	PSS'ye eklenen sönümleme seviyesi
$L^{i,x}$	Karga i'nin konum vektörü
$P_{Rüzgar}$	Rüzgâr kaynağının toplam gücü
P_T	Türbin tarafından çekilen güç
P_m	Mekaniksel güç
$R^{i,x}$	Karga i'nin saklanma konum vektörü
T_1, T_2, T_3, T_4	Zaman sabitleri
T'_{d0}	d ekseni zaman sabiti
T_e	Elektriksel tork
T_m	Mekaniksel tork
T_w	1 ile 20 arasında seçilen zaman sabiti
V_S	Ek voltaj
V_T	Terminal barası voltajı
V_i^t	Hız vektörü
V_{ref}	Referans voltajı
X_d	d ekseni reaktans
X_i^t	Konum vektörü
X_q	q ekseni reaktansı
c_1	Bireysel biliş parametresi
c_2	Sosyal öğrenme parametresi
f_0	Frekans
$gbest_j$	En iyi nokta
i_d	d ekseni akımı
i_q	q ekseni akımı
$pbest_{ij}$	En iyi konum
p_{ij}^k	Rastgele orantı
r_1, r_2, r_j	[0,1] aralığında rastgele bir değer
$x_{max,j}$	j boyutunun üst sınırı
x_{max}, s_{max}, i_{max}	Maksimum iteresyasyon sayısı
$x_{min,j}$	j boyutunun alt sınırı
δ_m	Mekaniksel güç açısı
η_{ij}	Buluşsal değişken
θ_m	Açısal yer değiştirme
τ_{ij}	Feromon modeli
φ_{ij}	[-1,1] aralığında düzgün dağılmış gerçek bir rastgele sayı
ω_m	Rotorun açısal hızı
ω_{sm}	Mekaniksel açısal hız
d	Boyut
f(.)	Uygunluk fonksiyonu değerleri
H	Atalet katsayısı

H	Hidrojen
He	Helyum
mp	Mutasyon yüzdesi
mu	Mutasyon oranı
N	Karga sayısı
P	Parçacık sayısı
pc	Çaprazlama yüzdesi
PQ	Aktif güç-Reaktif güç
PV	Aktif güç-Volt
r	Rüzgâr dişlisi göbeğinin yarı çapı
Rr	Rotor direnci
Rs	Sargı direnci
s	Saniye
t	İterasyon sayısı
V	Sonsuz bara voltajı
V_T	Hat ile transformatöre bağlı baranın terminal gerilimi
w	Atalet ağırlığı sabiti (PSO)
x1, x2	Konum
X_L	İletim hattı serisi endüktif reaktansı
Xm	Mıknatıslanma Reaktansı
Xr	Rotor reaktansı
Xs	Senkron reaktans
X_T	Transformatör sargıları kaçak endüktif reaktansı
δ	Sonsuz baraya kıyasla rotorun açısı
θ_T	Generatör rotor kütlesinin açısı
ω	Mekanik hız sapması
A	Alan
D	Sönümleme katsayısı
J	Eylemsizlik momenti
KE	Kinetik enerji
M	Eylemsizlik sabiti
P	Rüzgâr gücü
Pe	Elektriksel güç
RP_T	Türbin güç yakalaması
SB	Temel güç
U	Hız
$Vpss$	PSS'nin voltajı
f	Xi çözümünün uygunluğu
fl	Karga i'nin uçuş uzunluğu
l	Rüzgâr kanatlarının uzunluğu
m	Nesnenin kütlesi
p	Senkron generatörün kutup sayısı
pu	Birim ünite
$\Delta\omega$	Rotor hızı sapması
Te	Elektromanyetik tork
δ	Elektriksel güç açısı
ρ	Akış yoğunluğu

ÖZET

RÜZGÂR TÜRBİNİ İÇEREN BİR GÜÇ SİSTEMİNİN GEÇİCİ HAL KARARLILIĞININ GÜÇ SİSTEMİ DENGELEYİCİSİ KULLANILARAK KARGA ARAMA ALGORİTMASI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Hamdullah YOKUŞ
Düzce Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi
Danışman: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK
Nisan 2022, 108 sayfa

Yakıt gideri olmaması ve çevre dostu enerji kaynağı olması nedeni ile rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretimi son zamanlarda büyük önem kazanmıştır. Rüzgârdan enerji üretimi için rüzgâr türbini ve generatör çeşitleri üzerinde pek çok çalışma gerçekleştirilmiş ve bu sistemlerin güç sistemlerine entegresi için çok farklı çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmada rüzgâr türbini içeren bir güç sisteminin geçici hal kararlılığı incelenmiş ve güç sisteminde oluşan bir şiddetli arıza durumunda rüzgâr türbinin dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda kararsızlık durumu için uygun türbin generatör çifti belirlenmesi amaçlanmıştır. Güç sistemi stabilizatörleri (PSS'ler), güç sisteminin geçici kararlılığını geliştirmek için generatör ünitelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. PSS'ler, büyük bir bozulmanın ardından güç açısı, rotor hızı ve alan akımı sapması vb. gibi düşük frekanslı salınımları en aza indirecek şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, PSS'nin parametrelerinin optimal ayarlanması ve yerleştirilmesi, stabilizatörün verimliliği için çok önemlidir. Bu çalışmada, kargaların zekasına dayanan, meta-sezgisel yöntemlerden biri olan Karga Arama Algoritması (KAA), PSS'nin optimum parametrelerini bulmak için Tek Makineli Sonsuz Baralı (SMIB) sistemde ilk defa kullanılmıştır. Ayrıca, çok makineli bir güç sisteminde PSS'nin parametrelerinin bulunması için Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAKA) ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) algoritmaları da uygulanmış olup karşılaştırmalı analizler de gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada rüzgâr santrali tribün generatör sistemine sahip bir güç sisteminin geçici arıza durumları için salınım denklemlerinin kararlılık analizi KAA ile gerçekleştirilmiştir. Sistemin geçici hal kararlılığı SMIB'nin modellenmesi ve simülasyonu ve PSS'nin tasarımı Matlab/Simulink tarafından yapılmıştır. Simülasyonlar, KAA tabanlı PSS denetleyicisinin, sistem kesintiye uğradığında GA tabanlı ve PSO tabanlı PSS denetleyici tasarımlarından oldukça üstün bir dinamik tepki verdiğini ortaya koymaktadır. KAA'ya dayalı PSS, PSO'ya dayalı PSS'den %48,1 ve GA'ya dayalı PSS'den %55,7 daha hızlı yerleştiği gözlemlenmiştir. PSO ve GA'ya kıyasla KAA'nın amaç fonksiyonunun yakınsaması çok daha hızlıdır. KAA için değerlendirme süresi PSO'dan %43,5, GA'dan %48,6 daha kısadır. Diğer yaklaşımlara kıyasla SMIB sisteminde KAA tabanlı PSS kullanıldığında, aşma ve düşük frekanslı salınımlar büyük ölçüde azaltılmıştır ve aktif güç, rotor hızı, alan akımı ve mekanik gücün düşük frekanslı salınımlarını önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Geçici hal kararlılığı, Güç sistemlerinde kararlılık, Güç sistemi stabilizatörü, Karga arama algoritması, Rüzgâr türbini çeşitleri.

ABSTRACT

TRANSIENT STABILITY ENHANCEMENT OF POWER SYSTEM BASED ON WIND TURBINES BY POWER SYSTEM STABILIZER USING CROW SEARCH ALGORITHM

Hamdullah YOKUŞ
Duzce University
Institute of Graduate Studies, Department of Electrical and Electronics Engineering
Doctoral Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK
April 2022, 108 pages

Due to the lack of fuel costs and being an environmentally friendly energy source, the generation of electrical energy from wind power has recently gained great importance. Many studies have been carried out on wind turbines and generators for wind power generation and many different efforts to integrate the power systems of these systems is achieved. In this study, the transient stability of a power system including a wind turbine will be examined. Since various wind turbine generators are used in applications, in this study, the comparative transient stability of wind turbine generators will be analyzed. As a result of the analysis, it is aimed to determine the appropriate turbine generator pair for instability. Power system stabilizers (PSSs) are extensively used in generator units to enhance the transient stability of the power system. PSSs are designed to minimize low-frequency oscillations such as power angle, rotor speed, and field current deviation, etc. following a large disturbance. Hence, optimal tuning and placement of the parameters of PSS are crucial for the efficiency of the stabilizer. In this paper, Crow Search Algorithm (CSA), rely on the intelligence of crows, one of the metaheuristic methods was used for the first time in a Single Machine Infinite Bus (SMIB) system so as to find the optimum parameters of the PSS in order to improve the transient stability of the system. In addition, Artificial Bee Colony (ABC) and Ant Colony Optimization (ACO) algorithms were also applied to find the parameters of PSS in a multi-machine power system, and comparative analyzes were also carried out. In the study, stability analysis of the oscillation equations for the temporary failure conditions of a power system with a wind farm turbine generator system was carried out with CSA. Modeling and simulation of the SMIB and designing of PSS were made by Matlab/Simulink. The simulations reveal that the CSA-based PSS controller performs a dynamic response when the system is interrupted, far superior to the GA-based and PSO-based PSS controller designs. It was observed that CSA-based PSS settled 48.1% faster than PSO-based PSS and 55.7% faster than GA-based PSS. Evaluation time for CSA is 43.5% shorter than PSO and 48.6% shorter than GA. When using CSA-based PSS in the SMIB system compared to other approaches, overshoot and low-frequency oscillations are greatly reduced. When using CSA-based PSS in SMIB system compared to other approaches, overshoot and low-frequency oscillations are greatly reduced and low-frequency oscillations of active power, rotor speed, field current, and mechanical power are significantly reduced.

Keywords: Crow search algorithm, Power system stability, Power system stabilizer, Transient stability, Wind turbine types.

EXTENDED ABSTRACT

TRANSIENT STABILITY ENHANCEMENT OF POWER SYSTEM BASED ON WIND TURBINES BY POWER SYSTEM STABILIZER USING CROW SEARCH ALGORITHM

Hamdullah YOKUŞ
Duzce University
Institute of Graduate Studies, Department of Electrical and Electronics Engineering
Doctoral Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Ali ÖZÜRK
April 2022, 108 pages

1. INTRODUCTION

Power system stability is expressed as the state of the system remaining in normal operating conditions and the return of the system to normal operating conditions when it encounters a disruptive effect. In order for the system to work stable, the input and output energies must be equal to each other. When the mechanical input energy and electrical output energy are equal to each other, that is, the rotor angular velocity is stable, the system is stable. The mechanical input energy for power systems is the mechanical energy obtained from the drive systems acting on the synchronous generator; the electrical output energies are related to the electrical loads connected to the system. Power systems are designed to provide a power supply that operates at a constant, stable voltage. Therefore, stability analysis of electrical power systems has a very important place. Power systems can be with a single machine or with more than one machine. In this study, stability analyzes were performed for multiple machine machines, as well as for the determination of the parameters of the power system stabilizer (PSS) and its integration with the system, for the single machine endless busbar system.

Stability analysis; It consists of three parts: Small-signal or steady-state stability, transient stability, and dynamic state stability. Steady state stability; It examines the synchronization of the system, which is constantly exposed to minor disturbances. Dynamic state stability, on the other hand, examines the state of the system in which it is activated in mechanical regulators, staying in synchronism for a few minutes. This study focuses on transient stability. Transient stability; It examines the stability of the system to remain in synchronism after being exposed to severe disturbances such as phase-to-ground, phase-phase-to-earth and three-phase short circuits.

It is important to examine and analyze the oscillation equations, which is an important parameter in the analysis of transient stability. This equation is used to express the balance of electrical torque and mechanical torque of the system. The oscillation equation is a nonlinear quadratic differential equation. Therefore, the solution of the equation is carried out with various numerical methods. In this study, the solution of the oscillation equation is carried out by the Euler method. The analysis of the transient state stability of the system was carried out by controlling the rotor angles of the generators in the case of three phase failures that the system is exposed to, and the critical cleaning time was determined and the effect of the H constant of the system on this time was examined. In addition; The examination of the speed of generators and the variation of synchronous reactance with time also provided important information for the transient stability analysis of the electrical power system.

Moreover; In this study, a transient stability analysis of a power system including a wind turbine was also carried out. There are four types of wind turbines as wind turbine types. Respectively; Fixed speed wind turbine, variable rotor resistance variable speed wind turbine, variable speed double feed induction generator wind turbine and full converter variable speed wind turbine. Comparative transient stability analyzes of wind turbine generators were performed. The transient stability analyzes of these generators were carried out by looking at the rotor angle of the generators, the critical cleaning times and the speed change values of the generator. With this study, it will be helpful to determine the turbine generator pair to be selected in the wind farm that will be integrated into a power system.

In this study, the determination of the parameters of PSS and the effect of PSS on the system are also examined. Various meta-heuristic methods were used to determine the parameters of PSS. In this study, the Crow search algorithm (CSA) was used for optimization and compared to other meta-heuristic methods, it was shown to be a more effective method for the stability of the power system.

2. MATERIAL AND METHODS

Transient stability analysis in multi-machine electric power system can be performed by looking at the rotor angles of the generators. In addition, the speed variation of generators also provides important information in the analysis of transient stability. In transient stability investigations, the analysis time is 3-5 seconds after the disturbance in small

systems, while it is around 10 seconds in very large systems. The size of the system is the constant H, known as the system's coefficient of inertia.

The stability analysis of the system depends on the analysis of the oscillation equation. The stability of the system depends on the electromagnetic torque and mechanical torque being in equilibrium. If the electromagnetic torque and the mechanical torque are smaller, the rotor accelerates, and in the opposite case, the rotor slows down. Transient stability analysis of the electrical power system and the solution of the oscillation equation by Euler's method were carried out with Power World, a simulator program established by Power World Corporation in 1996. Example power system is a system with 5 busbars, 4 loads and 2 generators. This system was created by entering the necessary system values in the Power World Simulation program.

Furthermore, because different wind turbine generators are employed in different applications, comparative transient stability analyses of wind turbine generators are also evaluated in this study using the Power World. As a consequence of the study, the appropriate turbine generator pair for the instability condition will be determined. The fluctuation in rotor angle of generators with time, variation in generator speeds, and crucial cleaning times were all taken into account in the transient stability study.

The power system chosen for PSS analysis includes an infinite bus connected to a transmission line and contains a single machine and an excitation system. The single machine infinite bus (SMIB) system is used to explore the principle of synchronizing and damping torque that is helpful in understanding the effect of the excitation system on swing-mode damping and in creating intuitions for damping control design.

Because PSS is proposed to minimize low-frequency oscillations-such as power angle, rotor speed, and field current deviation, etc.- our objective in this study is the minimization of the rotor speed deviation. The aim of the PSS is to restore or apply a damping torque to the swing modes. The gain, washout filters, phase compensation blocks, and torsional filters create the structure of the PSS. This analysis employs the widely used speed-based classical lead-lag PSS. CSA is a population-based metaheuristic optimization technique was used for optimization problem. According to the results, the proposed approach produces the anticipated damper efficiency of low-frequency oscillations as well as improves system performance under severe disturbances.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this study, transient stability analysis, which has an important place in multi-machine electric power systems, has been carried out. Stability analysis was carried out by examining the oscillation in the rotor openings of the generators in the system when three phase failures were given in the multi-machine sample system. It took around 4-5 seconds for the relatively small system to recover and not get out of sync. By changing the H constant of the system, this time has increased up to 10 seconds. As it can be understood from here, it takes more time for the system to get out of synchronism in larger systems, and when the speeds of the generators are considered, it takes longer to reach the synchronous speed after failure. Smaller systems do the opposite. If the critical clearing time is exceeded, it has been observed that the system goes towards instability, and it is seen that this time is directly proportional to the H constant of the system.

The stability of the system was analyzed by the analysis of the oscillation equation of the power system using the Euler method and important results were obtained. It has been observed that a short-term fault in the system becomes stable after 3 seconds. The oscillation of the power angle and frequency in the event of failure was observed and it was determined that it returned to its stable state after 3 seconds. As a result of the analysis, it was seen that the system entered an unstable state if the cleaning time, which varies depending on the H constant, is 0.5 seconds or more. How the system maintains its stability during the 0.3 and 0.4 second cleaning times has been seen through the analysis. The analysis of the nonlinear oscillation equation with the numerical method, Euler's method, showed us that the oscillation equation can be analyzed more easily and faster.

Transient stability analysis of different wind turbine generators in a power system including a wind farm was carried out in this study. In the light of these data, it can be said that the 1st type turbine generator pair has a lower critical cleaning time than the other pairs. This smaller critical clearance time makes the system more fragile. However, it has also shortened the recovery time. For Type 1, this time is around 2-3 seconds. In addition, while this value is 4-5 seconds for Type 2, this time is around 5-6 seconds for Type 3. The reason for this is that the size of their inertia coefficients (H constant) has a significant effect. The magnitude of the oscillations made by the generator and the time to reach the steady state can also be seen from the graphs of the variation of the generator speed according to the rotor angle. A larger H constant means that the system works more slowly, leaving synchronization late and returning to synchronous speed late. This fact is

once again demonstrated by these results.

The results of the simulations proved the effectiveness and robustness of the optimization process compared to other metaheuristic algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO) and Genetic Algorithm (GA). When compared to the performance attained by the GA-based and PSO-based PSS controller designs, the simulations show that the KAA-based PSS delivers a far better dynamic response when the system is disrupted. The KAA-based PSS settles 48.1% faster than the PSO-based PSS and 55.7% faster than the GA-based PSS. CSA has just 2 parameters to adjust, making it much easier to implement than other methods. These parameters for PSO and GA are 4 and 6, respectively. When CSA-based PSS is used in the SMIB system, overshoot and low-frequency oscillations are also significantly reduced compared to other methods.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

When the post-failure oscillations of the rotor angle and speed of the generators in multi-machine electric power systems are examined, the analysis of the system's transient stability has been carried out successfully. With the help of Power World program, which is a powerful simulation program, the oscillation equations of the system were solved with the Euler method and the analyzes were carried out effectively.

When integrating a wind farm into a power system, we need to know what we expect from our system. A turbine generator pair with a lower H value of a system that is able to perform control relatively quickly will be a suitable choice. In this way, the cost will be reduced. However, depending on the size of our power system, the selection of turbine generator pairs, whose dynamic analyzes are given, was carried out in the study.

With this study, the selection of the wind turbine generator pair to be integrated into a power system will be performed more accurately. Cost analysis will also be carried out more accurately due to the pre-detection of possible system errors and the determination of the generator turbine pair that is suitable for the system.

Moreover; in this study, a new population-based swarm intelligence heuristic optimization method, CSA, which relied on the intelligent behavior of the crows, is suggested for the optimal design of PSS parameters of the SMIB system. The problem of identifying PSS parameters is transformed into an optimization problem that is solved by CSA using a parameter-constrained, time domain-based objective function to enhance the performance characteristics of the SMIB. The performance of the suggested CSA-based

PSS controller is analyzed and compared with PSO and GA techniques on a SMIB system.

The simulations demonstrate that the CSA-based PSS provides a much-enhanced dynamic response when the system is disrupted compared to the performance achieved by the GA-based and PSO-based PSS controller design. Moreover, the convergence of the objective function of the CSA is much quicker than the other techniques. The CSA-based PSS substantially reduced low-frequency oscillations of active power, rotor speed, field current and mechanical power as compared to PSO-based PSS and GA-based PSS. Overshoot, settling time, and low-frequency oscillations are greatly reduced during the normally loaded condition, using a CSA-based PSS in the SMIB system. All the presented results approve that CSA could optimize the parameters of the power system stabilizer much better than the other metaheuristic methods in the SMIB system. In this study, the proposed method CSA is presented as an alternative solution method for solving PSS frequency oscillation damping problems. Since CSA is used for the stability of the SMIB system in determining the parameters of the PSS in this study, the same study can be carried out in larger and more complex systems in future studies.

1. GİRİŞ

Artan enerji ihtiyacı ve fosil yakıtların tükenişi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi arttırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından öne çıkanlar ise güneş ve rüzgardır. Birçok uygulama ve çalışmalar bu enerji kaynakları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr enerjisinin hem gece hem gündüz çalışması da onu bir adım daha öne taşımaktadır. Bundan dolayıdır ki rüzgârdan enerji üretimi için rüzgâr türbin çeşitleri üzerinde pek çok çalışma gerçekleştirilmiş ve bu türbinlerin güç sitemlerine entegresi analizlerle incelenmiştir.

Güç sistemi kararlılığı, sistemin normal çalışma koşullarında kalma durumunu ve bozucu bir etki ile karşılaştığında sistemin normal çalışma koşullarına dönmesi olarak ifade edilir. Sistemin kararlı çalışabilmesi için giriş ve çıkış enerjilerinin biri birine eşit olması gereklidir. Mekaniksel giriş enerjisi ile elektriksel çıkış enerjisi birbirine eşit durumda iken yani rotor açısal hızı stabil durumda iken sistem kararlı durumdadır. Güç sistemleri için mekaniksel giriş enerjisi, senkron generatöre etkiyen tahrik sistemlerinden elde edilen mekanik enerji olup; elektriksel çıkış enerjileri ise, sisteme bağlı olan elektriksel yüklerle ilişkilidir [1].

Geleneksel olarak dengesizlik sorunu, güç sistemi içindeki makinelerin senkronizasyonunun sürdürülmesi ile ilgilidir, ancak dengesizlik, senkronizasyon kaybı olmadan da meydana gelebilir, örneğin yük değişiminden dolayı ani bir gerilim düşüşü iletim hattını dengesiz duruma itebilir. Genellikle makineler arasındaki bağıl ve mutlak rotor açısı ve güç açısı sistemin dengesini gösterir. Arıza küçük veya büyük olabilir. Yük değişikliği gibi küçük arızalar sistemde sürekli olarak meydana gelir ve bu nedenle sistem tatmin edici bir güç sistemi durumu için kabul edilebilir bir gerilim ve frekans seviyesi koruyarak kendisini tüm bu küçük değişikliklere göre ayarlar. Güç sistem kararlılığı üç şekilde irdelenir; rotor açısı kararlılığı, frekans kararlılığı ve son olarak gerilim kararlılığıdır. Güç sisteminde üzerinde duracağımız geçici hal karalılığıdır. Geçici hal kararlılığı; bir sistemin büyük bir bozucu etkiye, üç faz arıza gibi, maruz kaldıktan sonra sistemin senkronizmada kalma durumunu irdeler.

Rotor açısı kararlılığı, güç sistemi içindeki senkronize makinelerin karşılaştıkları arızadan

sonra bile senkronizasyonu sürdürme kabiliyetleridir [2]. Çalışma yöntemi, her bir makinenin rotor açısı değişiminin birbirine göre analizini içerir. Senkron makinenin detaylı bir şekilde anlaşılması, rotor açısı salınımlarına göre güç çıkışı değişikliklerini göstermek için gereklidir. Rotor açısı, statorun dönen manyetik alanındaki sabit referanslar arasındaki dönen şaft arasındaki göreceli açıdır. Güç girişi değiştiğinde, generatör ucunda sabit bir yüke maruz kalan rotor açısında eşit bir değişiklik olur veya generatörün güç çıkışının rotor açısına bağlı olduğunu söyleyebiliriz. Sistem bozulmaya uğradığında, makineden biri rotor açısı bozulmasına bağlı olarak yavaşlar veya hızlanır. Makineler arasında ortaya çıkan açısal fark, makinalar arasında yeniden yükleme yükü oluşmasına neden olacaktır (yavaş makineden hızlı makineye). Bu hızlı makinenin gücünü azaltır ve sonunda sistem başka bir denge noktasında stabil hale gelir. Ancak bazen hız farkı o kadar yüksektir ki, güç aktarımı yavaş yavaş azalır ve makine senkronizasyonunu kaybeder. Rotor açısı kararlılığı iki başlık altında irdelenir ve çalışmaya konu olan analizde (geçici hal kararlılığı) de bunlardan biridir. Bu analizler; küçük sinyal kararlılığı ve geçici hal kararlılığıdır.

Geçici hal kararlılığı analizi sistemin şiddetli bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra sistemin senkronizmada kalıp kalmadığını analiz eder. Sistemdeki bozucu etki üç faz arızası olabilir. Bu şiddetli bozucu etkide sistemin generatörlerinin rotor açılarında büyük titreşimler meydana gelir. Güç sisteminde geçici hal kararlılığı analizi generatörlerin rotor açılarına bakılarak gerçekleştirilebilmektedir. Buna ek olarak da generatörlerin hız değişimi de geçici hal karalılığı analizinde önemli bilgiler vermektedir. Geçici hal kararlılığı analizi genellikle 3-5 saniye arasındaki analizi olarak bilinir. Bu zaman aralığı sistemin büyüklüğüne göre değişkenlik gösterebilmektedir.

Rüzgâr santrali bağlanması öncesi ve sonrası şeklinde sistemde gerilim kararlılığı analizini Bhumkittipich ve Jan-Ngurn sürekli güç akış analizini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada Tayland dağıtım sistemine rüzgâr santralinin etkisi incelenmiştir. Sisteme rüzgâr türbinini eklemenin sistemin maksimum yüklenme sınırını düşürdüğünü göstermişlerdir [3].

Chandra, Kumari ve ark. rüzgâr santralini sisteme çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) ve sincap kafesli asenkron generatör (SCIG) olarak sisteme eklemişlerdir. Rüzgâr santralinin farklı tipler için sistem kararlılığına etkisi üzerinde çalışmışlar ve küçük sinyal kararlılığı analizi MATLAB araç kiti PSAT kullanarak yapmışlardır. Elde edilen sonuçlardan, ÇBAG'nin gerilim kararlılığı SCIG'a göre daha baskın olduğu

sonucuna varmışlardır [4].

Adjoudji, Lakdja ve ark. Batı Cezayir Ağında yenilenebilir enerji kaynaklarının gerilim kararlılığına etkisi üzerinde çalışmışlardır. Sisteme rüzgâr santrali olarak çift beslemeli asenkron generatör ve güneş santrali olarak PV generatör bağlamışlardır. Rüzgâr santrali ve güneş santrallerinin ekleneceği en uygun yeri sürekli güç akış analizi ile bulmuşlar ve sisteme bağlayarak gerilim profilleri ve sistem yüklenme parametrelerini bulmuşlardır. Sonuçları karşılaştırarak, en uygun yere yerleştirilme koşulunu göstermişlerdir [5].

Abd, Cheng ve Sun 14 baralı güç sisteminde yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme etkilerini gerilim kararlılığı açısından incelemişlerdir. WBSI (Weakest Bus Sensitivity Index)'e göre yenilenebilir enerji kaynaklarının yerleştirileceği baraları belirlemişlerdir. İlk olarak güç sistemine rüzgâr türbini eklemişler, sistem yüklenme parametresini düşürdüğünü ve bara gerilimini az da olsa arttırdığını göstermişlerdir. İkinci adım da, sistemlerine güneş santrali eklemişler ve etkilerine bakmışlardır. Sistem yüklenme parametresi ve bara geriliminde artış gözlemlemişlerdir. Üçüncü adımda, sisteme yakıt hücresi (Fuel Cell) eklenmiştir. Yakıt hücresinin de sistem yüklenme parametresini ve bara gerilimini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Sonraki adımlarda, farklı kombinasyonlarda rüzgâr santrali, güneş santrali ve yakıt hücresi sisteme eklenmiş ve analizler tekrarlanmıştır. En uygun kombinasyon ve yerleşim yeri, maksimum yüklenme parametresi ve sistem minimum gerilimine göre belirlemişlerdir [6].

Chen ve ark. 30 baralı sistemin statik gerilim kararlılığını VSAT programında farklı senaryolar için CPFLOW analizi ile incelemişlerdir. Rüzgâr santrali sisteme PQ generatörü olarak eklenmiş ve gerilim kararlılığı için yararlı olacağı sonucuna ulaşmışlardır [7].

H. R. Chamorr ve ark. rüzgâr gücünün arka arkaya dönüştürücüler aracılığıyla entegrasyonundan etkilenen atalet ve frekans tepkisine genel bir bakış sunulmuşlardır. Rüzgâr gücünün yüksek penetrasyonunun daha az sistem atalet tepkisi ve dolayısıyla daha büyük dinamik sistem frekans sapması ile sonuçlandığı gösterilmişlerdir. Bu çalışmada ayrıca, yapay atalet kontrolü olarak bilinen ek bir kontrol ile sistemin atalet yanıtını arttırmaya yönelik bazı yöntemler sunmuşlardır [8].

Shi, Libaove ark. çalışmalarında değişken hızlı çift beslemeli endüksiyon generatörlü büyük ölçekli şebekeye bağlı rüzgar santralleri göz önünde bulundurularak güç sisteminin geçici kararlılık simülasyonu incelenmiştir. Senkron generatörlerin değiştirilmesiyle

çoklu rüzgâr çiftliği entegrasyonu incelenmiştir. Değişken hızlı çift beslemeli endüksiyon generatör tipi rüzgâr santralinin doğrudan bağlanması ile güç sisteminin geçici kararlılığı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Büyük rüzgar santrallerinin mevcut güç sistemiyle entegrasyonunda güç sistemi planlaması ve tasarımı için faydalı bilgiler sağlayabileceği belirtmişlerdir [9].

E. Muljadi ve ark. arızanın yeri, farklı generatörlerde bulunan gerilim düşüşlerini etkilediğini ve arıza ana sisteme ne kadar yakınsa, elde edilen kritik temizleme süresi o kadar küçük olduğunu bu nedenle maruz kalınan gerilim düşüşleri o kadar düşük olacağını açıklamışlardır. Senkron generatörün değişken hızlı çift beslemeli endüksiyon generatörlü rüzgâr türbinlerine sahip bir rüzgar santraline göre daha düşük gerilim gerilimine duyarlı olduğunu belirmişlerdir [10].

Djemai ve ark. çalışmalarında temel olarak kritiktik temizlenme süresi belirlenerek açısal istikrarın değerlendirmesine odaklanmışlardır. Bu belirleme üç faz hata oluşumunda bazı parametrelerin değişimini inceleyerek generatör hızlarının değişimiyle elde edilmiştir. Vardıkları sonuçlar arasında rüzgâr üretiminin geçici istikrar marjlarını iyileştirip iyileştirmediği veya etkisinin oldukça olumsuz olup olmadığı ile ilgili genel bir açıklama yoktur. Bunun rüzgâr kaynaklarının konumuna bağlı olduğunu ve her durum için sorunun ayrı ayrı analiz edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [11].

Amroune Mohammed ve ark. çalışmalarında sabit hızlı rüzgâr generatörlerinin artan penetrasyonunun güç sistemi geçici kararlılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Rüzgâr santralleri gerilim seviyelerini ve şebekelerdeki güç akışlarını etkidiğini ve bu etkilerin özellikle rüzgâr santralleri yük merkezlerine yakın olduğunda, sistem için faydalı olabileceğini ifade etmişlerdir. Buna ek olarak, sabit hızlı rüzgâr türbininin yeri ve sayısı, güç sisteminin geçici kararlılığı üzerinde etkili olduğunu söylemişlerdir. Sabit hızlı rüzgâr türbini penetrasyonu artması güç sisteminin kritik temizlenme süresini artmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir [12].

Lasantha Meegahapola ve ark. çalışmalarında rüzgâr çiftliği entegrasyonuna ve rüzgâr generatörü teknolojisine dayanan üç rüzgâr senaryosu için geçici stabilite simülasyonları yapılmışlardır. Sabit hızlı rüzgâr türbinli santralin yüksek gerilim seviyesi entegrasyonu, yüksek gerilim sistemindeki güçlü gerilim desteği nedeniyle düşük gerilim seviyesi entegrasyonuna kıyasla nispeten yüksek stabilite sağladığı belirtilmiştir. Çift beslemeli endüksiyon generatörlü tabanlı rüzgâr santrallerinin kurulması, reaktif güç tüketimindeki

azalma nedeniyle sistem istikrarında önemli bir gelişme sağladığı belirtilmiştir. Her ne kadar bu faktörler düşük rüzgâr penetrasyon seviyelerinde stabiliteyi iyileştirmiş olsa da, geçici bozulmalar altında rüzgar generatörlerinin yüksek reaktif güç emiliminden dolayı sistem stabilitesi yüksek penetrasyon seviyelerinde önemli ölçüde azaldığını ifade etmişlerdir [13].

Xia, Shiwei ve ark. güç sistemine eklenecek olan rüzgâr güllerinin ve lokasyonlarının sisteme etkilerini incelemişlerdir. Simülasyon sonuçlarıyla rüzgâr santrallerinin kapasitesi ile güç sistemi geçici kararlılığı arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Rüzgâr üretiminin artmasıyla birlikte, güç sisteminin geçici istikrarsızlığının arttığı ve dahası, rüzgâr çiftliği konumları ve rüzgâr hızı aynı zamanda güç sisteminin dengesini de etkileyebildiğini, ancak sistem geçici kararlılığı üzerindeki olumsuz etkilediğini, durum çalışmalarında gösterildiği gibi senkron kapasitörler eklenerek büyük ölçüde azaltılabildiğini belirlemişlerdir [14].

Tamura, Junji ve ark. çalışmalarında kısa devre arızası sırasında rüzgâr generatörü içeren bir güç sisteminin geçici kararlılığının simülasyon analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Rüzgâr gülünün aşırı hızlanmasını engelleyip kontrol altında tutan Pitch kontrolün geçici stabilite üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda vardıkları sonuçlar şu şekildedir; bahsi geçen Pitch kontrolün geçici hal kararlılığına büyük bir etkisi olduğunu ve rüzgâr generatörlerinin dinamik davranışı, senkron generatörlerin stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığıdır [15].

Liu, Yanhua ve ark. generatör parametreleri olan Rr, Xr, Xs'nin, sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin geçici kararlılığı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu ve Xs, Xr küçüldüğünde Rr daha da yükseleceğini ve güç sistemini daha da kararlı hale getireceğini belirtmişlerdir. Xm ve Rs, güç sisteminin geçici kararlılığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak çift beslemeli endüksiyon generatörü (ÇBAG)'nin sabit hızlı generatörlü rüzgâr türbinlerine nazaran daha stabil olduklarını göstermişlerdir [16].

Surender Reddy ve ark. makalesinde rüzgâr enerjisi üreticilerinin enerji sisteminin geçici kararlılığı üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Genel olarak, endüksiyon makineleri rüzgâr santrallerinde generatör olarak kullanılır. Endüksiyon makineleri, senkron makinelere benzer bir stabilite problemine sahip olduğundan, rüzgâr santralleri de dahil olmak üzere güç sisteminin geçici kararlılığını analiz etmek önemlidir. Bu çalışmada, kısa

devre arıza koşulları sırasında endüksiyon generatörü içeren güç sisteminin geçici kararlılığının simülasyonları ve analizi yapılmıştır [17].

Bu çalışmada rüzgâr türbini içeren bir güç sisteminin geçici hal kararlılığı incelenmiştir ve güç sisteminde oluşan bir arıza durumunda rüzgâr türbinin frekans analizi gerçekleştirilmiştir. Bu frekans analizi sayesinde rüzgâr türbini çeşitlerinin frekans cevapları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada Power World simülasyon programıyla rüzgâr türbini içeren bir güç sisteminin geçici hal kararlılığı incelenmiş olup ve güç sisteminde oluşan bir şiddetli arıza durumunda rüzgâr türbinin dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Uygulamalarda çeşitli rüzgâr türbini generatörleri kullanıldığından, yapılan çalışmada rüzgâr türbini generatörlerinin karşılaştırmalı olarak geçici hal kararlılıkları incelemeleri yer almıştır. Yapılan analizler sonucunda kararsızlık durumu için uygun türbin generatör çifti belirlenmesi amaçlanmıştır. Geçici hal kararlılık analizi generatörlerin rotor açısının zamana göre değişimi, generatörlerin hızlarındaki değişim ve kritik temizlenme süreleri göz önüne alınarak karşılaştırmalı analizi yapılmıştır.

Geçici hal kararlılığı analizinde önemli bir yeri olan doğrusal olmayan ikinci dereceden bir diferansiyel denklem olan salınım denklemlerinin de çözümü bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Denklemlerin çözümü çeşitli sayısal yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada salınım denkleminin çözümü Euler yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Sistemin maruz kaldığı üç fazlı arıza durumlarında generatörlerin rotor açıları kontrol edilerek sistemin geçici hal kararlılığının analizi yapılmış ve kritik temizleme süresi belirlenmiş ve sistemin eylemsizlik katsayısı olan H sabitinin etkisi belirlenmiştir. Bu süredeki sistem incelemesi yapılmıştır ve generatörlerin hızının ve senkron reaktansın zamanla değişimi gözlemlendi, elektrik güç sisteminin geçici durum kararlılık analizi için de önemli bilgiler sağlanmıştır.

Geçici hal karalılığı çalışmalarında sisteme elektriksel bir etki ile kararlılık analizi gerçekleştirmemizi sağlayan güç sistemi stabilizatörleri (PSS'ler) kullanılmaktadır. PSS'ler güç sisteminin geçici stabilitesini iyileştirmek için generatör ünitelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, PSS parametrelerinin optimum şekilde ayarlanması ve yerleştirilmesi, dengeleyicinin verimliliği için çok önemlidir. PSS'nin optimum parametrelerini bulmak için birçok optimizasyon yöntemi önerilmiştir.

PSS mimarisi ile ilgili literatürde, özdeğer değerlendirmesi de dahil olmak üzere çeşitli geleneksel tekniklerden bahsedilmiştir [18], uygulamalı matematik [19], [20],

optimizasyon simülasyonlu tavlama ve hatta modern sistem mühendisliği [21]–[24].

Ne yazık ki, yinelemeli oldukları ve güçlü bir hesaplama iş yükü ve kademeli yakınsama gerektirdiği için geleneksel yöntemler zaman alıcıdır. Ayrıca, arama prosedürünün yerel minimumlarda kalması muhtemeldir ve elde edilen sonuç ideal olmayabilir. Ayrıca, bir güç sisteminin kontrol stratejileri ve kurulumları önemli ölçüde değiştiğinde, sistemi önceden belirli bir işletim ortamında stabilize eden bir dizi tasarım değişkeni artık kabul edilebilir sonuçlar üretmeyecektir [25].

Daha rasyonel bir PSS mimarisi, güç sistemlerinin doğrusal olmayan ve parametrik özelliklerini dikkate alarak iyileştirmeler ve kontrol teorisi hazırlama ilkesine dayanmaktadır [26], [27]. Bu tür stabilizatör, çalışma ortamına bağlı olarak değişkenlerini anında değiştirebilir. Yıllarca süren araştırmalar, uyarlanabilir stabilizatörün yalnızca geniş bir çalışma kapasitesi boyunca güçlü sönümleme sağlamaya odaklanamayacağını, aynı zamanda stabilizatörler arasındaki senkronizasyon sorununu da çözebileceğini göstermiştir.

Bulanık mantık [28]–[32]'de, nöro-bulanık [33]–[35]'te, uyarlanabilir bulanık ve yapay sinir ağları (YSA) gibi yapay zeka (YZ) teknikleri [36], [37]'de, son yıllarda PSS tasarımıyla ilgili sorunları [38]'de ele almak için araştırılmıştır. Bu yöntemlerin dezavantajlarından bazıları, uzun eğitim süresi, başarılı sinyalleri almak için çok çalışmak, bu tür stabilizatörlerin karmaşık doğası vb.

YZ yöntemlerinin bu dezavantajları nedeniyle, optimizasyon algoritmaları son zamanlarda PSS tasarımı problemlerine kadar genişletildi. [39]'de sağlanan PSS kontrolör tasarımı için Simüle Edilmiş Tavlama (SA), yerel optimumlardan birinde takılırsa başarısız olabilir.

PSS tasarımı için başka bir meta-sezgisel yöntem olan Tabu Arama (TA) [40], [41]'de uygulanmaktadır. Optimizasyon aracının PSS'yi oluşturmadaki verimliliğine rağmen, güçlü epigenetik modifikasyon amaç fonksiyonlarının kullanılması ve optimize edilmiş parametrelerin büyük yüzdesi, etkinliğini azaltır. Bu yöntem aynı zamanda zaman alıcıdır.

Genetik Algoritma (GA), en iyi PSS tasarımını oluşturmak için [42], [43]'deki gibi tasarlanmıştır. Bu yöntemin çalışması, incelenen sistemin boyutuna bağlı olarak uzun zaman alabilir. Ayrıca, aynı optimal olmayan çözümlerin tekrar tekrar gözden geçirilmesine yol açar. PSS'nin çeşitli çalışma durumları altında ayarlanması, [44],

[45]'te Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) kullanılarak öngörülmüştür. Orijinal PSO'nun etkinliği, parametrelerinden büyük ölçüde etkilenir ve sıklıkla yerel optimum ve yakınsama hızında sıkışıp kalmaya dayanır.

Ayrıca algoritma saçılma ve optimizasyon problemlerini çözememektedir. PSS parametrelerinin ayarlanması için, Bakteri Toplayıcılık (BT) ve Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BTO) olarak adlandırılan nispeten yeni iki evrimsel algoritma önerilmiştir. Bakteri Toplayıcılık (BT) şeması [46]'da gösterilmiştir. BT yöntemi, genel optimumu bulmada gecikmelere neden olabilecek rastgele arama yönleri kullanır. Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BTO), PSS'nin ayarlanması için [47]'te görülmektedir. Klasik BTO algoritması, konsantrasyon ve çeşitleme yöntemleri olarak göç ve mutasyon operatörlerini kullanır. Bununla birlikte, mutasyon operatörü bazen sonuçların tutarlılığını bozar.

PSS parametrelerini optimize etmek için bazı diğer meta-sezgisel teknikler yakın zamanda tanıtılmıştır. Bunlar guguk kuşu araması [48], balçık küfü [49], tarım arazilerinin verimliliği [50], kaotik ayçiçeği optimizasyonu [51], kaotik parçacık sürüsü optimizasyonu [52], geliştirilmiş balina optimizasyonu [53], geliştirilmiş atom arama algoritması [54], çekirge optimizasyonu [55], sinüs ve kosinüs algoritması [56], modifiye sinüs kosinüs ve gri kurt optimizasyonu [57], kartal takım yıldızı optimizatörü [58] ve güve arama algoritması [59]. PSS parametrelerini daha verimli bir şekilde ayarlama yetenekleri nedeniyle, bu meta-sezgisel algoritmalar sayesinde, daha kararlı ve daha yüksek işleyen güç sistemleri elde edilmiştir.

PSS kontrolörünün yeni algoritmalarla daha da geliştirilmesinin mümkün olduğu bir gerçektir. Yapılan bu çalışmada kargaların akıllı davranışına dayanan Karga Arama Algoritması (KAA), geçici kararlılığı artırmak için PSS'nin optimum parametrelerini bulmak için tek makineli sonsuz baralı (SMIB) sistem kullanılmış olup sistem kararlılığı irdelenmiştir. Sistemin SMIB'sinin modellenmesi ve simülasyonu ile PSS'nin tasarımı Matlab / Simulink tarafından yapılmıştır. PSS, büyük bir kesintinin ardından güç açıları, rotor hızları ve hat güçlerindeki sapmalar gibi güç sistemi salınımlarını en aza indirecek şekilde tasarlandığından, bu sapmaların herhangi birinin veya tümünün en aza indirilmesi hedef olarak seçilebilir. Bu çalışmada rotor hızı sapması hedef olarak seçilmiştir.

KAA'nın amaç fonksiyonu yakınsaması, diğer yaklaşımlardan önemli ölçüde daha hızlıdır. PSO tabanlı PSS ve GA tabanlı PSS ile karşılaştırıldığında, KAA tabanlı PSS,

aktif güç, rotor hızı, alan akımı ve mekanik güçteki düşük frekanslı salınımları büyük ölçüde düşürür. SMIB sisteminde KAA tabanlı bir PSS kullanıldığında, normal yükte aşma, yerleşme süresi ve düşük frekanslı salınımlar önemli ölçüde azalır. Tüm veriler, güç sistemi stabilizatörünün ayarlarının optimize edilmesi söz konusu olduğunda, KAA'nın SMIB sistemindeki diğer meta-sezgisel yaklaşımlardan daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir. Bu çalışmada sunulan yöntem, PSS frekans salınım sönümleme problemleri için alternatif bir çözüm metodu olarak görülmektedir.

2. RÜZGÂR ENERJİSİ

Hava hızında bulunan enerjiyi kullanma kapasitesi, rüzgâr enerjisi teknolojisinin temelidir. Bu kinetik enerji çıkarma hızı, rüzgâr gücü olarak ölçülmektedir. Hareketli havadaki kinetik enerji akış hızı aynı zamanda rüzgâr gücü oranıdır. Hareketler hem güç kaynağı hem de taşıma yöntemi olduğundan, rüzgâr enerjisi çıkarmanın etkinliği, yeterli akışı korurken rüzgârı yavaşlatmak arasında bir dengedir [60].

Rüzgâr enerjisi, çekirdeğinde hidrojenin (H) helyuma (He) nükleer füzyonuyla dönüştürülmüş bir güneş enerjisi türüdür. H → He füzyon süreci, güneşten uzaya her yönde ısı ve elektromanyetik radyasyon yayılır. Dünya güneş ışınımının yalnızca küçük bir yüzdesini almasına rağmen, gezegenin neredeyse tüm enerji ihtiyaçlarını karşılar. Rüzgâr enerjisi, günlük elektrik üretiminin ortak bir kaynağıdır ve küresel enerji pazarında önemli bir oyuncudur. Rüzgâr enerjisinin teknik olgunluğu ve dağıtım hızı, elektrik şebekesine entegre edilebilecek rüzgâr yüzdesi için pratik bir üst sınır olmaması gerçeği onu önde gelen enerji teknolojisi arasına koymaktadır [61].

Rüzgâr, atmosferik havanın hareketidir. Her yerdedir ve gezegenimizin en temel fiziksel bileşenlerinden biridir. Rüzgâr, hareket eden havanın hızına bağlı olarak hafif ve ince hissedebilir, insan gözüyle sessiz ve görünmezdir. Ayrıca, taşıdığı ağır enkaz nedeniyle yüksek sesli ve görünür, güçlü ve yıkıcı bir güç olabilir. Rüzgârın gücü, rüzgardaki enerji miktarı veya kinetik enerji ile orantılı olan hava hareketinin hızı ile belirlenir. Güneş radyasyonu ise bu enerjinin kaynağıdır. Güneşin elektromanyetik radyasyonu, dünyanın yüzeyini eşit olmayan bir şekilde ısıtır, tropik bölgelerde daha büyük ve yüksek enlemlerde daha zayıftır. Diferansiyel toprak yüzeyi ısıtma modelleri ve ayrıca buharlaşma, yağış, bulutlar, gölge ve yüzey radyasyon soğrulmanın varyasyonlarını içeren diğer termal süreçler çeşitli zaman ve uzay ölçeklerinde görülebilir. Bunlar, çok çeşitli rüzgâr üretim süreçlerini yürütmek için toprak dönüşünden ve akış momentumunun yeniden dağıtımından kaynaklanan dinamik kuvvetlerle birleştirilir ve çok çeşitli rüzgâr olaylarıyla sonuçlanır. Bu rüzgarların mekânsal ölçeği ve fiziksel üretim yöntemleri, onları sınıflandırmak için kullanılabilir [60].

Rüzgâr, atmosferik basınç gardiyanları nedeniyle hava hareketinden kaynaklanır. Rüzgâr,

yüksek basınçlı alanlardan düşük basınçlı alanlara doğru akar. Hava basıncı gardiyanı ne kadar büyük olursa, rüzgâr hızı o kadar yüksek olur ve sonuç olarak, rüzgâr enerjisi dönüştürme aparatı tarafından yakalanabilen daha fazla rüzgâr gücü olur. Rüzgâr üretimi ve hareketi çeşitli koşullar nedeniyle karmaşıktır. Düzensiz güneş ısıtması, dünyanın kendi ekseni etrafında dönmesi ve yerel coğrafi koşullar bunlar arasında en önemlileridir.

2.1. RÜZGÂR GÜCÜNÜN TEMEL DENKLEMİ: KİNETİK ENERJİ AKISI VE RÜZGÂR ENERJİSİ YOĞUNLUĞU

Rüzgâr enerjisiyle ilgili en temel nicel soru, rüzgâr enerjisinin temel denklemi ile cevaplanır. Güç ve enerji kavramları arasında ayrım yapılarak başlangıç yapılmalıdır. Enerjinin zaman oranı güç olarak adlandırılır. Örneğin, bir rüzgâr türbininin zaman birimi başına ne kadar enerji üretebileceğini bilmemiz gerekecektir. Öte yandan, rüzgârın gücü, rüzgâr enerjisinin açık bir pencereden aktığı tempodur.

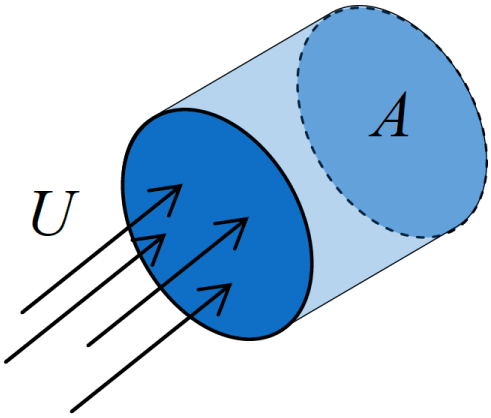
Aşağıdaki faktörler rüzgâr enerjisini etkiler:

- Hava miktarı (dikkate alınan havanın hacmi)
- Havanın hızı (hızının büyüklüğü)
- Hava kütlesi (yoğunluk üzerinden hacimle ilgili)

Rüzgâr gücü, birim zaman başına düşen alandan geçen rüzgâr enerjisinin miktarını ölçer. Başka bir şekilde ifade edilecek olunursa rüzgâr enerjisi, belirli bir alandan rüzgâr enerjisinin akışıdır. Akı, hareketli bir sıvı tarafından taşınan herhangi bir miktarın akış hızını ölçen, birim alan başına normalize edilen akışkan mekaniğinde önemli bir kavramdır. Örneğin, kütle akısı, ilgi alanına bölünmüş kütle akışının oranıdır. Hacim akısı, zaman ve alan birimi başına düşen bölgede akan sıvı miktarıdır [60].

Şekil 2.1'deki gibi A alanı göz önünde bulundurarak U büyüklüğünde akışı bu alandan geçmektedir. Birim zaman dt boyunca bu alandan akan havanın hacmi, silindirin hacmi kesit alanı A ve uzunluk $U\,dt$ olarak verilmektedir ve bu hacim $AU\,dt$ dir. Bu nedenle hacim akış hızı AU ve hacim akısı da U dur. Kütle akış hızı, hacim akış hızını akışın yoğunluğuyla ρ çarpılarak türetilir ve birim zamana bölünür, bu silindirin kütlesine eşittir.

$$\frac{dm}{dt} = \rho . A . U \tag{2.1}$$



Şekil 2.1. U hızıyla A alanından geçen rüzgârın hava akımı şeması [60].

Hareketinden dolayı hava akışının enerji içeriği rüzgâr enerjisi olarak tanımlanır. Kinetik enerji, bir nesnenin kütlesi ve hızı ile belirlenen bir enerji şeklidir.

$$KE = \frac{1}{2} m.U^2 \tag{2.2}$$

Rüzgâr gücü kinetik enerji akışının bir oranıdır. Birim süre boyunca belirli bir alan boyunca akan kinetik enerji miktarı Şekil 2.1'deki silindirin kinetik enerji içeriğine eşittir.

$$P = \frac{1}{2} . \frac{dm}{dt} . U^2 \tag{2.3}$$

Denklem (2.1)'deki kütle akış oranı, Denklem (2.3)'de yerine yazılırsa rüzgâr gücü için sonuç Denklemi (2.4)'deki gibi olur.

$$P = \frac{1}{2}.\rho.A.U^3 \tag{2.4}$$

Bu, rüzgâr enerjisi analizinde temel bir denklemdir. Rüzgâr hızına oldukça doğrusal olmayan bir kübik bağımlılık sergiler. Örneğin; rüzgâr hızını iki katına çıkarmak, mevcut gücünde sekiz kat artışa yol açar. Böylelikle rüzgâr enerjisi hakkında düşünürken neden ortam rüzgâr hızının en önemli husus olduğunu açıklanmış olur. Rüzgârın gücü, Denklem (2.4)'deki hava yoğunluğunun doğrusal bir fonksiyonudur ve yoğunluk, hava yoğunluğu değişimlerinin dar aralığından dolayı ikincil bir öneme sahiptir. Güç alanı ilişkisi, daha uzun rüzgâr türbini kanatlarının faydalarını vurgulayarak, bir rüzgâr türbininin süpürülen alanının yarıçapına doğrusal olmayan ikinci dereceden bir bağımlılık anlamına gelir.

Normal olarak, ortam rüzgâr gücü, ilgilenilen alana veya belirli güç akışına bölünerek normalleştirilir. Rüzgâr enerjisi akışı, akış ve akış hızı tanımlarına benzer şekilde, birim alan başına rüzgâr enerjisi akış hızı olarak tanımlanır. Sonuç olarak, kinetik rüzgâr enerjisi akışı rüzgâr gücü yoğunluğu (RGY) olarakta tanımlanır [60].

$$RGY = \frac{P}{A} = \frac{1}{2}.\rho.A.U^3 \tag{2.5}$$

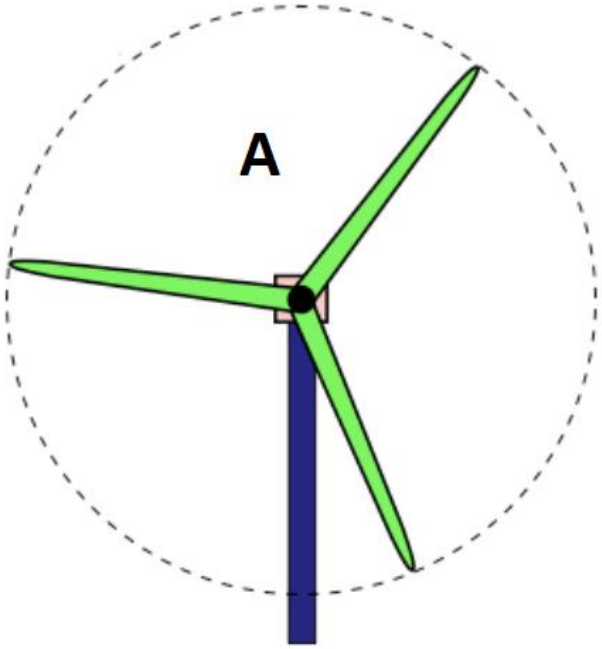
Şu ana kadarki kısımda ortam hava akışının toplam rüzgâr gücü içeriğine bakıldı. Ancak bu rüzgâr gücünün tamamından faydalanılmamaktadır. Türbin tarafından çekilen gücün rüzgâr kaynağının toplam gücüne oranı olan Güç Katsayısı ($C_p = P_T/P_{Rüzgar}$), rüzgâr enerjisi çıkarma verimliliğini ölçmek için kullanılır. Türbin güç yakalaması Denklem (2.6)'daki gibi olur.

$$RP_T = \frac{1}{2}.\rho.A.U^3.C_p \tag{2.6}$$

Bu her zaman $P_{Rüzgar}$'dan küçük olduğunu gösterir. Teorik olarak bu katsayının bir üst limiti vardır. Bu limit Betz limiti olarakta bilinir. Betz teorisine [62] göre bu katsayının maksimum değeri 16/27 yani %59 olarak belirlenmektedir. Bu değer maksimum güç

dönüşümünü belirlemektedir. Rüzgâr gücünün, hareket halindeki havanın sürekli akışına bağlı olan akışkan mekanik doğası, %100 gibi daha yüksek verimliliğin düşünülememesinin nedenidir. Kullanılan hassas rüzgar türbini teknolojisinden bağımsız olarak, kinetik enerjinin %100'ü alınırsa, hava akışı tamamen durur ve enerji çıkarma mekanizması boyunca akışı destekleyecek hiçbir hız kalmaz [63].

2.2. BIÇAK SÜPÜRME ALANI



Şekil 2.2. Rüzgâr türbini kanatlarının süpürme alanı.

Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, bıçak süpürme alanı aşağıdaki formülden hesaplanabilir:

$$A = \pi\left[(1+r)^2 - r^2\right] = \pi l(l + 2\mathrm{r}) \tag{2.7}$$

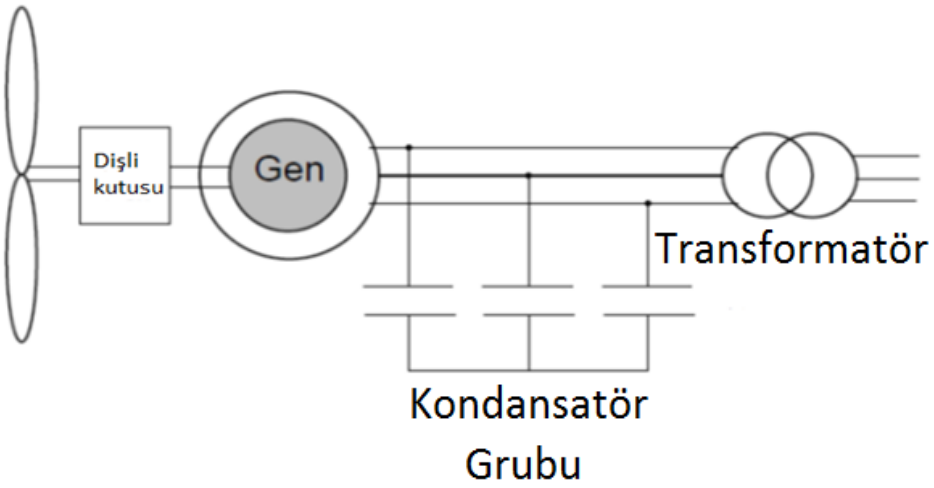
l rüzgâr kanatlarının uzunluğunu ve r ise rüzgar dişlisi göbeğinin yarı çapını ifade eder. $l \gg 2r, A \approx \pi l^{\,2}$ kabulü yapılarak, süpürme alanı, rüzgâr kanatlarının uzunluğunun iki

katına çıkarılmasıyla dört kata kadar çıkabilir.

2.3. RÜZGÂR TÜRBİNİ ÇEŞİTLERİ

2.3.1. Sabit Hızlı Rüzgâr Türbini

Sabit hızlı rüzgâr türbini, doğrudan şebekeye bağlı bir sincap kafesli endüksiyon generatöründen oluşur [64]. Asenkron generatörün en büyük dezavantajlarından biri, gerekli reaktif gücü elde etmek için bir kapasitör bankasına ihtiyaç duyması, aksi halde gerekli reaktif gücü şebekeden almak zorunda olmasıdır. Sabit hızlı rüzgâr türbinleri basit ve sağlamdır, ancak hız kontrolü kullanılmadığından rüzgâr gücündeki dalgalanmalar üretilen gücü doğrudan etkiler ve gerilim dalgalanmaları nedeniyle güç dalgalanması olduğunda zayıf bir şebekeyi kolayca kararsız hale getirebilir. Bu tür rüzgâr türbinlerinin reaktif güç tüketimi, yüksek gerilim dalgalanmaları nedeniyle şebekenin senkronizasyonunu etkileyebilir ve özellikle hata giderme sonrasında yüksek reaktif güç gerektirebilir [65].

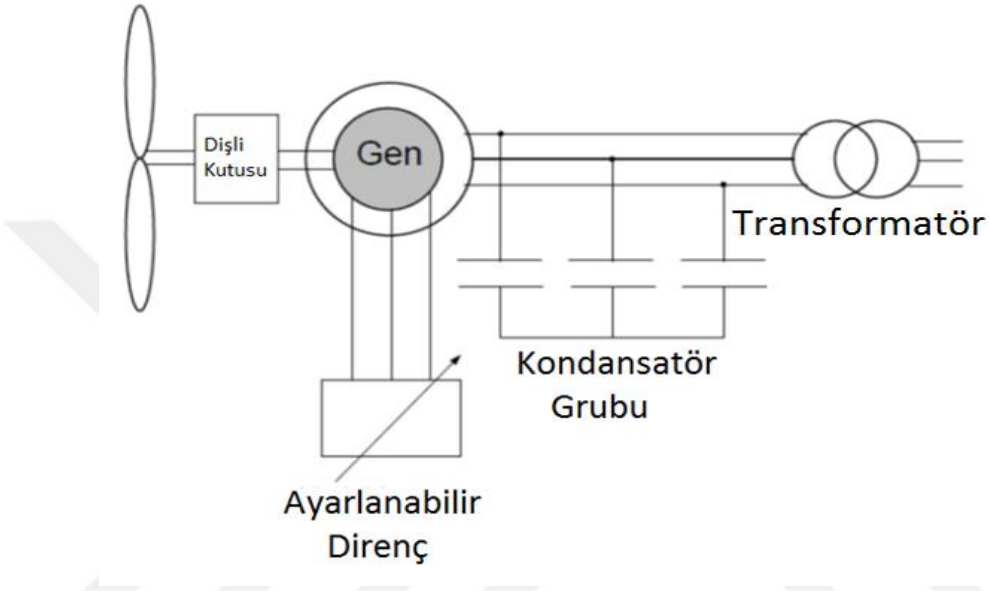


Şekil 2.3. Sabit hızlı rüzgâr türbininin şematik gösterimi.

2.3.2. Değişken Rotor Direncine Sahip Değişken Hızlı Rüzgâr Türbini

Sabit hızlı rüzgâr türbini generatörleri, rüzgâr gücünün en uygun şekilde alınmasını sağlayamaz. Bundan dolayı tüm rüzgâr hızlarına uyumlu değişken hızlı rüzgâr türbinleri ortaya çıkmıştır. Değişken hız üretimi elde etmek için bu tür türbin generatörlerin

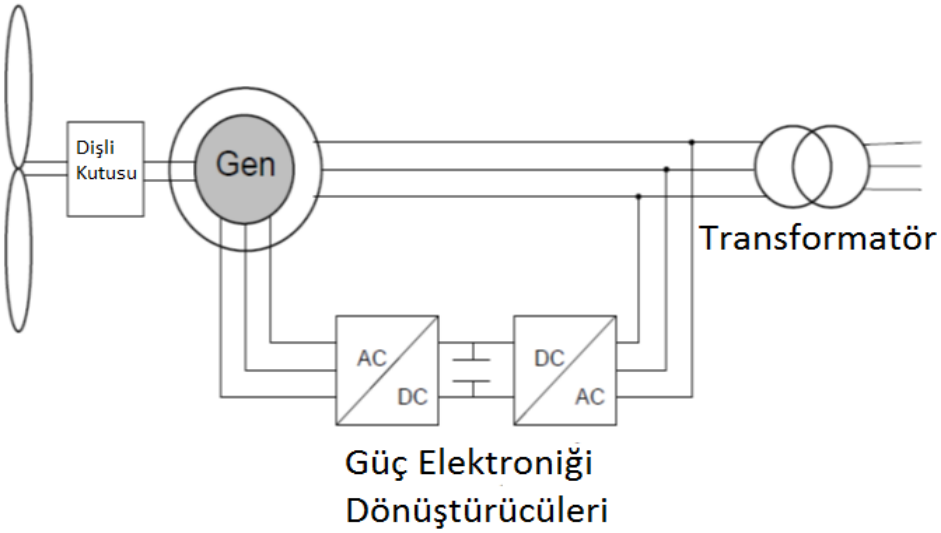
değişken direnç, harici rotorlar ve güç elektroniği aygıtları kullanılarak kayar halkalar aracılığıyla bilezikli rotor endüksiyon generatörünün rotoruna entegre edilir ve doğrudan şebekeye bağlanır [66]. Reaktif güç hala bu rüzgâr generatörü tarafından emilmektedir ve dolayısıyla burada ayrıca rotor endüksiyon makinesi için reaktif güç sağlamak üzere bir kapasitör bankı kullanılmaktadır. Değişken hız, senkron hızından %10 daha yüksek bir hız değişimine kadar kısa bir aralıkta rotor direnci değiştirilerek elde edilir.



Şekil 2.4. Değişken rotor direncine sahip değişken hızlı rüzgâr türbini şematik gösterimi.

2.3.3. Değişken Hızlı Çift Beslemeli Endüksiyon Generatörlü Rüzgâr Türbini

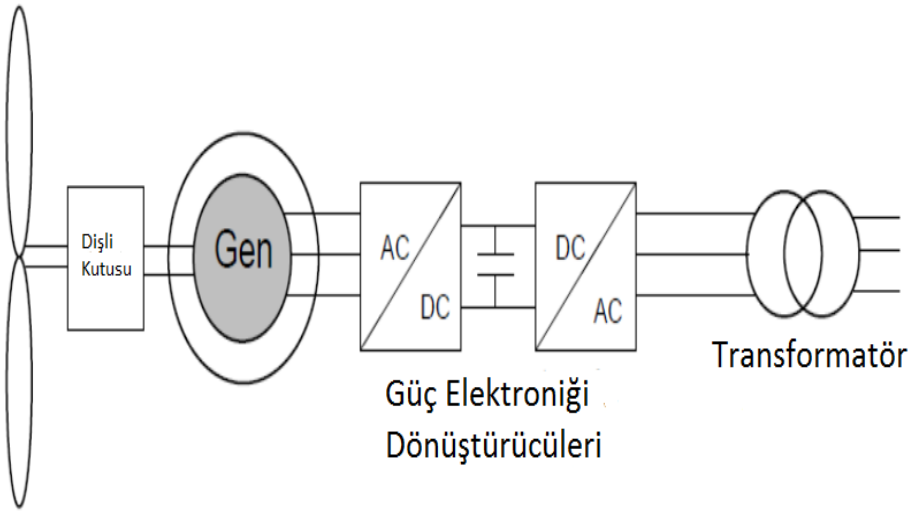
Değişken hızlı üretim tekniğinin uygulanması, daha gelişmiş güç üretim sistemleri arayışına yol açmıştır ve bu nedenle çift beslemeli endüksiyon generatörü (ÇBAG) bir rüzgâr generatörü olarak yerini almıştır. ÇBAG, rotor ve statora harici olarak bağlanan ek güç elektroniği kurulumuna sahip geleneksel bir halka rotorlu asenkron generatördür [66]. Rotor devresine erişmek için kayma halkaları kullanılır. Stator devresi, tipik olarak 0,6KV (1KV'nin altında) olan şebekeye doğrudan bağlıdır. AC-DC-AC dönüştürücü, besleme gerilimini düzeltir ve ardından uyarma için rotora beslenen AC gerilimine dönüştürür. Bu nedenle, ÇBAG, tek kafesli bir indüksiyon generatöründen farklı olarak bağımsız olarak uyarılmış bir generatör gibidir. ÇBAG rüzgâr generatörünün tam dönüştürücülü değişken hızlı rüzgâr türbinine kıyasla en önemli avantajlarından biri, güç dönüştürücülerinin değerinin nominal gücün sadece %20-30'u kadar olmasıdır.



Şekil 2.5. Değişken hızlı çift beslemeli endüksiyon generatörlü rüzgâr türbini şematik gösterimi.

2.3.4. Tam Dönüştürücülü Değişken Hızlı Rüzgâr Türbini

Generatör doğrudan bir tam güç dönüştürücüsü üzerinden şebekeye bağlanır. Herhangi bir kontrol için geri besleme döngüsü olmadığından, generatör teknolojilerinin herhangi biri generatör olarak kullanılabilir [66]. Generatör ve şebeke arasındaki gerilim kaynağı dönüştürücüsüne tam güç vererek, generatör frekansı şebeke frekansından bağımsızdır. Bu tür rüzgâr türbini generatörünün ana dezavantajlarından biri, güç elektroniği cihazlarının tam güçte boyutlandırılması gerekmektedir. Buda çok maliyetli olmaktadır.



Şekil 2.6. Tam dönüştürücülü değişken hızlı rüzgâr türbini şematik gösterimi.

2.4. RÜZGÂR TÜRBİNİ GENERATÖRLERİNİN GÜÇ SİSTEMLERİNİN PERFORMANSINA ETKİSİ

Büyük ölçekli rüzgâr çiftliklerini şebekeye entegre ederken önemli bir konu, sistem kararlılığı üzerindeki etkileridir. Sistem kararlılığı, büyük ölçüde, iletim hatlarının açılması, üretim kapasitesi kaybı (generatör ünitesi arızası) ve kısa devreler gibi bir ağdaki güç sistemi arızalarıyla ilişkilidir. Bu arızalar güç dengesini (aktif ve reaktif) bozar ve güç akışını değiştirir. Çalışan generatörlerin kapasitesi yeterli olsa da aniden büyük gerilim düşüşleri meydana gelebilir. Şebekedeki gerçek ve reaktif gücün dengesizliği ve yeniden dağılımı, gerilimi kararlılık sınırlarının ötesine geçmeye zorlayabilir. Bir düşük gerilim periyodu meydana gelebilir ve bunu muhtemelen tam bir güç kaybı takip edebilir.

Güç sistemi arızalarında meydana gelen arızalar, iletim sisteminin röle hareketi ile ya bağlantı kesme ya da bağlantı kesme ve hızlı tekrar kapama ile temizlenir. Tüm bu durumlarda sonuç, düşük gerilimli veya gerilimsiz kısa bir süre ve ardından gerilimin geri döndüğü bir süre olur. Yakındaki rüzgâr çiftliği bu etkinliği görecektir.

Rüzgâr enerjisinin gelişiminin ilk günlerinde sadece birkaç rüzgâr türbini şebekeye bağlıyken hattaki bir arıza, rüzgâr türbinindeki gerilimin düşmesine neden olduğunda, rüzgâr türbini basitçe şebekeden ayrılır ve arıza giderildiğinde ve gerilim normale döndüğünde yeniden bağlanır. İlk zamanlarda rüzgâr enerjisinin etkinliği düşük olduğundan, bir rüzgâr türbininin veya hatta bir rüzgâr çiftliğinin şebekeden aniden

kesilmesi, güç sisteminin stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye neden olmaz.

Rüzgâr enerjisinin artan etkinliği ile bir rüzgâr çiftliği tarafından üretilen gücün katkısı önemli olabilir. Tüm rüzgâr çiftliğinin tam üretimde aniden bağlantısı kesilirse, sistem daha fazla üretim kapasitesini kaybeder. Geriye kalan işletmedeki enerji santralleri, kaybı çok kısa bir süre içinde yerine koymak için yeterli "dönme rezervine" sahip olmadıkça, büyük bir frekans ve gerilim düşüşü meydana gelecek ve muhtemelen bunu tamamen güç kaybı izleyecektir. Bu nedenle, yeni nesil rüzgâr türbinlerinin, arızalar ve arızalar sırasında şebekeden tamamen kopmayı önlemek için geçebilmesi gerekmektedir. Sistemin kararlılığını korumak için, rüzgâr türbininin uygun bir şekilde ve uygun zamanda normal çalışmasına dönmesini sağlamak gerekir. Bu, farklı rüzgâr türbini teknolojilerinde farklı odaklara sahip olabilir ve sistem geriliminin ara yüz güç elektroniği, SVC, STATCOM gibi reaktif güç kompanzasyon cihazlarıyla desteklenmesini ve gücü düzenleyerek generatörü uygun hızda tutmayı vb. içerebilir [67].

Yüksek kazançlı ve hızlı tepki sürelerine sahip uyarma sistemleri, geçici stabiliteye (senkronize tork) büyük ölçüde yardımcı olur, ancak aynı zamanda küçük sinyal stabilitesini de (sönümleme torku) azaltabilir. Güç sistemi stabilizatörü (PSS) kontrolü, rüzgâr türbini içeren güç sisteminde geniş bir frekans aralığında bulunan generatör rotor açısı salınımlarını sönümleyerek pozitif katkı sağlar. Bunlar, düşük frekanslı ara modlardan (tipik olarak 0,1-1,0 Hz), yerel modlara (tipik olarak 1-2 Hz), tesis içi modlara (yaklaşık 2-3 Hz) kadar değişir. Genellikle düşük frekans modları, birbirine bağlı sistemdeki diğer gruplara karşı sallanan uyumlu generatör gruplarından kaynaklanır. Bu modlar, birbirine bağlı tüm sistemlerde mevcuttur ve sönümleme, bağlantı hattı kuvvetinin ve birim yükleme faktörlerinin bir fonksiyonudur. Hat kesintileri ve ağır sistem yüklerinden kaynaklanan zayıf bağlar, zayıf sönümlü ara modlara yol açabilir. PSS kontrolü, güç salınım modlarına katılan çoğu birime dengeleyiciler uygulayarak genel olarak ara mod sönümlemesinde önemli iyileştirmeler sağlayabilir. PSS performansı genellikle, generatörün güç sisteminin geri kalanına karşı sallanan yerel modun sönümlenmesinden değerlendirilir. Bu mod genellikle 1 ile 3 Hz arasındaki frekanslardadır. Daha güçlü sistem bağları ve daha hafif yükleme, daha yüksek yerel mod frekansları verme eğilimindedir ve daha zayıf bağlar ve daha ağır yükleme, daha düşük yerel mod frekansları verme eğilimindedir. PSS performansı, farklı çalışma koşullarından (hizmet dışı hatlar ve değişen yük seviyeleri gibi) kaynaklanabilecek çok çeşitli sistem koşullarında kabul edilebilir performans sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır.

Rüzgâr türbinlerindeki teknolojik ilerlemeyle birlikte rüzgâr türbini kapasitesi artmakta ve giderek daha fazla büyük ve orta ölçekli rüzgâr çiftlikleri inşa edilmekte ve şebeke işletimine alınmakta, ancak rüzgâr enerjisinin belirsizliği yüksektir, bu da çıkış gücünün eskisi gibi olmamasına neden olacaktır. Geleneksel termal güç ve hidroelektrik kadar kararlı değildir. Elektrik şebekesine bağlı rüzgâr enerjisi kapasitesi arttığında, bu belirsizlik elektrik şebekesinin normal işleyişi üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olacak ve hatta elektrik şebekesinin güvenli ve istikrarlı çalışmasını tehdit edecektir. Bu nedenle, rüzgâr enerjisi sisteminin küçük sinyal kararlılık analizi çalışması büyük önem taşımaktadır [68].

Genel olarak, 0,1 ve 2,0 Hz arasında düşük frekanslı salınımlara sahip güç salınımlarının sönümlenmesi, yani yerel ve alanlar arası salınımlar, çeşitli yükleme ve üretim koşullarından, hat kesintisi beklenmedik durumlarından vb. etkilenir [1]. Etkili karşı önlemler olmadan, sönümlenmemiş güç salınımları kararsız bir sisteme yol açabilir ve geniş alan karartmasına neden olabilir. Güç salınımlarını bastırmak için en uygun maliyetli cihazlar olan güç sistemi stabilizatörleri (PSS'ler) uzun süredir kullanılmaktadır. Bir PSS, bir senkron generatörün otomatik gerilim regülatörü (AVR) ile donatılmıştır. AVR'ye stabilize edici bir sinyal ekleyerek PSS, geleneksel güç sistemlerinde yerel ve alanlar arası salınım problemini çözmek için etkin bir şekilde uygulanabilir [1]. Günümüzde rüzgâr enerjisi üretiminin yaygınlığı, bol, sürdürülebilir ve çevre dostu olması nedeniyle güç sistemlerinde yaygın olarak artmaktadır [69].

Rüzgâr türbinleri arasında, çift beslemeli endüksiyon generatörü (ÇBAG), rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. ÇBAG rüzgâr türbini, değişken rüzgâr hızlarıyla maksimum güç üretebilir. Ayrıca dönüştürücünün düşük güç değeri, düşük kayıp ve yüksek verim gibi birçok avantajı vardır [70]. ÇBAG'nin göze çarpan özelliği, aktif ve reaktif güç çıkışı kontrolleri yeteneğidir. ÇBAG kullanılan bir güç sistemi PSS ile donatıldığında rüzgâr türbinlerinde yaygın problemlerden biri olan salınımlar daha kolay bastırılabilmektedir [69]. Bu sayede sistemin normal yüklü durumunda aşma, yerleşme süresi ve düşük frekanslı salınımlar büyük ölçüde azaltılmış olur.

3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK

Günümüzde elektrik güç sistemleri çok hızlı bir şekilde dönüşümler gerçekleştirmektedir. Bu dönüşümler politik, ekonomik, çevresel ve güvenirlilik gibi endişeler üzerine kuruludur [71]. Modern güç sistemlerinin karmaşıklığı sistemin kararlılığı için yeni tekniklerin geliştirmesini gerektirmektedir [72]. Güç sistemleri sürekli, stabil bir gerilim değerinde çalışan bir güç kaynağı sağlamak için tasarlanmıştır [73]. Bir güç sisteminin denge durumunda kalabilmesi için bozucu kuvvetlere karşı eşit veya daha fazla bir kuvvet uygulaması durumudur kararlılık, sistem bozucu bir etki altında kaldıktan sonra senkron makinaların senkronizmadan çıkmadan kalabilmesi kararlı kalma durumu olarak ifade edilir [74]. Bundan dolayı elektrik güç sistemlerinin kararlılık analizi çok önemli bir yere sahiptir. Güç sistemleri tek makinalı olabildiği gibi birden fazla makinalıda olabilmektedir. Büyük güç sistemlerine bakıldığında bunlar karmaşık birden fazla makinalı sistemlerdir [75]. Bu tür sistemlerin kararlılık analizi de önem arz etmektedir.

Kararlılık analizi; küçük işaret veya sürekli hal kararlılığı, geçici hal kararlılığı ve dinamik hal kararlılığı olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır [76]. Sürekli hal kararlılığı; sürekli olarak küçük şiddette bozucu etkilere maruz kalan sistemin senkronizmada kalmasını irdeler. Dinamik hal kararlılığı ise mekanik regülatörlerinde devreye girdiği sistemin birkaç dakikalık süredeki senkronizmada kalma durumunu inceler [76]. Bu çalışmada rotor açısı kararlılığı olarak da bilinen geçici hal kararlılığı üzerinde durulmuştur [77]. Geçici hal kararlılığı; faz-toprak, faz-faz-toprak ve üç faz kısa devresi gibi şiddetli bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra sistemin senkronizmada kalma kararlılığını irdelemektedir.

Geçici hal kararlılığı analizinde önemli bir parametre olan salınım denklemlerinin incelenmesi ve analizi önemlidir. Bu denklem sistemin elektriksel tork ve mekaniksel torkun dengesi durumunu ifade etmek için kullanılır [78]. Salınım denklemi lineer olmayan ikinci dereceden bir diferansiyel denklemdir. Bundan dolayı denklemin çözümü çeşitlilik arz eden nümerik metotlarla gerçekleştirilir. Bu çalışmada salınım denkleminin çözümü Euler metoduyla gerçekleştirilmiştir. Elektrik güç sisteminin geçici hal kararlılığı analizi ve salınım denkleminin Euler metoduyla çözümü 1996 yılında Power World Corporation tarafından kurulan bir simülatör programı olan Power World ile gerçekleştirilmiştir [79].

Bu çalışmada sistemin geçici hal kararlılığı analizi sistemin maruz kaldığı üç faz arıza durumunda generatörlerin rotor açıları kontrol edilerek kritik temizlenme süresi belirlenmiş ve sistemin H sabitinin bu süreye etkisi incelenerek yapılmıştır. Buna ek olarak; generatörlerin hızlarının ve senkron reaktansının zamana göre değişiminin incelenmesi de elektrik güç sisteminin geçici hal kararlılık analizi için önemli bilgiler vermiştir.

Güç sistemlerinde kararlılık sistemin maruz kaldığı arıza durumundan sonra yeniden sistem elemanlarının senkron durumunda kalmasıdır [2]. Sistemin kararlılığı üretilen elektriksel güç ile mekaniksel gücün denge durumunda olmasına bağlıdır. Elektriksel değişimler mekaniksel değişimden önde gitmektedir bundan dolayı sistemin senkron halden çıkmaması için ihtiyaç duyulan zamanı sağlamaktadır. Bu süre zarfında dışardan müdahalelerle sistem kararlılığı sağlanmaz ise sistem kararsız duruma girer ve sistemde istenmeyen arızalar oluşur bununda maliyet kaybı yüksek olmaktadır.Bundan dolayı sistemin kararlılık analizi oldukça önem arz etmektedir.Sistem kararlılığı problemleri genellikle iki ana kategoriye ayrılmaktadır.Birincisi kararlı hal analizi ikincisi ise geçici hal kararlılığı analizidir [80].

Birinci analizde sistemin karşılaşabileceği küçük arızalarda örneğin yavaşça artan güç değişikliklerinde sistemin kararlılığını bu uzun ama küçük değişikliklerde nasıl koruyacağı üzerine yapılan analizdir. Geçici hal kararlılık analizi ise güç sisteminde karşılaşılan daha büyük arızaların örneğin büyük güç değişimleri yada ani etkiler örneğin bir hattın kopması veya bir yükün atılması gibi durumlarda sistemin kararlı kalması analizidir [74]. Bu kararlılık analizleri salınım denkleminin analizleriyle mümkündür.

Bu analizler literatürde şu çalışmlarla gerçekleştirilmişti. Senkron halde çalışan generatörlerin geçici hal karalılığını rotor açısı kararlılığı şeklinde bu [81] çalışmada ele almışlardır.Yapılan bu çalışmada temizlenme zamanının kesicilerle rotor açısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonsuz baralı tek makinalı bir güç sisteminin dinamik analizin gerçekleştirilmeside [82] bu çalışmada gerçekleştirlmiştir.

Namdev ve ark. [83] güç sistemlerinin kararlılık analizini ateş böceği algoritması kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bunun yanında Padhi ve ark. [84] çeşitli nümerik analizlerle tek makinalı sistemin geçici hal karalılığını gerçekleştirmişlerdir. Geçici hal

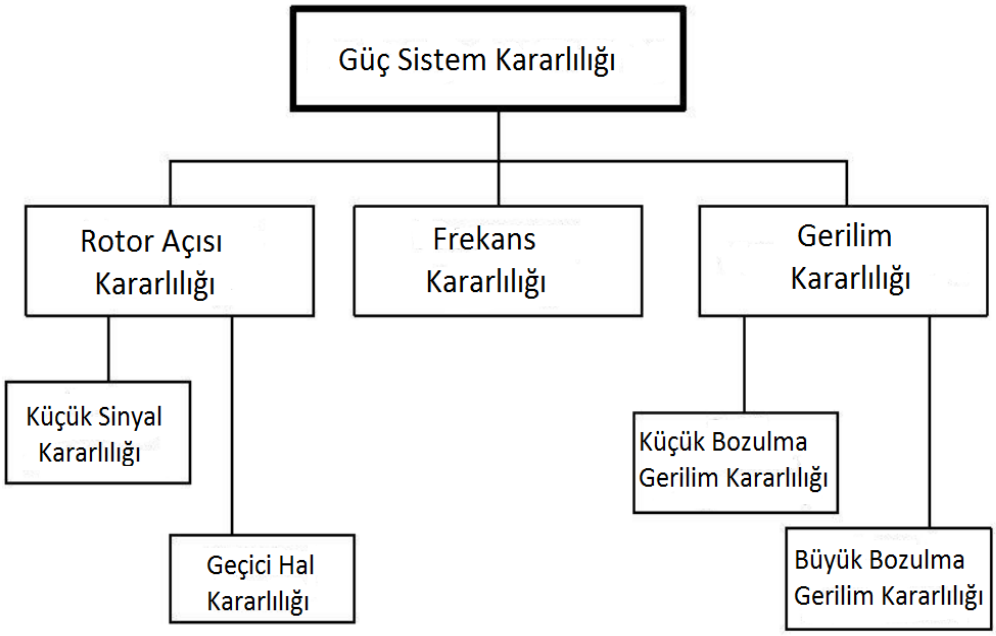
karalılığını sonsuz baralı tek makinalı sistemlerde nümerik analizide bu [83] çalışmada gerçekleştirlmştir.

Salınım denklemi lineer bir denklem değildir bundan dolayı bu denklemin nümerik çözümü aranmaktadır. Bu nümerik çözümler çeşitlilik göstermektedir. Euler metoduda bunlardan biri olup en etkili metodlar arasındadır.

Bu çalışmamızda Euler metodu kullanılarak güç sisteminin kararlılık analizi yapılmıştır.Matlab 2016a ile yapılan analizden elde edinilen sonuçlarla kararlılık analizinin bu metodla çok daha kolay ve hızlı bir şekilde yapıldığı görülmüştür.

3.1. GÜÇ SİSTEMİ KARARLILIĞININ SINIFLANDIRILMASI

Güç sistemi kararlılığı, sistemin normal çalışma koşullarında kalma durumunu ve bozucu bir etki ile karşılaştığında sistemin normal çalışma koşullarına dönmesi olarak ifade edilir [74]. Sistemin kararlı çalışabilmesi için giriş ve çıkış enerjilerinin birbirine eşit olması gereklidir Mekaniksel giriş enerjisi ile elektriksel çıkış enerjisi birbirine eşit durumda iken yani rotor açısal hızı stabil durumda iken sistem kararlı durumdadır [78]. Güç sistemleri için mekanik giriş enerjisi, senkron generatöre etkiyen tahrik sistemlerinden elde edilen mekanik enerji olup; elektriksel çıkış enerjileri ise, sisteme bağlı olan elektriksel yüklerle ilişkilidir. Güç sistem kararlılığı üç şekilde irdelenir; rotor açısı kararlılığı, frekans kararlılığı ve son olarak gerilim kararlılığıdır [1].



Şekil 3.1. Güç Sistemi Kararlılığının Sınıflandırılması.

3.1.1. Rotor Açısı Kararlılığı

Rotor açısı kararlılığı, güç sistemi içindeki senkronize makinelerin karşılaştıkları arızadan sonra bile senkronizasyonu sürdürme kabiliyetidir [1]. Çalışma yöntemi, her bir makinenin rotor açısı değişiminin birbirine göre analizini içerir. Senkron makinenin detaylı bir şekilde anlaşılması, rotor açısı salınımlarına göre güç çıkışı değişikliklerini göstermek için gereklidir.

Rotor açısı, statorun dönen manyetik alanındaki sabit referanslar arasındaki dönen şaft arasındaki göreceli açıdır. Güç girişi değiştiğinde, generatör ucunda sabit bir yüke maruz kalan rotor açısında eşit bir değişiklik olur veya generatörün güç çıkışının rotor açısına bağlı olduğunu söyleyebiliriz. Sistem bozulmaya uğradığında, makineden biri rotor açısı bozulmasına bağlı olarak yavaşlar veya hızlanır.

Makineler arasında ortaya çıkan açısal fark, makinalar arasında yeniden yükleme yükü yavaş makineden hızlı makineye doğru olacak şekilde oluşmaya neden olacaktır. Bu hızlı makinenin gücünü azaltır ve sonunda sistem başka bir denge noktasında stabil hale gelir. Ancak bazen hız farkı o kadar yüksektir ki, güç aktarımı yavaş yavaş azalır ve makine senkronizasyonunu kaybeder.

Rotor açısı kararlılığı iki başlık altında irdelenir ve çalışmaya konu olan analiz de -geçici hal kararlılığı- bunlardan biridir. Bu analizler; küçük sinyal kararlılığı ve geçici hal kararlılığıdır. Geçici hal kararlılığı analizi sistemin şiddetli bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra sistemin senkronizmada kalıp kalmadığını analiz eder. Sistemdeki bozucu etki bir üç faz arızası olabilir. Bu şiddetli bozucu etkide sistemin generatörlerinin rotor açılarında büyük titreşimler meydana gelir. Güç sisteminde geçici hal kararlılığı analizi generatörlerin rotor açılarına bakılarak gerçekleştirilebilmektedir. Buna ek olarak da generatörlerin hız değişimi de geçici hal karalılığı analizinde önemli bilgiler vermektedir. Geçici hal karalılığı analizi genellikle 3-5 saniye arasındaki analizi olarak bilinir. Bu zaman aralığı sistemin büyüklüğüne göre değişkenlik gösterebilmektedir.

3.1.2. Küçük Sinyal Kararlılığı

Küçük bozulma (veya küçük sinyal) rotor açısı kararlılığı, güç sisteminin küçük bozulmalar altında senkronizasyonu sürdürme yeteneği ile ilgilidir. Bozulmaların, analiz amaçları için sistem denklemlerinin doğrusallaştırılmasına izin verecek kadar küçük olduğu kabul edilir.

Küçük bozulma kararlılığı, sistemin ilk çalışma durumuna bağlıdır. Ortaya çıkabilecek istikrarsızlık iki şekilde olabilir:

- Senkronlama torku eksikliği nedeniyle salınımsız veya periyodik olmayan modda rotor açısında artış.
- Yeterli sönümleme torku olmaması nedeniyle artan genlikte rotor salınımları.

Günümüzün güç sistemlerinde, küçük bozulmalı rotor açısı kararlılık problemi genellikle yetersiz salınım sönümlenmesi ile ilişkilidir. Periyodik kararsızlık sorunu, sürekli hareket eden generatör gerilim regülatörlerinin kullanılmasıyla büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır; bununla birlikte, generatörler, uyarma sınırlayıcılarının (alan akımı sınırlayıcıları) eylemlerine maruz kaldıklarında sabit uyarı ile çalıştığında bu sorun yine de ortaya çıkabilir.

Küçük bozulmalı rotor açısı stabilite sorunları, doğası gereği yerel veya küresel olabilir. Yerel problemler, güç sisteminin küçük bir bölümünü içerir ve genellikle tek bir enerji santralinin güç sisteminin geri kalanına karşı rotor açısı salınımları ile ilişkilidir. Bu tür salınımlara yerel işletme modu salınımları denir. Bu salınımların kararlılığı

(sönümlenmesi), santral, generatör uyarma kontrol sistemleri ve santral çıkışı tarafından görüldüğü gibi iletim sisteminin gücüne bağlıdır [1].

Küresel sorunlara, büyük üretici grupları arasındaki etkileşimler neden olur ve yaygın etkileri vardır. Bir alandaki bir grup generatörün, başka bir alandaki bir grup generatöre karşı sallanan salınımlarını içerirler. Bu tür salınımlara alanlar arası mod salınımları denir. Özellikleri çok karmaşıktır ve yerel işletme modu salınımlarından önemli ölçüde farklıdır. Özellikle yük özellikleri, alanlar arası modların kararlılığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Küçük bozulma kararlılığı çalışmalarında ilgilenilen zaman çerçevesi, bir bozulmayı takiben 10 ila 20 saniye mertebesindedir.

3.1.3. Geçici Hal Kararlılığı

Büyük bozulma rotor açısı kararlılığı veya genel olarak ifade edildiği gibi geçici hal kararlılığı, bir iletim hattındaki kısa devre gibi ciddi bir bozulmaya maruz kaldığında güç sisteminin senkronizasyonu sürdürme yeteneği ile ilgilidir. Ortaya çıkan sistem yanıtı, generatör rotor açılarında büyük geziler içerir ve doğrusal olmayan güç açısı ilişkisinden etkilenir.

Geçici hal kararlılığı hem sistemin ilk çalışma durumuna hem de bozukluğun ciddiyetine bağlıdır. Kararsızlık, genellikle, ilk salınım kararsızlığı olarak ortaya çıkan, yetersiz senkronizasyon torku nedeniyle periyodik olmayan açısal ayrılma şeklindedir [85]. Ancak, büyük güç sistemlerinde, geçici kararsızlık her zaman tek modla ilişkili ilk salınım kararsızlığı olarak ortaya çıkmayabilir; bu, alanlar arası yavaş salınım modunun üst üste binmesinin ve ilk salınımın ötesinde rotor açısında büyük bir sapmaya neden olan yerel tesis salınım modunun bir sonucu olabilir. Aynı zamanda, ilk dönüşün ötesinde kararsızlığa neden olan tek modu etkileyen doğrusal olmayan etkilerin bir sonucu olabilir.

Geçici stabilite çalışmalarında ilgilenilen zaman çerçevesi genellikle bozulmayı takiben 3 ila 5 saniyedir. Alanlar arası salınımların baskın olduğu çok büyük sistemler için 10-20 saniyeye kadar uzayabilir.

3.2. GERİLİM KARARLILIĞI

Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin, belirli bir başlangıç çalışma koşulundan kaynaklanan bir bozulmaya maruz kaldıktan sonra sistemdeki tüm baralarda sabit gerilimleri koruma yeteneğini ifade eder. Güç sisteminden yük talebi ve yük arzı

arasındaki dengeyi koruma/yeniden kurma yeteneğine bağlıdır. Ortaya çıkabilecek kararsızlık, bazı baraların kademeli olarak düşmesi veya gerilim yükselmesi şeklinde ortaya çıkar. Gerilim kararsızlığının olası bir sonucu, bir alanda yük kaybı veya iletim hatlarının ve diğer elemanların koruyucu sistemleri tarafından kademeli kesintilere yol açmasıdır. Bazı generatörlerin senkronizasyon kaybı bu kesintilerden veya alan akım limitini ihlal eden çalışma koşullarından kaynaklanabilir [86].

Bara gerilimlerinde ki kademeli düşüş, rotor açısı kararsızlığı ile de ilişkilendirilebilir. Örneğin, iki makine grubu arasındaki rotor açıları 180°'ye yaklaştıkça makinelerin senkronizasyonunun kaybolması, şebekede elektrik merkezine yakın olan ara noktalarda gerilimlerde hızlı bir düşüşe yol açacaktır.

Normalde koruyucu sistemler, iki makine grubunu ayırmak için çalışır ve gerilimler, ayırma sonrası koşullara bağlı olarak seviyelere geri döner. Ancak sistem bu şekilde ayrılmazsa, iki makine grubu arasında tekrarlanan 'kutup kaymalarının' bir sonucu olarak elektrik merkezine yakın gerilimler hızla yüksek ve düşük değerler arasında salınır. Buna karşılık, gerilim kararsızlığıyla ilgili sürekli gerilim düşüşünün türü, yükleri içerir ve rotor açısı kararlılığının bir sorun olmadığı durumlarda ortaya çıkabilir.

Gerilim çökmesi terimi de sıklıkla kullanılır. Gerilim kararsızlığına eşlik eden olaylar dizisinin, güç sisteminin önemli bir bölümünde bir kesintiye veya anormal derecede düşük gerilimleri yol açma sürecidir. Düşük gerilimde kararlı (sabit) çalışma, trafo kademe değiştiricileri, bazı yüklerin kasıtlı ve/veya kasıtsız olarak açılmasıyla, yükseltme limitlerine ulaştıktan sonra devam edebilir. Kalan yük, gerilime duyarlı olma eğilimindedir ve normal gerilimde bağlı talep karşılanmaz.

Gerilim kararsızlığının itici gücü genellikle yüklerdir; bir bozulmaya tepki olarak, yükler tarafından tüketilen güç, motor kayma ayarının, dağıtım gerilimi düzenleyicilerinin, kademe değiştirme transformatörlerinin ve termostatların eylemiyle geri yüklenme eğilimindedir. Geri yüklenen yükler, reaktif güç tüketimini artırarak ve daha fazla gerilim düşüşüne neden olarak yüksek gerilim şebekesindeki stresi artırır. Yük dinamikleri, iletim ağının ve bağlı neslin kapasitesinin ötesinde güç tüketimini geri yüklemeye çalıştığında, gerilim dengesizliğine neden olan bir çalışma durumu oluşur [87].

Gerilim kararsızlığına katkıda bulunan önemli bir faktör, iletim şebekesinin endüktif reaktanslarından aktif ve reaktif güç akışı sırasında meydana gelen gerilim düşüşüdür; bu, güç aktarımı ve gerilim desteği için iletim ağının kapasitesini sınırlar. Güç aktarımı ve

gerilim desteği, bazı generatörler kendi alan veya armatür akımı zaman aşırı yük kapasitesi sınırlarına ulaştığında daha da sınırlandırılır. Bir arıza, reaktif güç talebini mevcut reaktif güç kaynaklarının sürdürülebilir kapasitesinin ötesinde artırdığında, gerilim kararlılığını korumak zorlaşmaktadır.

Gerilim kararsızlığının en yaygın biçimi, bara gerilimlerinin aşamalı düşüşü olmakla birlikte, aşırı gerilim kararsızlığı riski de mevcuttur. Şebekenin kapasitif davranışından ve ayrıca düşük uyarma sınırlayıcılarından, generatörlerin ve/veya senkron kompanzatörlerin aşırı reaktif gücü emmesini engellemesinden kaynaklanır. Bu durumda, kararsızlık, birleşik üretim ve iletim sisteminin belirli bir yük seviyesinin altında çalışamaması ile ilişkilidir. Transformatör kademe değiştiricileri, bu yüklü gücü geri kazanma girişimlerinde uzun süreli gerilim kararsızlığına neden olur [86].

Hem uzun mesafeli hem de arka arkaya uygulamalar için kullanılan Yüksek Gerilim Doğru Akım (YVDA) bağlantılarının terminallerinde gerilim kararlılığı sorunları da yaşanabilir. Genellikle zayıf AC sistemlerine bağlı YVDA bağlantıları ile ilişkilidirler ve doğrultucu veya evirici istasyonlarında meydana gelebilirler ve dönüştürücülerin olumsuz reaktif güç "yük" özellikleri ile ilişkilidirler. AC/DC bağlantısındaki aktif ve reaktif güç kontroller tarafından belirlendiğinden, YVDA link kontrol stratejilerinin bu tür problemler üzerinde çok önemli bir etkisi vardır. Alternatif akım iletiminde ortaya çıkan yükleme, onu kapasitesinin ötesinde zorlarsa, gerilim kararsızlığı meydana gelir. Gerilim kararsızlığı, oldukça yavaş bir olgu olan dönüştürücü transformatör kademe değiştirici kontrolleriyle de ilişkilendirilebilir. YVDA teknolojisindeki son gelişmeler (gerilim kaynağı dönüştürücüler ve kapasitör komütasyonlu dönüştürücüler), zayıf sistemlerde YVDA bağlantılarının kararlı çalışması için limitleri, hat komütasyonlu dönüştürücüler için sınırlarla karşılaştırıldığında önemli ölçüde artırmıştır.

Kontrolsüz aşırı gerilimlere neden olan bir gerilim kararlılığı problemi, senkron makinelerin kendi kendine uyarılmasıdır. Bu, senkron bir makinenin kapasitif yükü çok büyükse ortaya çıkabilir. Kendi kendini uyarmayı başlatabilen aşırı kapasitif yüklerin örnekleri, açık uçlu yüksek gerilim hatları ve şönt kapasitörler ve YVDA istasyonlarından gelen filtre bankalarıdır. Generatörün kapasitif yükündeki değişimden kaynaklanan aşırı gerilimler, değişim anında ani bir artışa ve ardından daha kademeli bir artışa sahiptir. Bu son artış, senkron makinenin uyarma sistemi ile birlikte kapasitif yük bileşeni ve makine reaktansları arasındaki ilişkiye bağlıdır. Uyarıcının negatif alan akımı kapasitesi, kendi kendine uyarım limitleri üzerinde olumlu etkisi olan bir özelliktir. Rotor açısı

kararlılığında olduğu gibi, gerilim kararlılığını [88] aşağıdaki alt kategorilere ayrılmaktadır.

3.2.1. Küçük Bozulma Gerilim Kararlılığı

Küçük bozulma gerilim kararlılığı, sistem yükündeki artımlı değişiklikler gibi küçük bozulmalara maruz kaldığında sistemin sabit gerilimleri koruma yeteneğini ifade eder. Bu stabilite biçimi, belirli bir zamanda yüklerin, sürekli kontrollerin ve ayrık kontrollerin özelliklerinden etkilenir. Bu kavram, herhangi bir anda sistem gerilimlerinin küçük sistem değişikliklerine nasıl tepki vereceğini belirlemede faydalıdır. Uygun varsayımlarla, sistem denklemleri analiz için doğrusallaştırılabilir, böylece kararlılığı etkileyen faktörlerin belirlenmesinde faydalı olan değerli duyarlılık bilgilerinin hesaplanmasına izin verilir. Ancak bu doğrusallaştırma, kademe değiştirici kontrolleri (ölü bantlar, ayrı kademe adımları ve zaman gecikmeleri) gibi doğrusal olmayan etkileri hesaba katamaz. Bu nedenle, tamamlayıcı bir şekilde doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin bir kombinasyonu kullanılır.

3.2.2. Büyük Bozulma Gerilim Kararlılığı

Büyük bozulmalı gerilim kararlılığı, sistem arızaları, üretim kaybı veya devre beklenmedik durumları gibi büyük bozulmaları takiben sistemin sabit gerilimleri koruma yeteneğini ifade eder. Bu yetenek, sistem ve yük özellikleri ve hem sürekli hem de ayrık kontrollerin ve korumaların etkileşimleri tarafından belirlenir. Büyük bozulma gerilim kararlılığının belirlenmesi, motorlar, düşük yük transformatörü kademe değiştiricileri ve generatör alan akımı sınırlayıcıları gibi cihazların performansını ve etkileşimlerini yakalamak için yeterli bir süre boyunca güç sisteminin doğrusal olmayan tepkisinin incelenmesini gerektirir. İlgilenilen çalışma süresi birkaç saniyeden onlarca dakikaya kadar uzayabilir.

3.3. FREKANS KARARLILIĞI

Frekans kararlılığı, bir güç sisteminin, üretim ve yük arasında önemli bir dengesizliğe neden olan ciddi bir sistem bozulmasının ardından sabit frekansı koruma yeteneğini ifade eder. Minimum istenmeyen yük kaybı ile sistem üretimi ve yük arasındaki dengeyi koruma/geri yükleme yeteneğine bağlıdır. Oluşabilecek kararsızlık, üretim birimlerinin

ve/veya yüklerin açılmasına yol açan sürekli frekans salınımları şeklinde meydana gelebilir.

Şiddetli sistem bozulmaları genellikle frekans, güç akışları, gerilim ve diğer sistem değişkenlerinde büyük sapmalara neden olur ve böylece geleneksel geçici kararlılık veya gerilim kararlılığı çalışmalarında modellenmeyen süreçlerin, kontrollerin ve korumaların eylemlerini başlatır. Bu süreçler, kazan dinamiği gibi çok yavaş olabilir veya yalnızca volt/Hertz koruma açma generatörleri gibi aşırı sistem koşulları için tetiklenebilir.

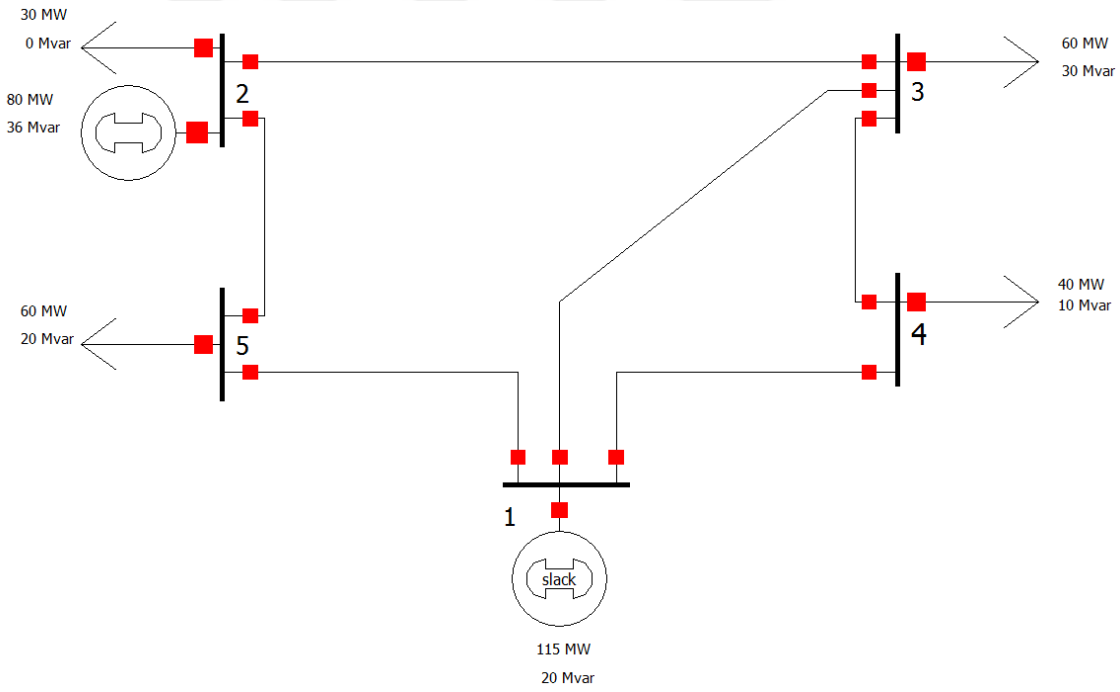
Birbirine bağlı büyük güç sistemlerinde, bu tür bir durum en yaygın olarak sistemlerin adalara bölünmesini takip eden koşullarla ilişkilidir. Bu durumda stabilite, her adanın minimum kasıtsız yük kaybı ile bir çalışma dengesi durumuna ulaşıp ulaşmayacağı sorusudur. Makinelerin göreli hareketinden ziyade ortalama frekansının gösterdiği gibi adanın genel tepkisi ile belirlenir. Genel olarak, frekans kararlılığı sorunları, ekipman yanıtlarındaki yetersizlik, kontrol ve koruma ekipmanının zayıf koordinasyonu veya yetersiz üretim rezervi ile ilişkilidir [89], [90].

Frekans gezileri sırasında, etkinleştirilen işlemlerin ve cihazların karakteristik süreleri, düşük frekanslı yük atma ve generatör kontrolleri ve korumaları gibi cihazların tepkisine karşılık gelen saniyenin bir bölümünden, tepkiye karşılık gelen birkaç dakikaya kadar değişecektir. Ana hareket ettirici enerji besleme sistemleri ve yük gerilim regülatörleri gibi cihazlardan oluşmaktadır. Bu nedenle, frekans kararlılığı kısa vadeli bir durum veya uzun vadeli bir durum olabilir. Kısa vadeli frekans kararsızlığına bir örnek, frekansın hızla azalması ve birkaç saniye içinde adanın karartılmasına neden olacak şekilde yetersiz düşük frekans yük atımına sahip düşük oluşturulmuş bir adanın oluşumudur. Öte yandan, frekans kararsızlığının buhar türbini aşırı hız kontrollerinden veya kazan/reaktör korumasından ve kontrollerinden kaynaklandığı daha karmaşık durumlar, ilgili zaman çerçevesi onlarca saniyeden birkaç dakikaya kadar değişen daha uzun vadeli olaylardır [91].

Frekans gezileri sırasında, özellikle sistemi boşaltan düşük frekanslı yük atma ile ada koşulları için gerilim büyüklükleri önemli ölçüde değişebilir. Frekans değişikliklerinden yüzde olarak daha yüksek olabilen gerilim büyüklüğü değişiklikleri, yük oluşturma dengesizliğini etkiler.

3.4. RÜZGAR TÜRBİNİ ÇEŞİTLERİNİN GEÇİCİ HAL KARARLILIKLARININ ANALİZİ

Örnek güç sistemimiz 5 baralı 4 yüklü ve 2 generatörlü sistem Şekil 3.2' de görülmektedir. Bu sistem Power World Simülasyon programında gerekli sistem değerleri girilerek oluşturulmuştur. Power World Simülatörü, birkaç dakika ile birkaç gün arasında değişen bir zaman diliminde yüksek voltajlı güç sisteminin çalışmasını simüle etmek için tasarlanmış etkileşimli bir güç sistemi simülasyon paketidir. Yazılım, 250.000 baraya kadar sistemleri verimli bir şekilde çözebilen oldukça etkili bir güç akışı analiz paketi içerir. Örnek çok makinalı güç sisteminde 1. bara da 1.saniyede 0,2 saniye süren bir üç faz arızası oluşturulmuştur. Örnek güç sisteminde rüzgâr türbini generatörlerinin kullanılmasıyla her bir türbin generatörü için geçici hal kararlılığı analizleri sırasıyla verilecektir.

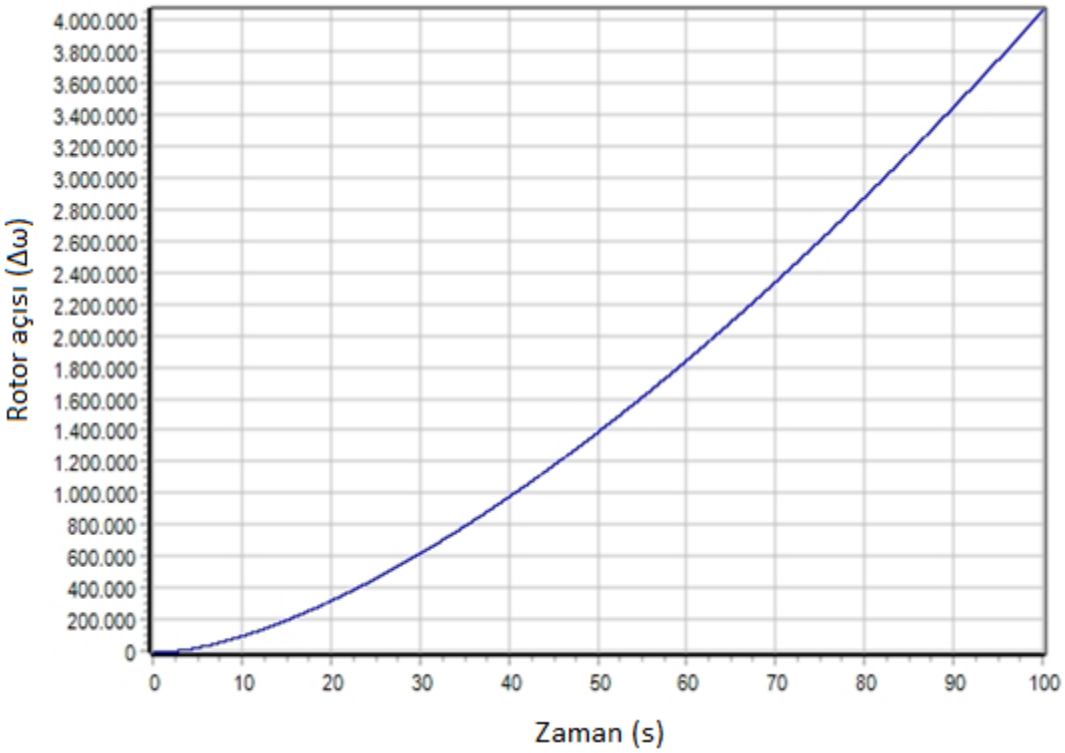


Şekil 3.2. Rüzgâr türbini içeren örnek bir güç sistemi.

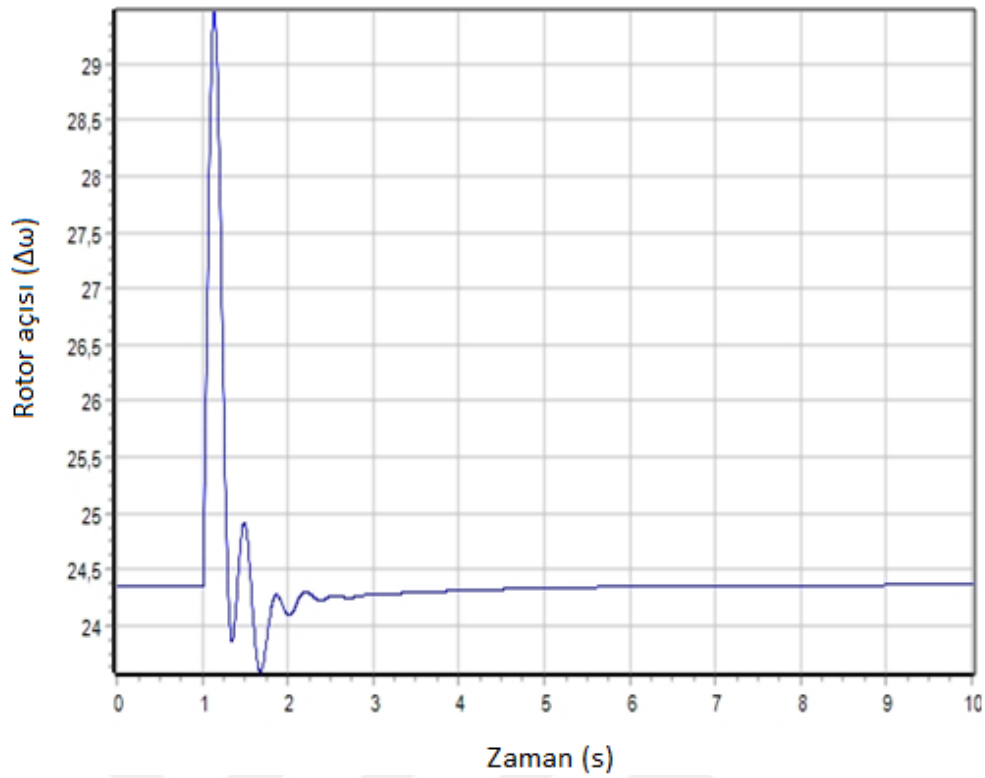
3.4.1. Sabit Hızlı Rüzgâr Türbini

Örnek güç sisteminde sabit hızlı rüzgâr türbini generatör kullanıldığında kritik temizlenme süresi 0,02 saniye olarak hesaplanmıştır. Kritik temizlenme süresi aşıldığında yani hata temizlenme süresinin 0,02 saniye sonrasına bırakıldığında sistemin Şekil 3.3'te senkronizmadan çıktığı görülmüştür. Şekil 3.4'te kritik temizlenme süresinden önce

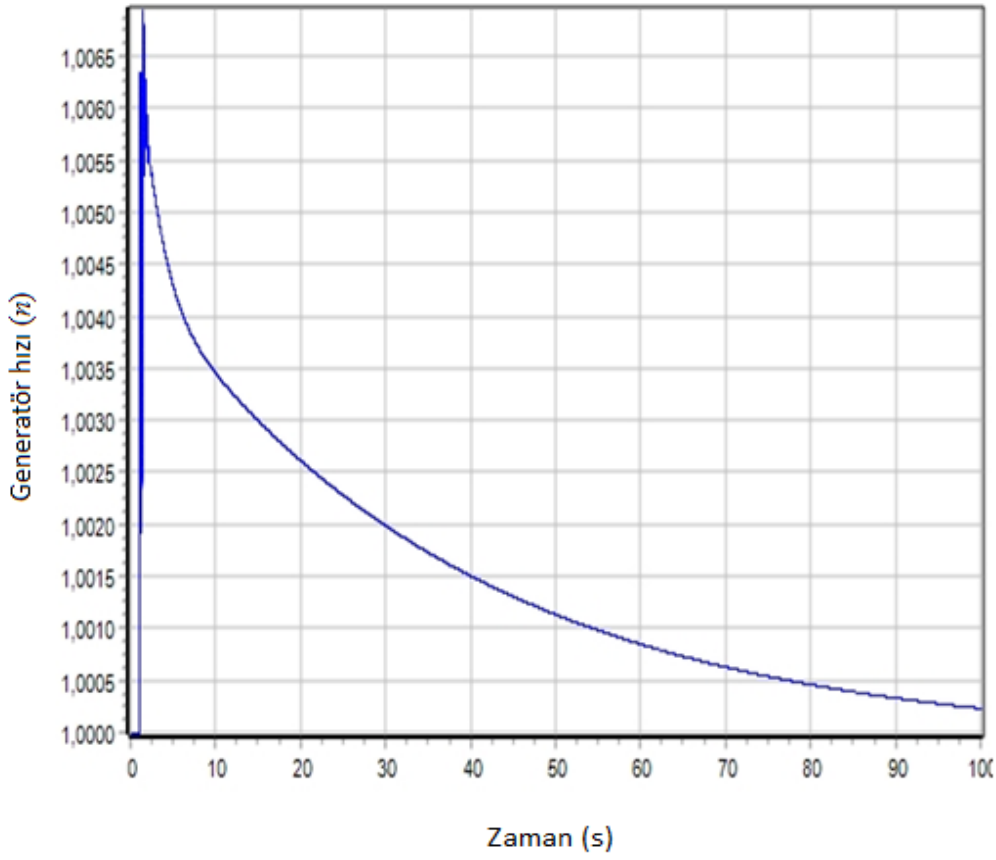
müdahale edildiğinde sistemin senkronizmada kaldığı görülmektedir. Generatör hızının değişimi de Şekil 3.5'te verilmektedir.



Şekil 3.3. Rotor açısının zamana göre değişimi.



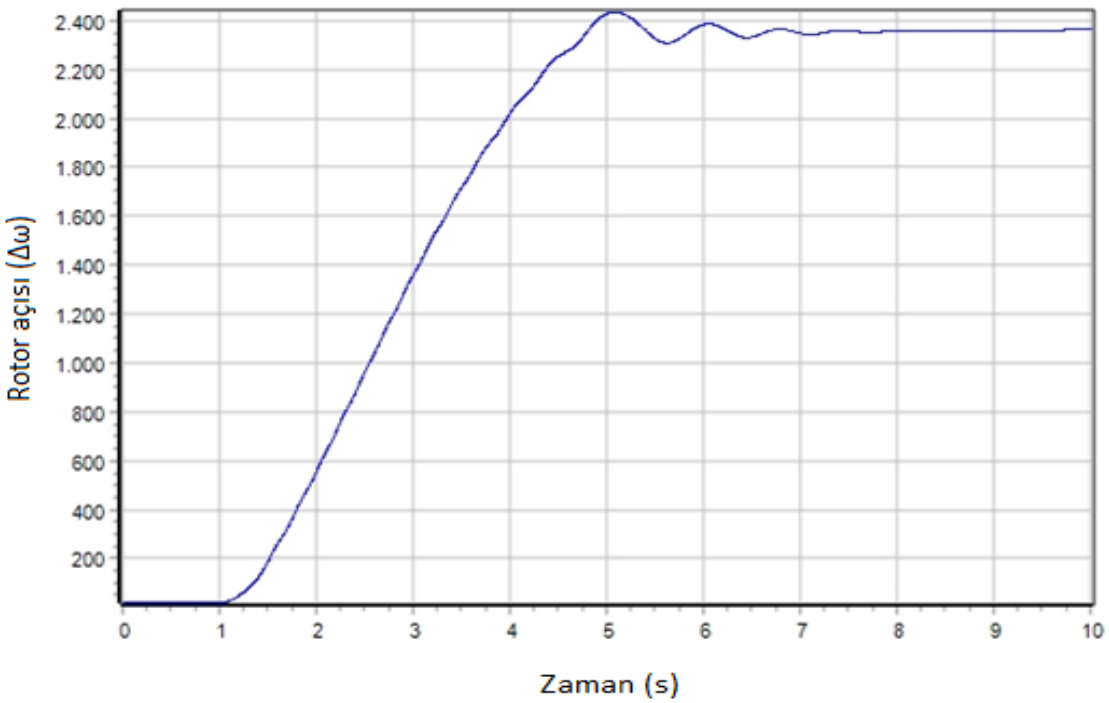
Şekil 3.4. Rotor açısının zamana göre değişimi.



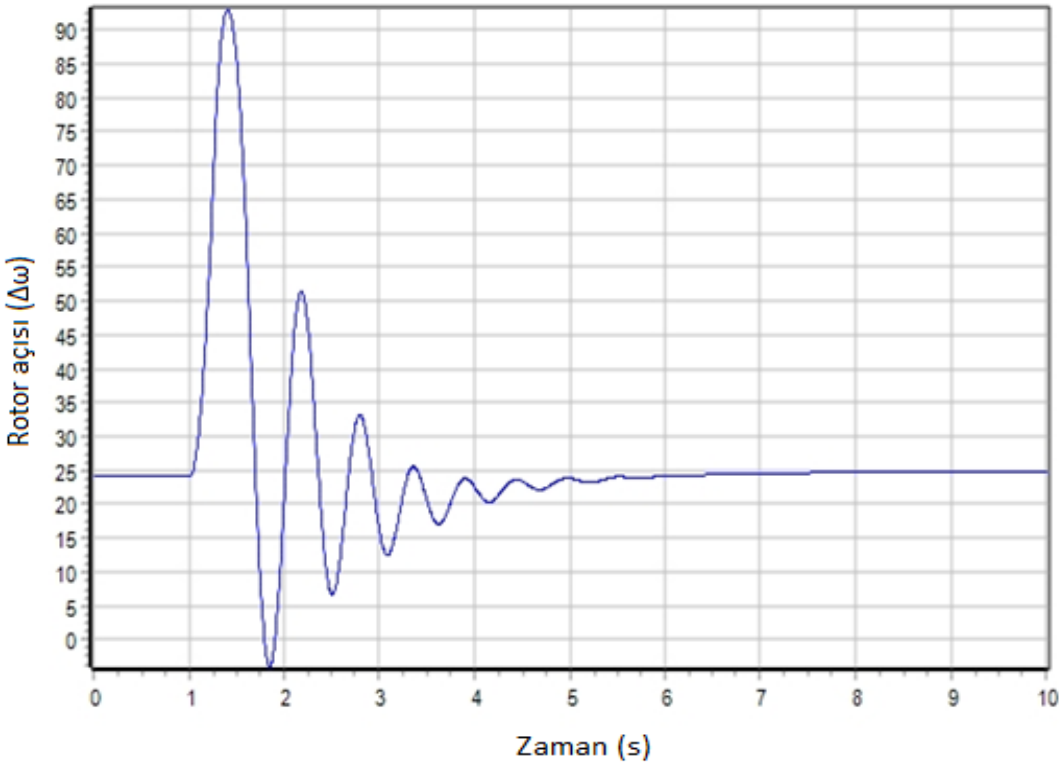
Şekil 3.5. Generatör hızının zamana göre değişimi.

3.4.2. Değişken Rotor Direncine Sahip Değişken Hızlı Rüzgâr Türbini

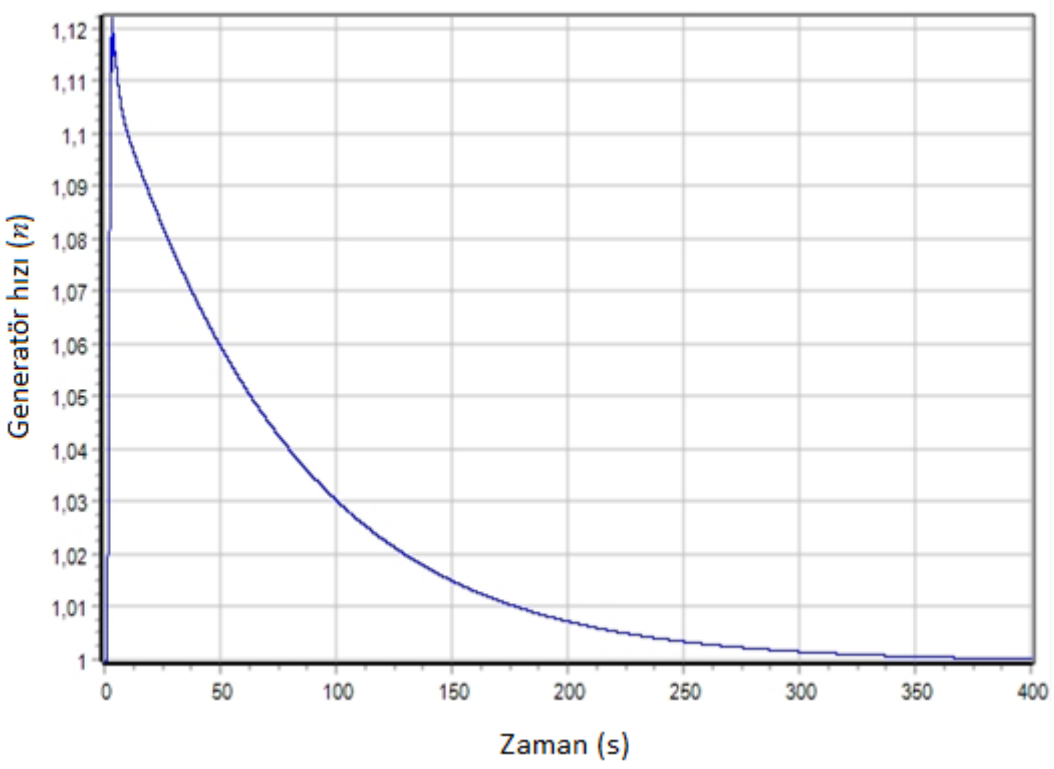
Değişken rotor direncine sahip değişken hızlı rüzgâr türbini generatörü için kritik temizlenme süresi 0,25 saniye olarak hesaplanmıştır. Bu sürenin üzerindeki müdahalelerde sistem senkronizmadan çıkmaktadır. Sabit hızlı rüzgâr türbini generatörün aksine değişken rotor direncine sahip değişken hızlı rüzgâr türbini generatörü de kritik temizlenme süresinin üzerindeki müdahalede sistem belli bir süre sonra daha farklı bir noktada senkronizmada kaldığı görülmektedir ancak bu zaman dilimindeki rotor açısal değişimi teoride senkronizmada kaldığını gösterse de pratikte senkronizmadan çıkılmış bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de sistemin simülasyon sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.6. Rotor açısının zamana göre değişimi.



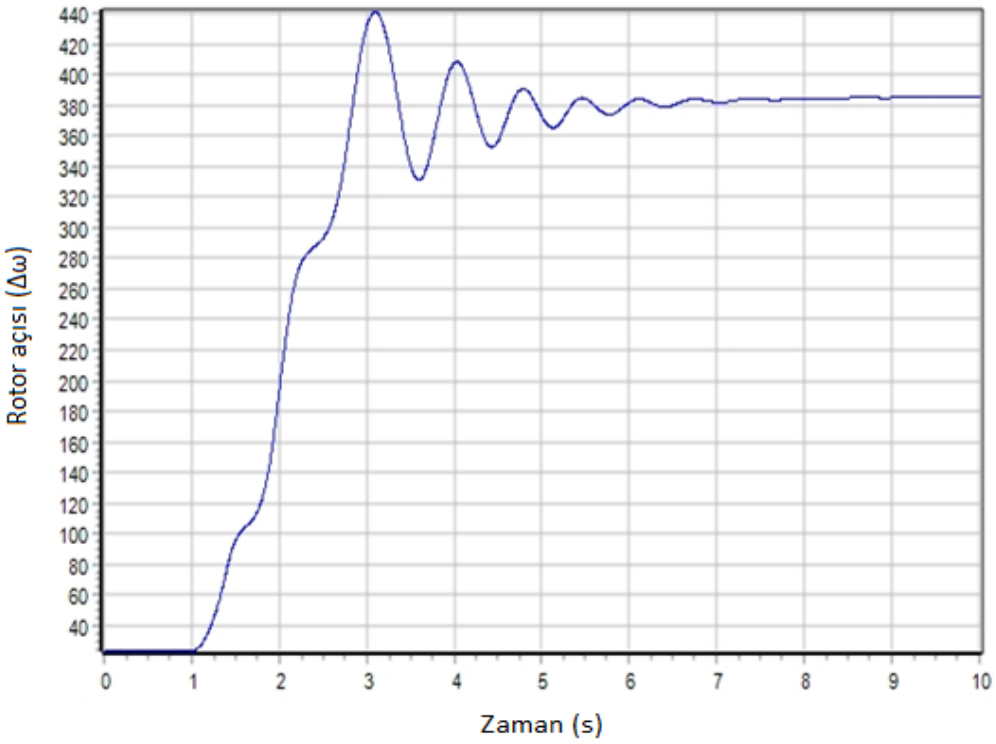
Şekil 3.7. Rotor açısının zamana göre değişimi.



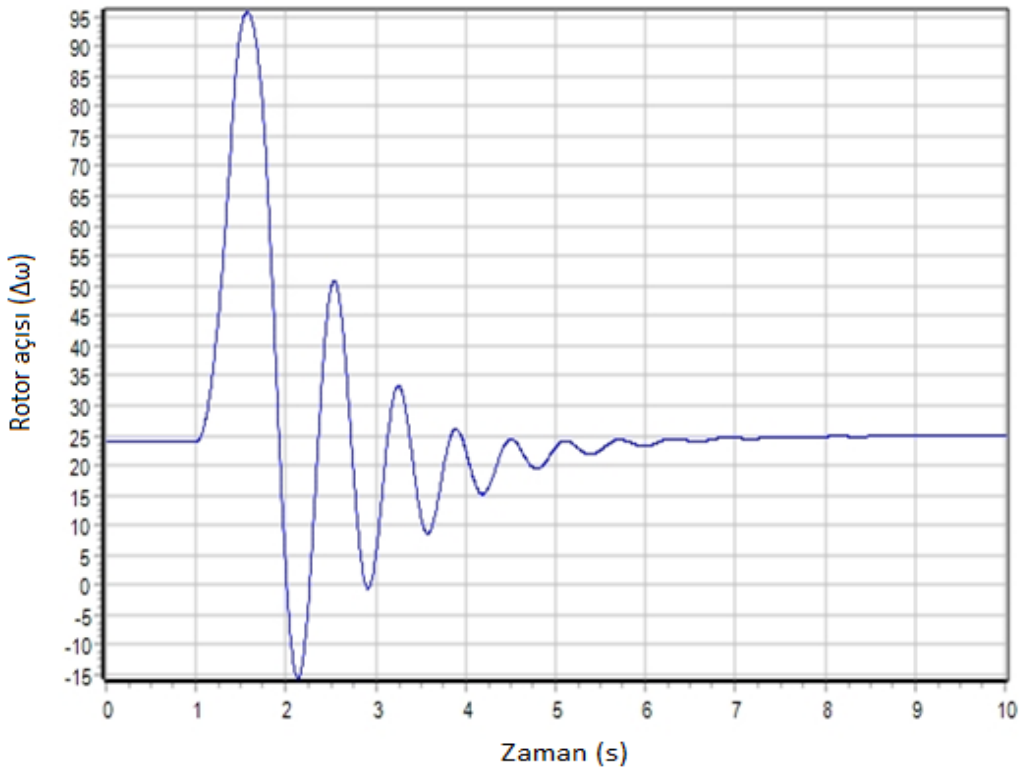
Şekil 3.8. Generatör hızının zamana göre değişimi.

3.4.3. Değişken Hızlı Çift Beslemeli Endüksiyon Generatörlü Rüzgâr Türbini

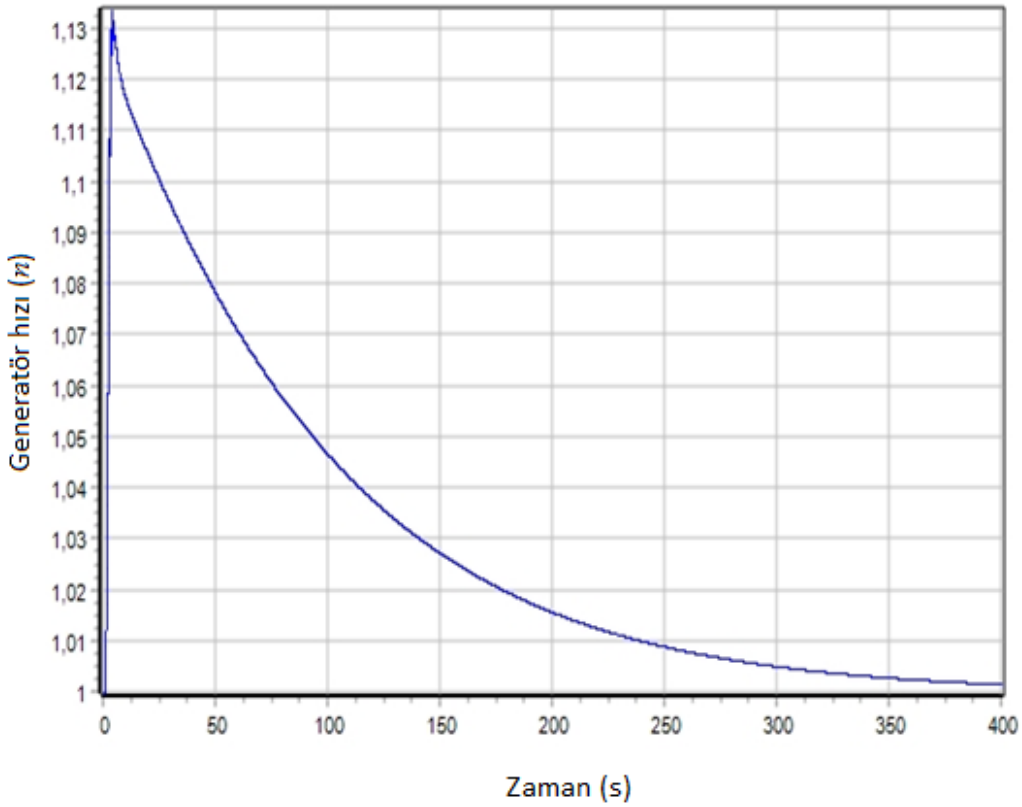
Yapılan kararlılık analizinde değişken hızlı çift beslemeli endüksiyon generatörlü rüzgâr türbini generatör çiftinin kritik temizlenme süresi 0,39 saniye olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.9' da görüldüğü üzere kritik temizlenme süresinin üzerindeki bir hata temizleme işlemi senkronizmadan çıkış olarak sonuçlanmaktadır. Ancak bu noktada şöyle bir durum karşımıza çıkmaktadır; değişken rotor direncine sahip değişken hızlı rüzgâr türbini generatörü için bahsetmiş olduğumuz sistemin pratikte kararsız olduğu ama teoride kararlı duruma doğru gittiği nokta 10. saniye civarlarında ve nispeten daha büyük bir rotor açısı farkıyla gerçekleşmektedir, değişken hızlı çift beslemeli endüksiyon generatörlü rüzgâr türbini generatör çifti için ise bu süre hem daha kısa (5-6 saniye) hem de açısal değişim daha da küçüktür. Ancak bu teoride gerçekleşen ama pratikte senkronizmadan çıkılan bir durumdur. Şekil 3.10'da kritik temizlenme süresinin altındaki müdahale durumunda sistemin rotor açısının zaman göre değişimi verilmektedir.



Şekil 3.9. Rotor açısının zamana göre değişimi.



Şekil 3.10. Rotor açısının zamana göre değişimi.



Şekil 3.11. Generatör hızının zamana göre değişimi.

3.4.4. Tam Dönüştürücülü Değişken Hızlı Rüzgâr Türbini

Bu tür rüzgâr türbini generatörünün ana dezavantajlarından biri, güç elektroniği cihazlarının tam güçte boyutlandırılması gerekmektedir. Bu da çok maliyetli olmaktadır. Yapılan kararlılık analizi testlerinde tam dönüştürücülü değişken hızlı rüzgâr türbini generatörün kritik temizlenme süresinin 0.005 saniye üzerinde çıkması ve rotor açısının ve hızının zamana göre değişiminin gözle görülebilir bir farklılık oluşturmaması sebebiyle bu tip türbin generatör çiftinin şebekeden bağımsız frekansla çalışması avantajı ön plana çıkmaktadır.

Rüzgâr santrali içeren bir güç sisteminde farklı rüzgâr türbini generatörlerinin geçici hal kararlılığı analizinde bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Bu veriler ışığında denilebilir ki; sabit hızlı rüzgâr türbini generatör çifti diğer çiftlere göre daha düşük bir kritik temizlenme süresine sahiptir. Bu daha küçük kritik temizlenme süresi sistemi daha kırılgan yapmaktadır. Ancak toparlanma süresini de kısaltmış bulunmaktadır. Sabit hızlı rüzgâr türbini generatörü için bu süre Şekil 3.4'te görüldüğü üzere 2-3 saniye civarındadır. Bunun yanında Şekil 3.7 ve Şekil 3.9'da görüldüğü üzere sırasıyla değişken rotor direncine sahip değişken hızlı rüzgâr türbini için bu değer 4-5 saniye iken değişken hızlı çift beslemeli endüksiyon generatörlü rüzgâr türbini için bu süre 5-6 saniye civarındadır. Bunun sebebi de sahip oldukları eylemsizlik katsayılarının (H sabitinin) büyüklüğünün belirgin etkisinin olmasıdır. Generatör hızının rotor açısına göre değişimi grafiklerinden de generatörün yapmış olduğu salınımların büyüklüğü ve kararlı duruma ulaşma süreleri de görülmektedir. Daha büyük H sabiti demek sistemin daha ağır çalışmasına, geç senkronizmadan çıkıp senkron hıza geç dönmesi demektir. Bu sonuçlarla da bir kez daha bu gerçek ortaya konulmaktadır.

3.5. SALINIM DENKLEMLERİ

Sistemin kararlılık analizi salınım denkleminin analizine bağlıdır. Sistemin kararlılığı elektromanyetik tork ile mekanik torkun denge durumunda olmasına bağlıdır. Elektromanyetik tork T_e mekanik tork T_m den küçük olursa rotorda hızlanma tersi durumunda ise rotorda yavaşlama gerçekleşir. Eylemsizlik momenti J ve açısal yer değiştirme θ_m olmak üzere sürtünmeler ve tork sönümlemesi ihmal edildiğinde, dönme yasası Denklem (3.1) ile ifade edilmiştir.

$$J\frac{\partial^2\theta_m}{\partial t^2} = T_a = T_m - T_e \tag{3.1}$$

Açısal yer değiştirme Denklem (3.2)'de görüldüğü gibi senkron hızda dönen rotorun ω_{sm} zamana göre değişimine ve mekanik güç açısına δ_m bağlıdır.

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \tag{3.2}$$

Burada irdelediğimiz durum rotorun hızı ile senkron hız arasındaki ilişkidir. Rotorun açısal hızı ω_m ve bu aradaki ilişki Denklem (3.3) ile ifade edilmiştir. Rotorun ivmesi Denklem (3.3)'ün türevi aldığında Denklem (3.4) verildiği gibi elde edilir. Dönme yasasını da Denklem (3.4) Denklem (3.2) de yerine yazıldığında Denklem (3.5)'deki gibi elde edilir.

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \tag{3.3}$$

$$\frac{\partial^2\theta_m}{\partial t^2} = \frac{\partial^2\delta_m}{\partial t^2} \tag{3.4}$$

$$J\frac{\partial^2\delta_m}{\partial t^2} = T_m - Te \tag{3.5}$$

Mekaniksel ve elektriksel tork şeklinde yazılan dönme yasası mekaniksel P_m ve elektriksel güç Pe şeklinde yazılabilmesi için eşitliğin her iki tarafı rotor açısal hızı ile ω_m çarpılır.

$$J\omega_m\frac{\partial^2\delta_m}{\partial t^2} = \omega_m T_m - \omega_m Te \tag{3.6}$$

$$J\ \frac{\partial^2 \delta_m}{\partial t^2} =\ P_m - Pe \tag{3.7}$$

Eylemsizlik sabiti olarak bilinen $J\omega_m$, M ile gösterilir. Denklem (3.8) de görüldüğü gibi M kinetik enerjinin dönen kütleyle ilişkisine bağlıdır.

$$W_k = \frac{1}{2}\, J{\omega_m}^2 = \frac{1}{2} M \omega_m P \tag{3.8}$$

M eylemsizlik sabitidir ancak gerçekte sabit bir değerde değildir. Sabit denmesinin sebebi sistem kararsız duruma geçmeden önce rotor açısal hızında ω_m kayda değer bir değişiklik gerçekleşmemesidir. Bundan dolayı M sabit kabul edilir ve M Denklem (3.9)'daki gibi ifade edilebilir.

$$M\ = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \tag{3.9}$$

Salınım denkleminin eylemsizlik sabiti şeklinde gösterimi Denklem (3.10)'da verilmiştir.

$$M \frac{\partial^2 \delta_m}{\partial t^2} =\ P_m - Pe \tag{3.10}$$

Salınım denklemini elektriksel güç açısı δ şeklinde yazmak analiz için önem arz etmektedir. Bu şekilde yazılan bir salınım denklemi daha anlamlı olacaktır. p senkron generatörün kutup sayısı, δ_m mekaniksel güç açısı olmak üzere Denklem (3.11)'de elektriksel güç açısı ile mekaniksel güç açısı ve elektriksel açısal hız ile mekaniksel açısal hız arasındaki ilişkisi gösterilmiştir.

$$\delta = \frac{p}{2}\,\delta_m,\ \omega = \frac{p}{2}\,\omega_m \tag{3.11}$$

Salınım denklemi elektriksel güç açısı şeklinde Denklem (3.12)'de gösterilmiştir.

$$\frac{2}{p} M \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = P_m - Pe \tag{3.12}$$

Güç sistem analizi birim ünite sistemi şeklinde yapıldığı için, genellikle salınım denklemin de birim ünite şeklinde gösterilir. Denklem (3.12)'nin her iki tarafı temel güce SB'ye bölüp M'in karşılığı denklemde yazıldığında ifademiz Denklem (3.13)'de gösterildiği gibi olur.

$$\frac{2}{p} \frac{2Wk}{\omega_{sm} SB} \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = \frac{P_m}{SB} - \frac{Pe}{SB} \tag{3.13}$$

Burada sistem analizinde çok önemli olan bir değeri yani Hsabiti diğer bir adıyla birim ünite eylemsizlik sabiti ifade edilecektir. Bu sabitin birimi saniyedir. Büyüklüğü sistemin büyüklüğüne bağlı olarak 1 ile 10 saniye arasında değişmektedir. H sabiti Wk *MJ(mega joule)* cinsinden kinetik enerji olmak üzere Denklem (3.14)'te gösterilmiştir.

$$H = \frac{Wk}{SB} \tag{3.14}$$

H sabiti cinsinden salınım denklemi ise Denklem (3.15)'te ifade edilmiştir.

$$\frac{2}{p} \frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = P_m(pu) - Pe(pu) \tag{3.15}$$

$P_m(pu)$ ve $Pe(pu)$ mekanik güç ve elektriksel gücün birim ünite şeklinde gösterimidir.

Elektriksel açısal hız ω_s ile mekaniksel açısal hızın ω_{sm} ilişkisi Denklem (3.16)'daki gibi olduğundan salınım denklemimiz elektriksel açısal hız cinsinden ifadesi Denklem (3.17)'deki gibi olur.

$$\omega_{sm} = \frac{2}{p}\omega_s \tag{3.16}$$

$$\frac{2H}{\omega_s}\frac{\partial^2\delta}{\partial t^2} = P_m(pu) - Pe(pu) \tag{3.17}$$

Salınım denkleminin son hali birim ünite cinsinden ve frekansa f_0 bağlı olarak Denklem (3.18)'daki gibi olacaktır. Denklem (3.19) ise frekansın derece cinsinden gösterimidir.

$$\frac{2H}{\pi f_0}\frac{\partial^2\delta}{\partial t^2} = P_m - Pe \tag{3.18}$$

$$\frac{2H}{180 f_0}\frac{\partial^2\delta}{\partial t^2} = P_m - Pe \tag{3.19}$$

Görüldüğü üzere salınım denklemi lineer bir denklem değildir. Çözümü için çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada Euler metodu salınım denklemlerinin çözümü için kullanılmıştır. Euler metodunun seçilmesinin sebebi çözüm kolaylığı sağlamasıdır.

3.5.1. Euler Metoduyla Salınım Denklemlerinin Analizi

Salınım denklemleri lineer denklemler olmadığından analizi nümerik metotlarla yapılmalıdır ve en etkili metotlardan olan Euler metodu analiz için uygun görülen metodumuzdur. Güç açısının zamana göre türevi bize açısal hızı verecektir. İkinci türevi alınan güç açısı Denklem (3.20)'de verilmiştir.

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \tag{3.20}$$

$$\frac{\partial^2\delta}{\partial t^2} = \frac{\pi f_0}{H} P_a \tag{3.21}$$

Denklem (3.21)'deki gibi yazılan salınım denkleminin çözümü için Euler metodu uygulanabilir. $t_1 = t_0 + \Delta t$, Δt adımlı uygulamada ilk basamağın türevi ile son basamak değerleri Denklem (3.22) ve (3.23)'te gösterilmiştir.

$$\delta_{i+1}^P = \delta_i + \frac{d\delta}{dt}\Big|_{\Delta w_i} \Delta t \tag{3.22}$$

$$w_{i+1}^P = \Delta w_i + \frac{d\Delta w}{dt}\Big|_{\delta_i} \Delta t \tag{3.23}$$

Tahmin edilen değerleri δ_{i+1}^P, Δw_{i+1}^P kullanarak türevler Denklem (3.24)ve (3.25)'deki gibi olur.

$$\frac{d\delta}{dt}\Big|_{\Delta w_{i+1}^P} = \Delta w_{i+1}^P \tag{3.24}$$

$$\frac{d\Delta w}{dt}\Big|_{\delta_{i+1}^P} = P_a \frac{\pi f_0}{H}\Big|_{\delta_{i+1}^p} \tag{3.25}$$

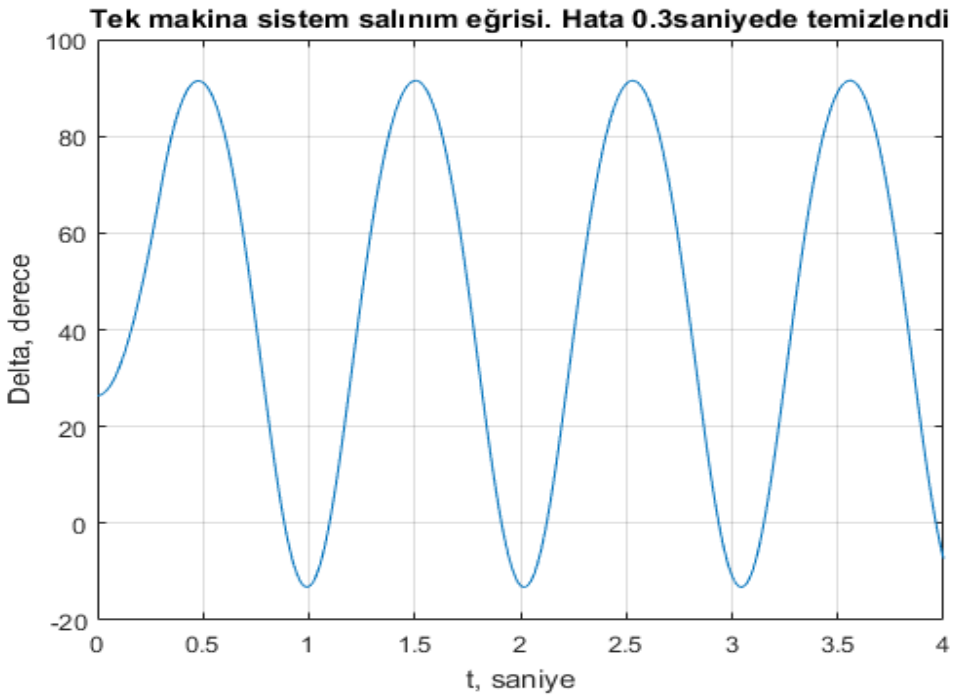
Son olarak iki türevinde ortalama değerleri kullanılarak düzenlenmiş değerler Denklem (3.26) ve (3.27)'de gösterilmiştir.

$$\delta_{i+1}^{c} = \delta_i \left(\frac{\left.\frac{d\delta}{dt}\right|_{\Delta w_i} + \left.\frac{d\delta}{dt}\right|_{\Delta w_{i+1}^{P}}}{2} \right) \Delta t \tag{3.26}$$

$$\Delta\omega_{i+1}^{c} = \Delta w_i + \left(\frac{\left.\frac{d\Delta w}{dt}\right|_{\delta_i} + \left.\frac{d\Delta w}{dt}\right|_{\delta_{i+1}^{P}}}{2} \right) \Delta t \tag{3.27}$$

Sistemin analizi Matlab yardımıyla Euler metodu kullanarak yapılmış olup sonuçları Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Şekildeki sonuçlardan da anlaşılacağı üzere sistem hata temizleme süresi 0,4 saniye sonrası yani 0,5 saniyede kararsız duruma geçmektedir. Bu süreden sonra sistemin senkronizması bozulmaktadır. Temizlenme zamanı güç sistemimizin önemli bir parametresi olan *H* sabitine bağlı olup *H* sabitinin değişmesiyle değişkenlik göstermektedir.

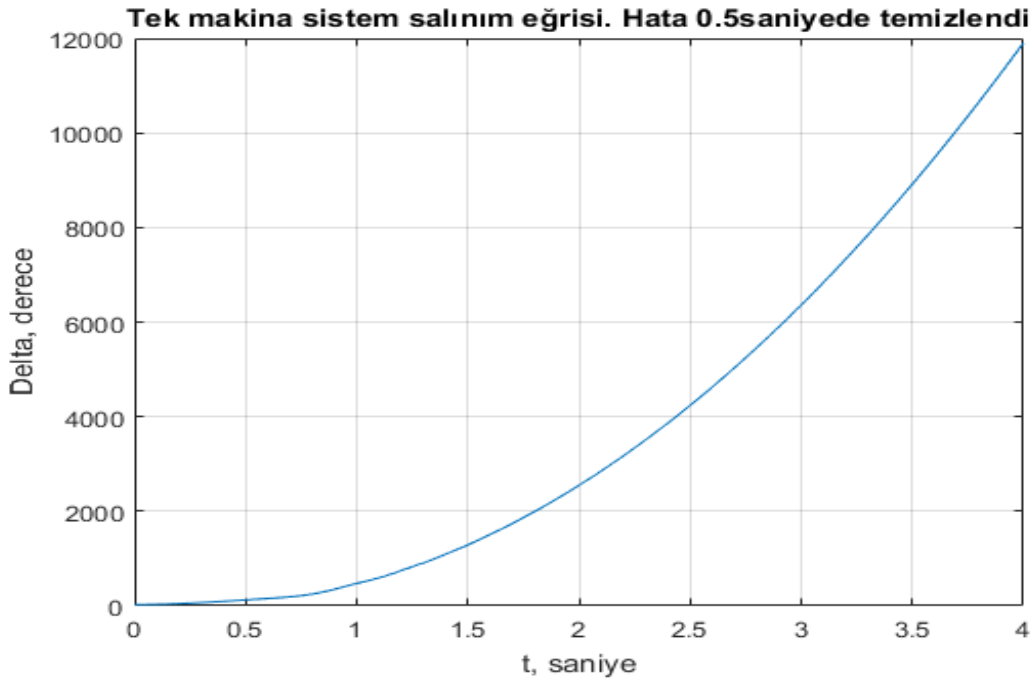
H sabiti de sistemin büyüklük ve karmaşıklığına bağlı olan bir sabittir. Rotorun ilk anda kalkışı ve hızlanma süresi bu sabite bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. *H* sabiti yüksek sistemlerde temizlenme süreside daha yüksek olmakta ve *H* sabitine bağlı olarak temizlenme süresi sistemin kararlılık süresinde etkili rol oynamaktadır.



Şekil 3.12. Salınım eğrisi hata 0,3 saniyede temizlendiğinde.



Şekil 3.13. Salınım eğrisi hata 0,4 saniyede temizlendiğinde.



Şekil 3.14. Salınım eğrisi hata 0,5 saniyede temizlendiğinde.

4. GÜÇ SİSTEMİ DENGELEYİCİSİ

Elektrik güç sistemleri karmaşık doğrusal olmayan sistemlerdir. Olumsuz çalışma koşulları nedeniyle, güç sistemlerinde sıklıkla düşük frekanslı elektromekanik salınımlar meydana gelir [92].Elektrik güç sistemlerinin artan karmaşıklığı nedeniyle, bu sistemlerin dinamik dengesini iyileştirmek ve sistem çalışması sırasında meydana gelen düşük frekanslı salınımları azaltmak için ek uyarım kontrol sinyallerinin kullanılması ilgi çekicidir [93].

Güç sistemlerinde yük değişimi çalışma gerilimini etkilediğinden sürekli uyarma yerine Otomatik Gerilim Regülatörleri (AVR'ler) kullanılmıştır. Senkron generatörün polar gerilimi, aktarılan güç miktarı ve güç açısı, iletim hattının açılması, büyük bir yükün kesilmesi veya ani yük aktivasyonu gibi durumlarda çalışma noktasından sapar. Sistem böyle bir arıza ile karşılaştığında AVR, senkronizasyon anına ters etki yapacaktır. Senkronize tork zayıflaması, sistemdeki salınımların genliğinde ve frekansında artışa neden olur. AVR'nin bu olumsuz davranışını ve sistemlerin sönümlemenin yetersiz mekanik formunun bir bileşimi nedeniyle oluşabilecek düşük frekanslı elektromekanik salınımları ortadan kaldırmak için, PSS'ler AVR ile birlikte ek bir kontrol sinyali sağlamak için kullanılmaya başlanmıştır [1], [94]. PSS, bu düşük frekanslı salınımları (0,2 ila 3,0 Hz) azaltmak için uyarma kontrolü ile elektriksel tork sağlamak üzere tasarlanmıştır [95].

Ayrıca, PSS, geçici kararlılığı ve sönümleme salınımını iyileştirmek için uyarma kontrol sistemine ek bir kontrol sinyali sağlar. PSS hem arıza sonrası salınımları bastırabilmeli hem de terminal gerilimini arıza öncesi değerine ayarlayabilmelidir.

Kaydedilmiş ve incelenmiş olayların birkaç örneği vardır. İstikrarsızlık sistem güvenliğini tehlikeye atabilir ve güç transferini sınırlayabilir [96]. Kararsızlığa katkıda bulunan başlıca faktörler şunlardır:

- Generatör veya bağlantı hattının yüklenmesi
- İletim hatlarının güç aktarım kabiliyeti
- Generatörün güç faktörü (önde gelen güç faktörü gecikmeli güç faktörü işleminden daha sorunludur)

- AVR kazancı

Salınım kararsızlığı sorununa uygun maliyetli ve tatmin edici bir çözüm, generatör rotor salınımları için sönümleme sağlamaktır. Bu, uyarma sistemlerinde tamamlayıcı kontrolörler olan Güç sistemi stabilizatörleri sağlanarak kolaylıkla yapılır. PSS girdisi rotor hızından, frekansından, elektrik gücünden veya bu değişkenlerin bir kombinasyonundan elde edilirken çıktı kontrol edilir [94][97][98]. PSS'yi tasarlamanın amacı, kritik salınım frekanslarında senkronizasyon torkunu etkilemeden ek sönümleme torku sağlamaktır.

4.1. GÜÇ SİSTEMİ DENGELEYİCİSİNİN TEMEL KAVRAMLARI

Bir PSS'nin temel işlevi, bir güç sisteminin açısal kararlılığını genişletmektir. Bu, generatör uyarımı yoluyla senkron makine rotorlarının salınımına ilave sönümleme sağlayarak yapılır [99]. Bu sönümleme, hız değişimleri ile aynı fazda olan rotora uygulanan bir elektrik torku ile sağlanır. Söz konusu salınımlar tipik olarak 0.2 ila 3.0 Hz frekans aralığında meydana gelir ve bu salınımların yetersiz şekilde sönümlenmesi güç iletimini sınırlayabilir. Pratik bir sistemde, çeşitli modlar (salınım) üç geniş kategoride gruplandırılabilir.

- Yalnızca bir elektrik santralindeki generatörlerin katıldığı tesis içi modlar (1. Generatörün 2. Generatöre göre salınımı). Salınım frekansları genellikle 1.5 ila 3.0 Hz aralığında yüksektir.
- Bir alandaki birkaç generatörün (1. ve 2. Generatörler birlikte 3. Generatöre karşı yapılan salınım) katıldığı yerel modlar. Salınımların frekansları 0.8 ila 1.8 Hz aralığındadır.
- Geniş bir alan üzerinde generatörlerin (1. 2. ve 3. Generatörler 4. Generatöre göre karşı salınım yapar) katıldığı alanlar arası modlar. Salınım frekansları düşüktür ve 0.2 ila 0.5 Hz aralığındadır.

Yerel modlar ve alanlar arası modlar arasındaki ayrım, esas olarak, uzun mesafelerle ayrılmış farklı alanlara bölünebilen sistemler için geçerlidir. Üretim istasyonlarının bir coğrafi alan üzerinde eşit olarak dağıtıldığı sistemler için, yerel ve alanlar arası modları fiziksel hususlardan ayırt etmek zor olacaktır. Bununla birlikte, ortak bir gözlem, alanlar arası modların en düşük frekansa ve geniş bir coğrafi alana yayılmış sistemdeki generatörlerin çoğunun katılımına sahip olmasıdır. PSS'ler temel olarak yerel ve alanlar

arası modları stabilize etmek için tasarlanmıştır [100], [101].

PSS'nin birincil amacı, salınım kararsızlığı ile sınırlanacak olan ağın güç transferini artırmaktır. Sistem büyük kesintilere maruz kaldığında, PSS'nin de düzgün çalışması gerekir. PSS, orta derecede sönümlü veya kendiliğinden gelişen salınımlarla karakterize edilen 0.2 ila 3.0 Hz frekans aralığında güç aktarım kararlılığı sınırlamalarını genişletebilir. Bu, sistemin salınım modlarını azaltmak için uyarma kontrolü kullanılarak gerçekleştirilir [102][103].

Sonuç olarak, stabilizatörün en az kararlı koşullar altında sönümlemeyi geliştirme yeteneği önemlidir. Uzak üretim tesislerinden uzun iletim hatları üzerinden güç iletmeye çalışırken veya sistemler arasında nispeten zayıf bir bağ oluşurken meydana gelebilecek zayıf iletim ve ağır yük koşulları altında ek sönümleme öncelikle gereklidir[104]. Hat kesintileri gibi beklenmedik durumlar, çoğu zaman bu tür koşullara neden almaktadır. Bu nedenle sistem normalde yeterli sönümlemeye sahiptir ve bu tür koşullar sırasında genellikle stabilizatörlerden yararlanabilir.

4.2. GÜÇ SİSTEMİ KARARLILIK CİHAZLARINA GENEL BAKIŞ

Yazarlar yapılan bu [105] çalışmada tek makinalı sonsuz baralı (SMIB) bir sistemde geleneksel bir PSS'yi geliştirmek için üç yeni yaklaşım önermiştir. Bu geliştirilmiş stabilizatörler, alışılmış şekilde geleneksel PSS'yi ve ayrıca ünite üzerindeki hızlanan gücün bir fonksiyonu olarak uyarı sistemine terminal gerilimi geri besleme sinyalinin modifikasyonunu kullanmıştır. Doğrusal olmayan eylem, güç sistemi kararlılığını büyük ölçüde artırmıştır. Bu üç çeşit geliştirilmiş stabilizatörün, 1970'lerden beri güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan geleneksel PSS'den çok daha fazla güç sistemi kararlılığını iyileştirebileceği sonucuna varılmıştır. Üç çeşit geliştirilmiş stabilizatör ile karşılaştırıldığında, geliştirilmiş PSS en iyisidir çünkü hem küçük hem de büyük rahatsızlıklar için etkili ve ayrıca rotor hızı sapmalarının hem aşma hem de yerleşme süresini iyileştirmede etkilidir.

Bir PSS için kendi kendini optimize eden yeni bir kutup değiştirme kontrol stratejisi bu [27] çalışmada yapılmıştır. Sistemin tanımlanmış bir modeline dayalı olarak, kontrol, belirli bir performans kriterini en aza indirmek için sistemin kapalı döngü kutuplarını z-alanındaki birim çember içindeki bazı optimal konumlara kaydıran bir algoritma tarafından hesaplanmıştır. Kendinden optimizasyon özelliği ile kontrolör tasarım

prosedürüne dışarıdan müdahale en aza indirilmiş ve devreye alma sırasında ayar prosedürü basitleştirilmiştir. Ayrıca, gerçek zamanlı parametre tanımlamada değişken unutma faktörünü hesaplamak için yeni bir yöntem tartışılmıştır. Gerçek zamanlı kontrol için, kontrol edilen sistemi temsil etmek için düşük dereceli bir sistem modeli kullanılabilir. Kutup değiştirme yaklaşımına dayanan önerilen kontrol stratejisi, kutup atama kontrol algoritmasının ve minimum varyans kontrol algoritmasının avantajlarını birleştirilmiştir. Kapalı çevrim kutup yerleri, verilen performans indeksini en aza indirmek için kontrol algoritması tarafından optimal olarak hesaplanmıştır. Çeşitli koşullar için test sonuçları, önerilen adaptif stabilizatörün geniş bir frekans aralığında iyi bir sönümleme sağlayabildiğini ve dinamik ve geçici kararlılık sınırlarını arttırdığını göstermiştir.

Khaldi ve ark. [106] çok makineli güç sistemlerinde PSS parametrelerinin seçimi için modal performans ölçüsünü kullanan bir optimizasyon yaklaşımı geliştirmiştir. Optimizasyon probleminin amacı, doğrusallaştırılmış bir güç sisteminin çıktılarındaki sürekli düşük frekanslı salınımları sönümlendirmek olduğunu ifade etmiştir. Bu makale ayrıca sınırlı ve sınırsız PSS parametrelerini dikkate almış ve sınırların nihai sonuçlar üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır. Performans ölçütünün PSS parametrelerinde dışbükey bir fonksiyon olmadığını göstermiştir. Yani, birçok yerel minimum ve muhtemelen küresel bir minimum olduğunu göstermiştir. Farklı "optimal" PSS parametre değerleri kümeleri için çok tatmin edici düşük frekanslı osilasyona sahip sistem yanıtları elde edilmiştir. Ayrıca, parametreler üzerindeki sınırlar sistemin kararlılığının belirlenmesinde önemli bir rol oynamıştır. Sistem modeli sabit bir çalışma koşulundan türetilmiştir ve bu modele dayalı olarak optimal bir PSS parametreleri seti elde edilmiştir. Uygulama amaçları için, bir dizi çalışma bölgesi için önerilen tekniğe dayalı olarak optimal PSS parametreleri kümesi hesaplanabilir. Sistem herhangi bir anormal koşula maruz kalırsa, seçilen PSS parametreleri yeni çalışma koşulunun optimal değerlerine geçirilebilirliği ifade edilmiştir.

Kothari ve ark. [107] kutup değiştirme tekniğini kullanarak kendi kendini ayarlayan bir PSS tasarlamıştır. Kontrolör, kazançları kutup değiştirme faktöründen değerlendirilen bir durum geri bildirim kanunu kullanmışlardır. Önerilen yöntem basit ve hesaplama açısından verimlidir. Önerilen PSS'nin dinamik performansı oldukça tatmin edici olmuş ve PSS değişen çalışma koşullarına hızla adapte olmuştur. Yöntem, durum gözlemcilerine olan ihtiyacı ortadan kaldıran bir model formülasyonu kullanmıştır ve çıktı, geri besleme

kontrol sinyalini türetmek için doğrudan kullanılmıştır. Oldukça tatmin edici dinamik performanslar elde etmek için bunu bu çerçevede basit bir kutup değiştirme kontrol tekniği ile birleştirmiştir. Kontrol hesaplamaları basittir ve daha az hesaplama çabası gerektirmektedir.

Yuan-Yih Hsu ve ark. [108] Taiwan Power Company'nin ikinci nükleer santralindeki bir üretim birimi için uyarıcı sabitlerinin tanımlanmasını ve ayarlanmasını ele almıştır. Saha testi ilk olarak generatör açık devreli ikaz sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Saha testi sonuçları, üretici sabitlerini kullanan bilgisayar simülasyon sonuçlarından farklı olduğu için, uyarı sistemi için bir ön parametre setine ulaşmak için üreticinin sabitlerini önceki deneyimlere dayanarak değiştirmiştir. Daha sonra, uyarma sistemi parametrelerini daha da iyileştirmek için bir hibrit doğrusal olmayan simülasyon-duyarlılık matrisi yöntemi geliştirmiştir. Daha iyi bir dinamik tepki vermek için uyarıcı sabitleri ayarlanmıştır. Generatörün PSS'siz ve PSS'li dinamik tepkisini karşılaştırmak için saha testleri bu çalışmada yapılmıştır.

Simoes Costa ve ark. [109] elektromekanik salınımları sönümlemek için güç sistemi kontrolörlerini tasarlamak için bir yöntem önermiştir. Hem senkron generatörler için PSS'nin tasarımına hem de diğer sönümleme kaynaklarıyla ilişkili ek sinyallere uygulanabilir. Yöntemin bazı ilgi çekici özellikleri şunlardır: tüm kontrolörlerin parametreleri ortaklaşa belirlenmiş, kullanılacak ek sinyal tipinde herhangi bir kısıtlama yoktur ve kontrolör yapıları günümüzde elektrik tesislerinde kullanılanlarla uyumludur. Kontrol problemi çözümü, seyrek bir yapıyı koruyan bir sistem tanımını optimal tasarım yaklaşımının yeterli bir matematiksel formülasyonu ile birleştirerek seyreklikten yararlanılmıştır. Sonuçlar hem özdeğer analizi hem de doğrusal olmayan simülasyon kullanılarak doğrulanmıştır. Çok makineli güç sistemlerinde kontrolör ayarlarının belirlenmesi için yapısal olarak kısıtlı optimal kontrolör tasarımına dayalı bir yöntem tanıtılmıştır. Çok makineli bir sistemdeki tüm kontrolörlerin ayarları, tüm dinamik etkileşimleri hesaba katan entegre bir prosedür aracılığıyla aynı anda belirlenebilmiştir. Sonuçlar hem öz değerler açısından verilmiş hem de doğrusal olmayan simülasyon eğrileri, yöntemin gerçekçi güç sistemlerine uygulanabilirliğini göstermektedir.

Soliman ve ark. [110] çok çeşitli çalışma koşullarında düzgün şekilde çalışabilen basit ve sağlam bir PSS tasarlamıştır. Kurşun dengeleyici tasarımı, sonlu sayıda aşırı karakteristik polinomlar için kök lokusları çizilerek elde edilmiştir. Bu tür polinomlar, karakteristik denklem katsayıları üzerindeki geniş yükleme koşullarını yansıtmak için Kharitonov

teoremi kullanılarak elde edilmiştir. Bu amaçla, sistem transfer fonksiyonlarının katsayıları için açık analitik formlar türetilmiştir. Simülasyon sonuçları, gecikmeli ve önde gelen güç faktörlerinde geniş yükleme koşulları altında sistem dinamiklerini tanımlayan orijinal doğrusal olmayan diferansiyel denklemlere uygulandığı için önerilen stabilizatörün etkinliğini göstermiştir.

De Mello ve Concordia [111] harici reaktans yoluyla bir SMIB örneğini inceleyerek küçük pertürbasyonlar altında senkron makinelerin kararlılığı olgusunu tartışmışlardır. Analiz, tristör tipi uyarma sistemlerinin etkilerine ilişkin içgörüler geliştirmiş ve bu tür sistemler için dengeleyici gereksinimlerin anlaşılmasını sağladı. Bu stabilize etme gereksinimleri, makine salınımlarının sönümlenmesini sağlamak için gerilim regülatörü referansı ile birlikte bir makine hızından türetilen sinyal için aktarım fonksiyonu özelliklerinin yanı sıra gerilim regülatörü kazanç parametrelerini de içermiştir. Çalışma, mekanik torkta küçük bir bozulmanın ardından gerilim veya hızın salınım ve sönümleme özelliklerinin belirlenmesiyle çeşitli makine yüklemeleri, makine ataletleri ve sistem dış empedanslarını araştırmıştır. İlgili kararlılık olgusunu açıklayan ve dengeleyici fonksiyonların istenen faz ve büyüklük özelliklerini tahmin eden bazı birleştirici kavramlar geliştirmek için bir girişimde bulunulmuştur.

Milanovic [96] senkron bir generatörü stabilize etmek için kullanılan çeşitli kontrolörler arasındaki dinamik etkileşimleri araştırmıştır. İzole senkron generatörlerin elektromekanik salınımlarını sönümlemede uyarıcı ve/veya regülatöre bağlı bir PSS'nin etkinliği incelenmiştir. Uyarıcıya ve/veya regülatör döngüsüne bağlı PSS'ler, otomatik gerilim regülatörü, regülatör ve çok kademeli çift yeniden ısıtma türbini ve dinamik yük arasındaki etkileşimler dikkate alınmıştır. Kullanılan kontrolörlerin tipine ve sayısına ve modellenen dinamiklere bağlı olarak, etkileşimlerin bir dizi çalışma koşulu için sistemin kararsız çalışmasına neden olabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, regülatör döngüsüne bağlı PSS'nin, düşük frekanslı salınımların daha iyi sönümlenmesini ve çalışma koşullarındaki bir değişikliğe generatörün, uyarıcı döngüsüne bağlı PSS'den daha iyi sağlamlığını sağladığı da gösterilmiştir. Makale ayrıca, regülatör döngüsüne bağlı düzgün ayarlanmış bir PSS'nin sistem salınımlarının genel olarak daha iyi sönümlenmesini sağlayabileceğini göstermiştir.

Chow ve ark. [112] tasarımcıya üç farklı teknik kullanarak zorlu bir tasarım problemi sağlamak için PSS projelerinin atanmasındaki pratik deneyimi tartışmıştır. Kök-yer, frekans alanı ve durum-uzay yöntemleri kullanılarak PSS projelerinin tasarımı

sağlanmıştır. Projeler, tasarımcıya gerçekçi ve zorlu bir tasarım deneyimi sağlamış ve onları iyi bilinen bir güç sistemi tasarım problemine maruz bırakmıştır. Gerilim regülatör girişine katkısını sınırlamak için PSS'nin çıkışına bir doyma bloğu eklenebileceği belirtilmiştir.

Yee ve ark. [113] büyük bozulmalara sistem zaman tepkisini kullanarak doğrusal olmayan sistemi doğrudan optimize eden basit bir yöntem önermiştir. Yöntemin özellikleri ve uygulama özellikleri ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Çoklu güç sistemi stabilizatörlerinin koordineli olarak ayarlanmasında yöntemin etkinliği, çok makineli bir test güç sistemi üzerinde gösterilmiştir. Önerilen grafik optimizasyon, zamanında yanıtlara dayalı olarak sistemi doğrudan optimize etmek ve güç çıkışındaki salınımları başarılı bir şekilde sönümlemek için kontrolör ayarlarını elde etmek için kullanılabilir. Çıktının zaman tepkisi de uygun ek kısıtlamaların dahil edilmesi yoluyla doğrudan etkilenebilir. Bu metodolojinin en büyük dezavantajları, optimizasyon için gereken süre ve optimizasyon sürecinin ilk başlangıç noktasına duyarlılığıdır.

5. META-SEZGİSEL ALGORİTMALAR

Meta-sezgisel algoritmalar, yerel optimumdan kaçmak için bazı temel buluşsal yöntemleri kullanan algoritmalardır, ya boş bir çözümden başlayıp iyi bir tam çözüm oluşturmak için öğeler ekleyen yapıcı bir buluşsal yöntem ya da tam bir çözümden başlayan bir yerel arama buluşsal yöntemi ve daha iyisini elde etmek için bazı öğelerini yinelemeli olarak değiştirmek [114]. Meta-sezgisel kısım, düşük seviyeli buluşsal yöntemin, yinelenmiş olsa bile, tek başına elde edebileceğinden daha iyi çözümler elde etmesine izin verir.

Evrimsel Algoritmalar (EA), Darwinci evrim süreçlerini taklit ederek karmaşık problemleri çözmeye çalışan bilgisayar programlarıdır [115]. Bir Evrimsel Algoritmada, bir dizi yapay yaratık problemin uzayını araştırır. Arama uzayının optimal alanlarını keşfetmek için sürekli olarak birbirleriyle rekabet ederler. Zamanla bu yaratıkların en başarılısının en uygun çözümü keşfetmek için evrimleşeceği umulmaktadır.

EA'lar, doğal evrimin bazı yönlerini taklit ederek optimizasyon görevlerini çözebilen birkaç buluşsal yöntemden oluşur. Farklı soyutlama seviyeleri kullanabilirler, ancak her zaman belirli bir görev için tüm olası çözüm popülasyonları üzerinde çalışırlar. EA'lar, optimizasyon görevinde yalnızca ihmal edilebilir gereksinimleri kullanmak ve önermek için esnek olan onaylanmış bir buluşsal yöntemler kümesidir. EA'ların avantajları, değişime adapte olabilmeleri ve yeterince iyi çözümleri hızla üretebilmeleridir. EA'lar, aşağıdaki özelliklere sahip olmaları bakımından diğer optimizasyon yöntemlerinden farklıdır [116].

- EA buluşsal yöntemlerinin en önemli özelliği, arama uzayının yalnızca bir olası çözümle değil, bütün bir olası çözüm popülasyonu ile keşfedilmesi ve popülasyonun bireylerinin aralarında çözüm nitelikleri değiş tokuşu yapabilmesidir. Bu şekilde EA buluşsal yöntemi, çok modlu arama uzaylarında yerel optimuma doğru erken yakınsamaya karşı daha dirençli olduklarından, Tek veya Çok Başlangıçlı Tepe Tırmanışı algoritmasından daha iyi performans gösterebilir.
- EA yöntemleri doğası gereği niceldir; bu nedenle parametre optimizasyonu için çok uygundurlar. Ayrıca çok amaçlı optimizasyona genişletilebilirler. EA

yöntemleri, Memetik Algoritmalar kullanılarak diğer optimizasyon teknikleriyle kolayca birleştirilebilir.

- EA'lar getiri odaklıdır. Getiriler, tahmin gücünde iyileştirmeler veya bir kıyaslama üzerinden getiri anlamına gelebilir ve bu tür getiriler, bir EA için kolayca bir uygunluk fonksiyonuna çevrilebilir.
- EA yöntemleri, geleneksel yöntemlerle sağlanamayan çok çeşitli uzantılara ve kısıtlamalara izin verir. Sağlamdırlar ve verimlilik ve etkinlik arasında dikkate değer bir denge olduğunu ortaya çıkarırlar.
- EA'lar, küresel optimumu bulmak için karmaşık ve belirsiz bir alanı arayabilen bir tür stokastik optimizasyon algoritması olacak şekilde nesilleri seçmek için deterministik kurallardan ziyade olasılıklı geçiş kurallarını kullanır. EA'lar, geleneksel optimizasyon yöntemlerinden daha esnek ve sağlamdır.

5.1. GENETİK ALGORİTMA-GENETİC ALGORİTHM (GA)

Genetik algoritma, doğal seçilim ve genetiğin mekaniğine dayalı bir optimizasyon algoritmasıdır. GA'da, verilen problemin aday çözümleri bir popülasyondaki bireylere benzer. Her birey kromozom adı verilen bir dizi olarak kodlanmıştır. Çaprazlama operatörü tarafından ebeveyn kromozomlarından yeni aday çözümler üretilir. Mutasyon operatörü daha sonra popülasyona uygulanır. Her bireyin kalitesi, uygunluk fonksiyonu adı verilen bir fonksiyon tarafından değerlendirilir ve derecelendirilir. Biyolojik sistemdeki doğal seleksiyon mekanizmasına benzer şekilde, zinde bireylerin bilgiyi bir sonraki nesle aktarma şansı daha fazladır. İstenilen uygunluğa sahip bir kromozom elde edildiğinde, optimal çözüm olarak alınacak ve optimizasyon işlemi sonlandırılacaktır. Aksi takdirde, maksimum nesil sayısına ulaşılıncaya kadar işlem tekrarlanır ve o ana kadar elde edilen en uygun kromozom optimal çözüm olarak alınır.

GA aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- GA, tek bir noktaya dayalı değil, bir nokta popülasyonundan arama yapar. GA, amaç fonksiyonunun doğrusallığını, sürekliliğini veya türevlenebilirliğini veya sürekli değişkenlere ihtiyaç duymaz.
- Tamsayı ve ayrık değişkenleri doğal olarak ele alır.
- GA, doğal paralel hesaplama yeteneğine sahiptir.

- GA, geniş bir çözüm kümesini hızla tarayabilir. Kötü teklifler, basitçe atıldıkları için nihai çözümü olumsuz etkilemez. GA'nın endüktif doğası, problemin herhangi bir kuralını bilmek zorunda olmadığı, bunun yerine kendi iç kuralları ile çalıştığı anlamına gelir. Bu, karmaşık veya gevşek tanımlanmış problemler için çok kullanışlıdır.

GA için adım adım akış diyagramı aşağıdaki gibidir.

1.Adım: Değerlendirme

Bu, mevcut kromozomlarda yapılan her nesildeki ilk adımdır. Popülasyondaki her kromozomun kodu çözülür ve sorunu ne kadar iyi çözdüğüne göre değerlendirilir. Bu uygunluk ölçüsü, bir sonraki adımda, herhangi bir belirli kromozomdan kaç tane yavru üretileceğini belirlemek için kullanılır. Bu, sorunun performansını temsil eder. Genellikle "uygunluk değeri" olarak bilinen pozitif bir değer, sorunu çözmek için kromozomun "iyilik" derecesini yansıtmak için kullanılır ve değeri, nesnel değerle yakından ilişkilidir.

Uygunluk fonksiyonunun tasarımı, problemin performans gereksinimlerine göre değişebilir. Uygunluk değeri ne kadar yüksek olursa, sistemin performansı o kadar iyi olur. GA'nın amacı, uygunluk değerine karşılık gelen bir çözüm elde etmek için genetik işlemi, örneğin üreme, çaprazlama veya mutasyonu manipüle etmektir. Temel olarak, değerlendirme sürecinde bireyler, daha uygun bireylere dayalı olarak üreme için popülasyonlardan seçilir. Bu seçilen bireyler, ebeveyn adı verilen çiftler oluşturur. Seçim, en uygun olanın hayatta kalmasını sağlayan GA üzerinde anahtar işlemdir. Rulet Çarkı Seçimi, en sık kullanılan seçim tekniklerinden biridir.

2.Adım: Üreme

Bireysel dizileri uygunluk işlevlerine göre kopyalama işlemidir. Dizeleri uygunluk değerlerine göre kopyalamak, daha yüksek değere sahip dizilerin nesiller boyunca bir veya daha fazla çıkışa katkıda bulunma olasılığının daha yüksek olduğu anlamına gelir.

3.Adım: Rekombinasyon

Üreme, üyeleri şu anda sorunu en iyi çözen bir popülasyon yaratır. Bununla birlikte, kromozomların çoğu aynıdır ve bazıları önceki nesillerden farklıdır. Üreme, popülasyondan mevcut kromozomların çoklu kopyalarını üretir ve önceki neslin birçok özelliğini koruyan yeni bir kromozom üretir. Rekombinasyon için en yaygın yöntem çaprazlamadır.

Çaprazlama, kromozomları bir nesilden diğerine değiştirmek için kullanılan bir rekombinasyon operatörüdür. İki ebeveyn veya birey arasındaki rastgele konumlardaki gen bilgisi, ebeveynlerin özelliklerini miras alan kapalı bahar olarak adlandırılan iki yeni birey oluşturmak için değiştirilir.

4.Adım: Mutasyon

Popülasyonun yeni bir üyesinin genotipindeki genin tersine çevrilmesidir. Bir kromozom popülasyonunun bir neslinden diğerine genetik çeşitliliği korumak için kullanılan genetik operatör olarak adlandırılır. Aynı zamanda popülasyona yeni bilgilerin enjeksiyonu olarak da adlandırılır. Yaygın olarak kullanılan temel mutasyon operatörleri çevirme, tersine çevirme ve değiş tokuş etmedir. Çoğaltma ve çaprazlama birlikte GA'ya gücünün çoğunu verir, mutasyon ise arama gücünü artırmaya yardımcı olur. Mutasyon, doğada olduğu gibi, bin bitlik bir dizi konumunda bir kez mertebesinde çok nadiren gerçekleşir.

Optimizasyon prosedürü aşağıdaki adımları içerir [117];

- Bir dizi veya kromozom popülasyonu oluşturun.
- Popülasyondan iki birey seçin.
- İki bireyi çaprazlayın.
- İki yeni birey oluşturur.
- Yeni bireylerde karakterleri mutasyona uğrat.
- Daha uygun bireyler seçin.
- Böylece sırasız bir kümede popülasyon elde edilir.
- Seçim, çaprazlama ve mutasyon sürecini tekrarlayın ve eski nesli atın.
- Bazı durdurma kriterleri dahil olana kadar yeni nesiller üretilir.

5.2. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU-PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)

1990'ların başında, hayvan gruplarının sosyal davranışlarıyla ilgili çeşitli çalışmalar geliştirildi. Bu çalışmalar, belirli bir gruba ait bazı hayvanların, yani kuşların ve balıkların kendi grupları arasında bilgi paylaşabildiklerini ve bu yeteneklerin bu hayvanlara büyük bir hayatta kalma avantajı sağladığını göstermiştir [118]. Bu çalışmalardan ilham alan

Kennedy ve Eberhart, 1995 yılında doğrusal olmayan sürekli fonksiyonları optimize etmek için uygun bir meta-sezgisel algoritma olan PSO algoritmasını [119] önerdiler. Yazar, genellikle sürüler ve sürüler gibi hayvan gruplarında görülen sürü zekâsı kavramından ilham alan algoritmayı türetmiştir.

PSO'nun karmaşık matematiksel problemleri çözmek için bir optimizasyon algoritmasının formülasyonuna nasıl ilham verdiğini açıklamak için, bir sürünün davranışı üzerine bir tartışma sunulmuştur. Bir yer üzerinde uçan bir kuş sürüsü, karaya çıkmak için bir nokta bulmalıdır ve bu durumda, tüm sürünün hangi noktaya inmesi gerektiğinin tanımı, çeşitli konulara, yani gıda mevcudiyetini en üst düzeye çıkarmak ve yırtıcıların mevcudiyeti riskini en aza indirgemek. Bu bağlamda kuşların hareketi bir koreografi olarak anlaşılabilir; kuşlar, konacak en iyi yer belirlenene ve tüm sürü aynı anda inene kadar bir süre eşzamanlı olarak hareket eder.

Verilen örnekte, sürünün hareketi ancak tüm sürü üyeleri kendi aralarında bilgi paylaşabildiğinde anlatıldığı gibi gerçekleşir; aksi takdirde, her hayvan büyük olasılıkla farklı bir noktaya ve farklı bir zamanda inerdi. Bu çalışmada daha önce 1990'ların başlarından itibaren hayvanların sosyal davranışlarına ilişkin araştırmalar, karaya çıkmak için iyi bir nokta arayan bir sürünün tüm kuşlarının, sürü üyelerinden biri tarafından bulununcaya kadar en iyi noktayı bilebileceklerine işaret etti. Bu sayede sürünün her bir üyesi, kendi bireysel ve toplumsal bilgi olarak bilinen sürü bilgi deneyimini dengeler. Bu durumda, bir noktanın iyi olup olmadığını değerlendirme kriterlerinin, bu metinde daha önce bahsedilenler gibi olası bir iniş noktasında bulunan hayatta kalma koşulları olduğu fark edilebilir.

Tanımlanan özellikler için en iyi noktayı bulma problemi bir optimizasyon problemidir. Sürü, üyelerinin hayatta kalma koşullarını en üst düzeye çıkarmak için enlem ve boylam gibi en iyi noktayı belirlemelidir. Bunu yapmak için, her kuş aynı anda birkaç hayatta kalma kriterini kullanarak farklı noktaları araştırır ve değerlendirir. Bunların her biri, tüm sürü tarafından bilinene kadar en iyi konum noktasının nerede olduğunu bilme avantajına sahiptir.

Kennedy ve Eberhart, karaya güvenli bir nokta bulma problemini çözerken onlara hayatta kalma konusunda büyük avantajlar sağlayan kuşların sosyal davranışlarından esinlenerek, bu davranışı taklit edebilecek PSO adlı bir algoritma önerdiler. Algoritmanın klasik versiyonu olarak da bilinen atalet versiyonu 1995 yılında önerilmiştir [119]. O zamandan

beri, diğer versiyonlar klasik formülasyonun varyasyonları olarak önerilmiştir, yani lineer azalan atalet ağırlığı [120] , daralma faktörü ağırlığı, dinamik atalet ve maksimum hız azalması [121], hibrit modellerin [122] ve hatta PSO'ya uygulanabilen kuantumdan ilham alan yaklaşım optimizasyon teknikleri [123] önerilmiştir. Burada anlatılan PSO, en gelişmiş algoritma olduğu için yalnızca PSO'nun atalet modelini baz alacaktır ve PSO'nun türevlerini daha iyi anlamak için önce klasik versiyonunu anlamak önem arz etmektedir. Bu çalışmada PSO'nun klasik versiyonu kullanılmıştır.

Bir optimizasyon probleminin amacı, $f(X)$ fonksiyonunun önerilen optimizasyon formülasyonuna bağlı olarak minimize eden veya maksimize eden bir $X = [X_1X_2X_3 \ldots X_n]$ vektörü ile temsil edilen bir değişkeni belirlemektir. Değişken vektör X, konum vektörü olarak bilinir; bu vektör bir değişken modeli temsil eder ve n boyut vektörüdür, burada n bir problemde belirlenebilecek değişkenlerin sayısını, yani bir sürünün karaya ineceği bir noktayı belirleme problemindeki enlem ve boylamı temsil eder. Öte yandan, $f(X)$ işlevine uygunluk işlevi veya amaç işlevi denir; bu, bir X pozisyonunun ne kadar iyi veya kötü olduğunu, yani bir kuşun belirli bir iniş noktasının ne kadar iyi olduğunu düşündüğünü değerlendirebilen bir işlevdir. Bu hayvan onu bulur ve bu durumda böyle bir değerlendirme birkaç hayatta kalma kriteri ile yapılır.

P parçacıklı bir sürü düşünüldüğünde, onu oluşturan i parçacığının her biri için bir t iterasyonda $X_i^t = (x_{i1}x_{i2}x_{i3} \ldots x_{in})^T$konum vektörü ve $V_i^t = (v_{i1}v_{i2}v_{i3} \ldots v_{in})^T$ hız vektörü vardır. Bu vektörler, j boyutu aracılığıyla aşağıdaki denklemlere göre güncellenir:

$$\left.\frac{d\delta}{dt}\right|_{\Delta w_{i+1}^P} = \Delta w_{i+1}^P \tag{5.1}$$

$$\left.\frac{d\delta}{dt}\right|_{\Delta w_{j+1}^P} = \Delta w_{j+1}^P \tag{5.2}$$

$i = 1,2, \ldots . P$ ve $j = 1,2, \ldots . , n$

Denklem (5.1) de bir iterasyonda bir parçacığın hareketine üç farklı katkı olduğunu belirtir, dolayısıyla içinde daha fazla tartışılacak olan üç terim vardır. Bu arada, Denklem (5.2) parçacığın konumlarını günceller. ω parametresi atalet ağırlığı sabitidir ve klasik PSO versiyonu için pozitif bir sabit değerdir. Bu parametre, aynı zamanda keşif (daha yüksek değerler ayarlandığında) olarak da bilinen genel aramayı ve kullanım olarak bilinen yerel aramayı (daha düşük değerler ayarlandığında) dengelemek için önemlidir. Bu parametre açısından, PSO'nun klasik versiyonu ile ondan türetilen diğer versiyonlar arasındaki temel farklardan biri olduğu fark edilebilir.

Hız güncelleme denkleminin ilk terimi, ω parametresi ile parçacığın önceki hızı arasındaki bir çarpımdır, bu nedenle bir parçacığın mevcut olana önceki hareketini belirtir. Dolayısıyla, örneğin, eğer ω = 1 ise, parçacığın hareketi önceki hareketinden tamamen etkilenir, dolayısıyla parçacık aynı yönde ilerlemeye devam edebilir. Öte yandan, eğer $0 \leq \omega < 1$ ise, bu etki azalır, bu da bir parçacığın arama alanındaki diğer bölgelere gitmesi anlamına gelir. Bu nedenle, atalet ağırlığı parametresi azaldıkça, sürü arama alanında daha fazla alanı keşfedebilir, bu da global bir optimum bulma şansının artabileceği anlamına gelir. Ancak, daha düşük ω değerleri kullanıldığında bir bedel vardır, bu da simülasyonların daha fazla zaman alıcı olduğu ortaya çıkar[119].

Denklemin ikinci terimi olan bireysel biliş terimi parçacığın kendi en iyi konumu, örneğin $pbest_{ij}$ ile mevcut konumu X_{ij}^{t} arasındaki fark aracılığıyla hesaplanır. Bu terimin arkasındaki fikrin, parçacık $pbest_{ij}$ konumundan uzaklaştıkça farkın ($pbest_{ij}-X_{ij}^{t}$) artması gerektiğidir; dolayısıyla bu terim artar ve parçacığı en iyi kendi konumuna çeker. Bu terimde bir çarpım olarak var olan c_1 parametresi pozitif bir sabittir ve bir bireysel-biliş parametresidir ve parçacığın kendi önceki deneyimlerinin önemini tartar. İkinci terimin çarpımını oluşturan diğer parametre r_1 dir ve bu [0,1] aralığında rastgele bir değer parametresidir. Bu rastgele parametre, erken yakınsamalardan kaçınarak en olası global optimumu artırdığından önemli bir rol oynar [119].

Üçüncü terim ise sosyal öğrenmedir. Bu nedenle, sürüdeki tüm parçacıklar, hangi parçacığın bulduğuna bakılmaksızın, örneğin $gbest_j$ gibi, elde edilen en iyi noktanın bilgisini paylaşabilir. Biçimi tıpkı ikinci terim gibi, bireysel öğrenmeye ilişkindir. Böylece, ($gbest_j-X_{ij}^{t}$) fark, bazı *t* yinelemelerde bulunana kadar parçacıklar için en iyi noktaya bir çekim görevi görür. Benzer şekilde, c_2 bir sosyal öğrenme parametresidir ve sürünün küresel öğrenmesinin önemini tartar. Ve r_2, r_1 ile tamamen aynı rolü oynar.

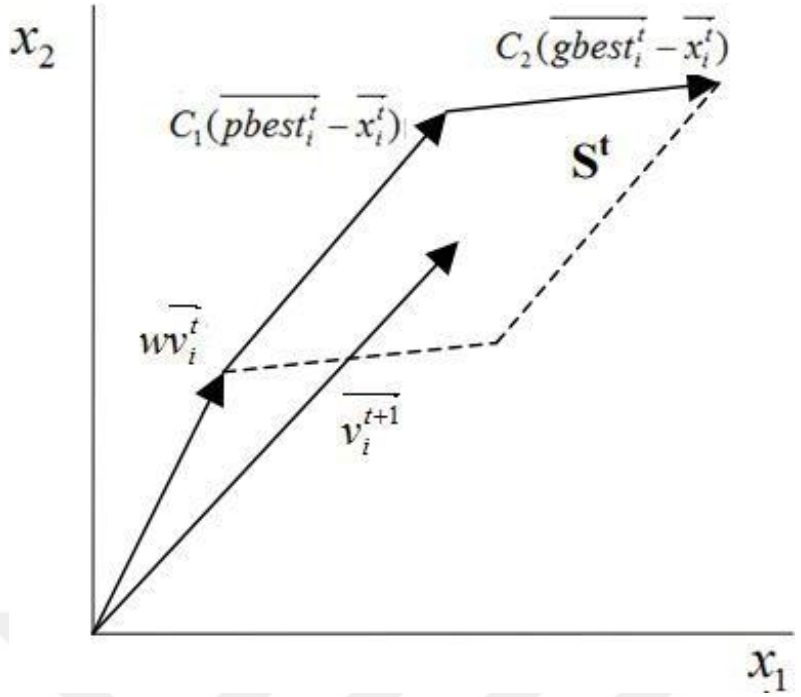
Son olarak, Şekil 5.1'de PSO algoritması akış şemasını göstermektedir ve içindeki optimizasyon mantığının minimumları aradığı ve tüm konum vektörlerinin uygunluk fonksiyonu olarak bilinen *f*(X) fonksiyonu tarafından değerlendirildiği fark edilebilir. Bunun yanı sıra, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3, x_1 ve x_2 değişkenleri ile iki boyutlu bir problemle ilgili olarak, bir parçacığın hızındaki ve bir iterasyon daki pozisyonundaki güncellemeyi göstermektedir [124].

---

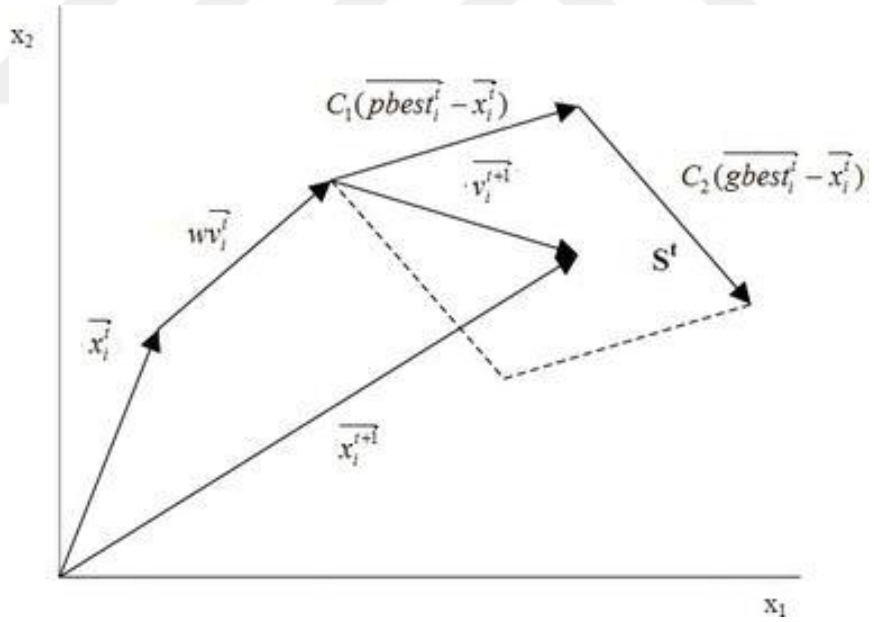
1. Başlatma
   - Her parçacık *i* için bir sürü popülasyon büyüklüğü P:
   - X_i'yi rastgele başlat
   - V_i'yi rastgele başlat
   - Uygunluk fonksiyonu *f*(X)' i değerlendir
   - $gbest$'i en iyi uygunluk ile X_i'nin bir kopyasıyla başlat
2. Durdurma kriteri tatmin edici olana kadar tekrarla (her parçacık *i* için)
   - Denklem 1 ve 2 ye göre V_i^t ve X_i^t'yi güncelle
   - Uygunluk fonksiyonu $f(X_i^t)$ değerlendir.
   - Eğer $f(X_i^t) > f(pbest_i)$ ise X_i^t'yi $pbest_i$ olarak güncelle
   - Eğer $f(X_i^t) > f(gbest)$ ise X_i^t'yi $gbest$ olarak güncelle

---

Şekil 5.1. PSO algoritması akış şeması [124].



Şekil 5.2. İki boyutlu bir problemle ilgili olarak iki bileşenden oluşan bir *t* yinelemesinde hız vektörü [124].



Şekil 5.3. İki boyutlu bir problemle ilgili olarak iki bileşenden oluşan bir iterasyonda güncellenen konum vektörü [124].

5.3. KARINCA KOLONİSİ OPTİMİZASYONU-ANT COLONY

OPTIMIZATION (KKO)

KKO, gerçek karıncaların davranışları ve özellikle de yiyecek arama yöntemleriyle motive edilen meta-sezgisel bir algoritmadır [125]. Karınca kolonisi optimizasyonu, 1992 yılında Marco Dorigo tarafından öncülük edilmiştir ve sosyal karıncaların yiyecek arama davranışına dayanmaktadır. Karıncalar gibi birçok böcek, kimyasal haberci olarak feromon kullanır. Karıncalar sosyal böceklerdir ve yaklaşık 2 ila 25 milyon bireyden oluşan organize kolonilerde birlikte yaşarlar. Yiyecek ararken, bir karınca sürüsü veya hareketli ajanlar, yerel ortamlarında etkileşime girer veya iletişim kurar. Her karınca, başkalarıyla iletişim kurmak için koku kimyasalları veya feromon bırakır. Her karınca, diğer karıncaların feromonla işaretlediği yolu da takip edebilmektedir. Bir karınca bir besin kaynağı bulduğunda, onu feromonla işaretler ve ayrıca ona giden ve giden yolu işaretler. Bu tip bir optimizasyon problemi, optimizasyon probleminin çözümlerinin grafik üzerinde uygun yollar cinsinden ifade edilebildiği bir grafik ile tanımlanabilir [126].

İlk rastgele yiyecek arama yolundan, feromon konsantrasyonu değişir ve karıncalar daha yüksek feromon konsantrasyonu olan yolu takip eder. Buna karşılık, artan karınca sayısı ile feromon güçlendirilir. Gittikçe daha fazla karınca aynı yolu izledikçe, tercih edilen yol haline gelir. Böylece, genellikle en kısa veya daha verimli olan bazı favori rotalar ortaya çıkar. Bu aslında olumlu bir geri besleme mekanizmasıdır. Sistem geliştikçe, herhangi bir karınca algoritmasının özü olan kendi kendini organize eden bir duruma yakınsar.

Bu algoritmada, karıncalar bir besin kaynağı bulmak için feromonu takip edebilirler çünkü yürürken yere feromon bırakırlar ve daha fazla miktarda feromon içeren yollar için olasılıksal bir tercihleri vardır. Arama işlemi sırasında karıncalar tarafından toplanan bilgiler, tüm kenarların bağlantısı ile ilgili feromon izlerinde τ saklanır. Kenarlar ayrıca, sorun örneği tanımı veya karıncalardan farklı bir kaynak tarafından sağlanan çalışma zamanı bilgileri hakkında ön bilgileri temsil eden ek bir ilişkili η değerine (sezgisel değer olarak adlandırılır) sahip olabilir. KKO algoritmaları yinelemelidir. Her yinelemede, feromon ve buluşsal bilgi tarafından önyargılı olan stokastik kararlar temelinde adım adım çözüm sayısı oluşturulur [127].

Tüm karıncalar turlarını hesapladıktan sonra (yani her yinelemenin sonunda), KKO algoritmaları karınca kolonisi tarafından üretilen tüm çözümleri kullanarak feromon izlerini günceller. KKO algoritmaları, ikinci dereceden atamadan kat proteinine veya

yönlendirme araçlarına kadar birçok kombinatoryal optimizasyon problemine uygulandı ve birçok türetilmiş yöntem gerçek değişkenlerdeki dinamik problemlere, stokastik problemlere, çoklu hedeflere ve paralel uygulamalara uyarlandı [128].

KKO için adım adım akış diyagramı aşağıdaki gibidir.

1.Adım: Karınca kolonisinin oluşturulması

Optimizasyon probleminin çözüm uzayında rastgele bir karınca kolonisi oluşturulur. Böylece karınca popülasyonu başlatılır. Böylece karınca kolonisi çözüm uzayında rastgele dağılmış olur. Başlatma, feromon modelini, buluşsal değişkenleri, bir karınca yönlendirme tablosunu ve stokastik karar politikasını içerir. Problemin temsili durum özelliği veya feromon modeli τ_{ij} ile verilmektedir. Genel olarak, feromon modeli için, parametrelerin son bileşeni iyi kararları öğrenmek için düşünülebilir. PSS değişkenlerinin alt sınırları, η_{ij} buluşsal değişkenler olarak kabul edilir. Bu feromon modeli ve buluşsal değişkenler, karınca yönlendirme tablosunu A (τ_{ij} , η_{ij}) çerçevelemek için birleştirilir. İyi bir keşif yapmak için açgözlü ve rastgele orantılı stokastik bir karar politikası göz önünde bulundurulur. Feromon değerleri, kısıtlı bir çözüm uzayında dağıtılan kontrol değişkenlerinin (PSS parametreleri) sınırlı değerleridir.

2.Adım: Uygunluk Fonksiyonu

Bir bireyin uygunluk fonksiyonu genellikle amaç fonksiyonunun bir tür dönüşümüdür. Uygunluk fonksiyonu, karınca bölgesini değerlendirmek için kullanılan kriterdir ve aynı zamanda algoritmanın ilerlemesini kontrol etmek için kullanılan kriterlerden biridir. Bu uygunluk işlevi, bireyler arasındaki çeşitliliği korur. Bu optimizasyon problemi için, bir sönüm faktörü ve sönüm oranının kombinasyonu ile özdeğer tabanlı çok amaçlı bir fonksiyon aşağıdaki gibi kabul edilir [129].

$$J = \sum_{J=1}^{NP} \sum_{\sigma_i \geq \sigma_0} (\sigma_i - \sigma_0)^2 + \alpha \times \sum_{J=1}^{NP} \sum_{\varsigma_0 - \varsigma_i} (\varsigma_0 - \varsigma_i)^2 \tag{5.3}$$

3.Adım: Karıncanın olasılık hareketi.

Anahtar işlem, rastgele orantılı kural p_{ij}^{k} ile tek bir karıncanın olasılık hareketidir. Düğüm geçişi için stokastik karar politikasını temsil eder:

$$p_{ij}^{k} = \frac{[\tau_{ij}]^{\alpha}[\eta_{ij}]^{\beta}}{\sum_{i \in N_i^k}[\tau_{il}]^{\alpha}[\eta_{il}]^{\beta}} \quad l \in N_i^k \tag{5.4}$$

Öyle ki;

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \tag{5.5}$$

5.Adım: Feromon güncelleme.

Feromon güncellemesi iki adımı içerir: feromon buharlaşması ve feromon birikimi. Feromon buharlaşması, önceki kötü kararları unutmak için kullanılır ve denklemi şu şekilde verilir:

$$\tau_{ij} = (1 - p)\, \tau_{ij};\ \forall (i,j) \in L \tag{5.6}$$

Öyle ki $p \in (0,1]$.

Bu aynı zamanda erken yakınsama ve düşük kaliteli çözümler olasılığını önlemek için yapılır. Feromon tortusu, daha iyi turlara ait olan yaylara daha fazla feromon biriktirmeyi amaçlar:

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sum_{k=1}^{m} \Delta\tau_{ij}^{k}, \qquad \forall (i,j) \in L \tag{5.7}$$

Öyle ki;

$$\Delta\tau_{ij}^{k} = \begin{cases} \frac{1}{C^k}, eğer\ arc(i,j) \in T^K \\ 0, \quad diğer\ durumlar \end{cases} \tag{5.8}$$

5.Adım: Durdurma kriteri.

Karıncalar tarafından yapılan tüm turlar, olası çözümler değerlendirilir. Değerlendirme kriteri, her dönüşün fizibilitesini, maliyetini ve kullanılabilirliğini dikkate alır. Durdurma kriteri karşılanırsa algoritma durur; aksi takdirde algoritma Adım 3'e devam eder. Durdurma kriteri sadece yineleme sayılarına değil aynı zamanda çözümün iyileştirme oranına da bağlıdır. Bu çözüm, belirli sayıda yinelemeden sonra art arda N kez iyileştirmiyorsa, çözünürlük durur [130].

KKO'nun arama prosedürünün özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- KKO, kısıtlı ayrık optimizasyon problemleri için iyi bir seçimdir;
- KKO, rastgele yol seçimi ve koloni belleğinin bir kombinasyonu nedeniyle zayıf başlangıç çözümlerinden daha az etkilenir;
- KKO dinamik ve çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir;
- KKO'da dağıtılmış hesaplama erken yakınsamayı önler;
- Olumlu geri bildirim, iyi çözümlerin hızla keşfedilmesine yol açar;
- KKO, ilk tahminde bulunmadan parametre uzayını arar [130].

5.4. YAPAY ARI KOLONİ ALGORİTMASI-ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITM (YAKA)

Gerçek parametre optimizasyonu için 2005 yılında Karaboğa tarafından önerilen Yapay Arı Kolonisi (YAKA) algoritması kısıtsız optimizasyon problemleri için arı kolonisinin [131] yiyecek arama davranışını simüle eder [131], [132]. Kısıtlı optimizasyon problemlerini çözmek için algoritmaya bir kısıtlama işleme yöntemi dahil edilmiştir.

Gerçek bir arı kolonisinde uzmanlaşmış kişiler tarafından yapılan bazı görevler vardır. Bu özelleşmiş arılar, verimli iş bölümü ve öz-örgütlenme yaparak kovanda depolanan nektar miktarını en üst düzeye çıkarmaya çalışırlar. YAKA algoritmasının benimsediği bir bal arısı kolonisinde sürü akıllı yem seçiminin minimal modeli, üç çeşit arıdan oluşur:

işçi arılar, gözcü arılar ve kâşif arılar. Koloninin yarısı işçi arılardan, diğer yarısı da gözcü arılardan oluşur. İşçi arılar, daha önce keşfedilen nektar kaynaklarından yararlanmak ve kovandaki diğer bekleyen arılara (gözcü arılar) kullandıkları besin kaynağı alanının kalitesi hakkında bilgi vermekle sorumludur. Gözcü arılar, işçi arıların paylaştığı bilgilere göre kovanda bekler ve yararlanacakları besin kaynağına karar verirler. İzciler, bir iç motivasyona veya olası dış ipuçlarına bağlı olarak veya rastgele olarak yeni bir besin kaynağı bulmak için çevreyi rastgele ararlar.

YAKA algoritmasının ana adımları aşağıda verilmiştir [133]:

1. Adım: Gıda kaynağı konumlarını başlatın.

2.Adım: Her işçi arı, besin kaynağı alanında yeni bir besin kaynağı üretir ve daha iyi olan kaynağı kullanır.

3.Adım: Her gözcü arı, çözümünün kalitesine göre bir kaynak seçer, seçilen besin kaynağı alanında yeni bir besin kaynağı üretir ve daha iyi olan kaynağı kullanır.

4. Adım: Terk edilecek kaynağı belirleyin ve işçi arısını yeni besin kaynakları aramak için gözcü olarak görevlendirin.

5. Adım: Şimdiye kadar bulunan en iyi besin kaynağını ezberleyin.

6. Adım: Durdurma kriteri karşılanana kadar 2-5 arasındaki adımları tekrarlayın.

Algoritmanın ilk adımında, X_i $(i = 1 \dots, SN)$ çözümleri, SN'nin gıda kaynaklarının sayısı olduğu parametre aralığında rastgele üretilir. Algoritmanın ikinci adımında, toplam sayısı besin kaynağı sayısının yarısına eşit olan her işçi arı için Denklem (5.9) ile yeni bir kaynak üretilir:

$$v_{i,j} = x_{i,j} + \varphi_{ij}\,(x_{i,j} - x_{k,j}) \tag{5.9}$$

Burada φ_{ij} [-1,1] aralığında düzgün dağılmış gerçek bir rastgele sayıdır, k, koloniden rastgele seçilen çözümün indeksidir $(k = int(rand * SN) + 1), j = 1, \dots., D$ ve D problemin boyutudur. Vi ürettikten sonra bu yeni çözüm Xi çözümü ile karşılaştırılır ve işçi arı daha iyi olan kaynaktan yararlanır. Algoritmanın üçüncü adımında, gözcü arı Denklem (5.10) olasılıkla bir besin kaynağı seçer ve Denklem (5.9) ile seçilen besin kaynağı bölgesinde yeni bir kaynak üretir. İşçi arıya gelince, daha iyi olan kaynağın kullanılmasına karar verilir [133].

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{SN} f_i} \tag{5.10}$$

Burada f, Xi çözümünün uygunluğudur. Tüm izleyiciler kaynaklara dağıtıldıktan sonra kaynakların terk edilip edilmeyeceği kontrol edilir. Bir kaynağın iyileştirilemeyeceği döngü sayısı önceden belirlenmiş bir sınırdan büyükse, kaynak tükenmiş olarak kabul edilir. Tükenmiş kaynakla ilişkilendirilen görevli arı, kâşif olur ve Denklem (5.11) ile problem alanında rastgele bir arama yapar.

$$x_{i,j} = x_{min,j} + rand(0,1)(x_{max,j} - x_{min,j}) \tag{5.11}$$

Burada $x_{min,j}$ ve $x_{max,j}$ sırasıyla j boyutunun alt ve üst sınırlarıdır. Bu besin kaynakları işçi arıların SN sayısına rastgele atanır ve uygunlukları değerlendirilir

5.5. KARGA ARAMA ALGORİTMASI-CROW SEARCH ALGORITHM (KAA)

A. Askarzadeh [134] tarafından geliştirilen karga arama algoritması, kısıtlı optimizasyon problemlerini ele almak için tasarlanmış meta-sezgisel bir algoritmadır. Yiyecek arama ve elde etmede kargaların akıllı davranışlarından yararlanır. Kargaların fazla yiyecekleri sakladığı ve gerektiğinde beslediği varsayılır. Ayrıca diğer kargaları saklandıkları yere kadar takip ettikleri ve yiyeceklerini çaldıkları bilinmektedir. Hırsızlık yapan kargaların, yiyeceklerinin çalınmaması için saklandıkları yer konusunda daha dikkatli davrandıkları da varsayılmaktadır.

KAA'da, sömürü ve keşif esas olarak kargaların farkındalık olasılığı (AP) parametresi tarafından kontrol edilir, yani başka bir karga tarafından takip edilip edilmediği. Takip edildiğinin farkındaysa, saklandığı yere gitmek yerine rastgele herhangi bir pozisyon alacaktır. Azaltılmış farkındalık olasılık değeri için, KAA aramasını mevcut iyi bir çözümün elde edildiği yerel olarak yürütür. Bu nedenle, düşük AP değerleri, sömürü

kapasitesini artırır. Artan AP değeri, global bir arama (rastgeleleştirme) yürütme olasılığıyla sonuçlanır. Sonuç olarak, büyük AP değerlerinin kullanılması, algoritmanın keşif kabiliyetini arttırır.

KAA sözde kodu Şekil 5.4'te verilmiştir.

Arama alanında N karga sürüsünün yerini rastgele ayarlayın

Kargaların yerini hesaplayın

Sürüdeki her karganın hafızasını ayarlayın

while $x < x_{max}$ *(fesih kriterine ulaşılamadı)*

for $i = 1$ *den N'e*

İzlenecek kargalardan birini rastgele seçin

Farkındalık olasılığı belirleyin

if $r_j \geq AP^{j,x}$

$L^{i,x+1} = L^{i,x} + r_i * fl^{i,x} * (R^{j,x} - L^{i,x})$

else

$L^{i,x+1}$ = *Arama alanının rastgele bir konumu*

end

end

$L^{i,x+1}$ *'in uygunluğunu kontrol edin*

Karganın yeni konumunu değerlendir

Kargaların hafızalarını güncelle

end

Şekil 5.4. KAA'nın sözde kodu

5.6. PROBLEMİN TANITIMI

Elektrik güç sistemleri karmaşık doğrusal olmayan sistemlerdir. Olumsuz çalışma

koşulları nedeniyle, güç sistemlerinde sıklıkla düşük frekanslı elektromekanik salınımlar meydana gelir [92]. Elektrik güç sistemlerinin artan karmaşıklığı nedeniyle, bu sistemlerin dinamik dengesini iyileştirmek ve sistem çalışması sırasında meydana gelen düşük frekanslı salınımları azaltmak için ek uyarım kontrol sinyallerinin kullanılması ilgi çekicidir [93].

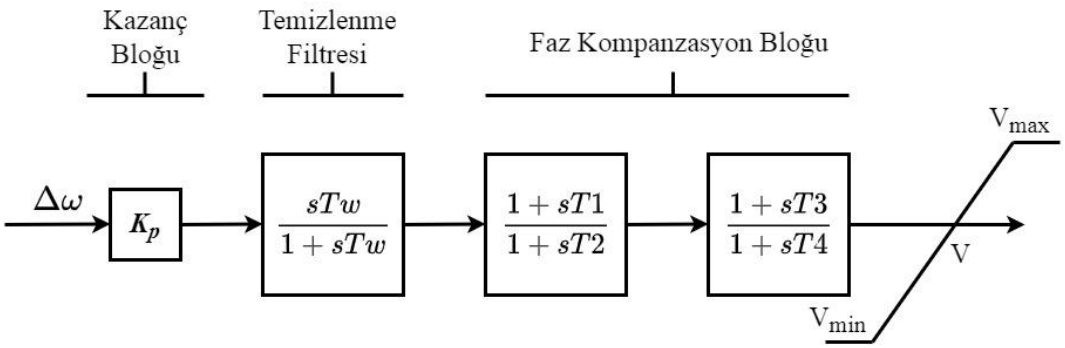
Güç sistemlerinde yük değişimi çalışma gerilimini etkilediğinden sürekli uyarma yerine Otomatik Voltaj Regülatörleri (AVR) kullanılmıştır. Senkron generatörün polar gerilimi, aktarılan güç miktarı ve güç açısı, iletim hattının açılması, büyük bir yükün kesilmesi veya ani yük aktivasyonu gibi durumlarda çalışma noktasından sapar. Sistem böyle bir arıza ile karşılaştığında AVR, senkronizasyon anına ters etki yapacaktır. Senkronize tork zayıflaması, sistemdeki salınımların genliğinde ve frekansında bir artışa yol açar. AVR'nin bu olumsuz davranışını ve sistemlerin sönümlemenin yetersiz mekanik formunun bir bileşimi nedeniyle oluşabilecek düşük frekanslı elektromekanik salınımları ortadan kaldırmak için, PSS'ler AVR ile birlikte uyarma kontrol sistemi için ek bir kontrol sinyali sağlamak için kullanılmaya başlandı [1], [94].

PSS, bu düşük frekanslı salınımları (0,2 ila 3,0 Hz) azaltmak için uyarma kontrolü ile elektriksel tork sağlamak üzere tasarlanmıştır [95]. Ayrıca PSS, geçici kararlılığı ve sönümleme salınımını iyileştirmek için uyarma kontrol sistemine ek bir kontrol sinyali sağlar. PSS hem arıza sonrası salınımları bastırabilmeli hem de terminal gerilimini arıza öncesi değerine ayarlayabilmelidir.

Güç sistemi güvenilirliğinin optimizasyon zorluklarından biri, PSS parametrelerinin ayarlanması sorunudur. Bu çalışmada çok makinalı bir sistemde KKO tabanlı PSS ve YAKA tabanlı PSS kullanılarak sistem kararlılık analizi yapılmıştır. Buna ek olarak tek makinalı sonsuz baralı bir güç sisteminde güç sistemi dengeleyicisinin parametrelerinin bulunması KAA ile yapılmış olup GA ve PSO ile kıyaslanması bu çalışmada ilk kez irdelenmiştir.

5.7. PSS'İN YAPISI

PSS'nin amacı, salınım modlarına bir sönümleme torku geri yüklemek veya uygulamaktır. Kazanç, yıkama filtreleri, faz dengeleme blokları ve burulma filtreleri, PSS'nin yapısını oluşturur. En yaygın kullanılan PSS yapısı Şekil 5.5'de görülmektedir [135], [136].



Şekil 5.5. Yaygın olarak kullanılan PSS'in yapısı[135], [136].

5.7.1. Kazanç Bloğu

K_p PSS'ye eklenen sönümleme seviyesini tanımlar. Teorik olarak, K_p optimum sönümleme değerine bağlı seviyeye kurulabilir; yine de diğer faktörler her zaman K_p'yi sınırlayacaktır [137].

5.7.2. Temizleme Filtresi

Temizlenme filtresi, yüksek geçişli bir filtre görevi görerek, PSS'nin çalışması nedeniyle hız, frekans veya alan geriliminin gücünde herhangi bir sabit değişikliği önler. Sürekli hız değişiklikleri, o filtre olmadan terminal gerilimini da değiştirecektir. PSS'nin yalnızca stabilizasyon sinyalinin geçici varyansı yüksek olduğunda çalışması beklenir. PSS'nin yalnızca hız değişikliklerine yanıt vermesini sağlar. Hem alanlar arası hem de yerel modlarda sinyallere geçiş bandı etkisini sağlamak için $T_w$değeri seçilir. T_w 1 ile 20 saniye arasında olabilir. T_w10 saniye ayarlandığında, ilk salınım stabilizasyonu önemli ölçüde iyileşir. Bu çalışmada T_w10 saniye olarak seçilmiştir [1].

5.7.3. Faz Kompanzasyonu

Faz kompanzasyonu bloğu, uyarıcının çıkışı ile generatör elektrik torku arasındaki faz gecikmesini tanzim etmek için gerekli faz yönlendirme özelliklerine sahip olmalıdır. Faz dengeleyici, PSS'den yalnızca saf bir sönümleme torku girdisi almak için faz gecikmesini ortadan kaldırmalıdır. Aslında, saf bir faz-ön-gecikme bloğu elde etmek zordur, bu yüzden bunun yerine bir faz-ön-gecikme bloğu oluşturulmuştur. Faz gecikmesini iptal etmek için.

T_1, T_2, T_3, ve T_4 (zaman sabitleri) akıllıca seçilmelidir. Sonuç olarak, işletme koşullarında yapılan ayarlamalar için geri ödenmesi gereken faz özelliğinden ödün verilmiş ve çeşitli sistem koşullarına uygun bir özellik seçilmiştir [135].

5.8. PROBLEMİN FORMÜLASYONU

Bu analiz, yaygın olarak kullanılan hıza dayalı klasik öncü gecikmeli PSS'yi [111], [136] kullanır. PSS transfer fonksiyonu Denklem (5.12)'de belirtilmiştir;

$$Vpss = K_p \frac{sTw}{1+sTw}\left[\frac{(1+sT_1)}{(1+sT_2)}\frac{(1+sT_3)}{(1+sT_4)}\right]\Delta\omega \tag{5.12}$$

Temizlenme filtresi bloğu zaman sabitleri tipik olarak Denklem7'de tanımlanır. T_w genellikle çok önemli değildir, 0.5 ila 20 saniye arasında değişir [1]. Yapılan çalışmada $T_w = 10\ s$ seçilmiştir. Önemli bir kesintiden sonra sistemin salınımını en aza indirmek için PSS oluşturulur, böylece sistemin kararlılığını artırmak için K_p, T_1, T_2, T_3 ve T_4 hesaplanmalıdır.

5.8.1. Amaç Fonksiyonu ve PSS Ayarı

PSS'nin güç açısı, rotor hızı, alan akımı sapması vb. gibi düşük frekanslı salınımları en aza indirmesi önerildiğinden, bu çalışmadaki amacımız rotor hızı sapmasını en aza indirmektir. Bu araştırmada, rotor hızı sapmaları Denklem (5.13)'te belirtilen uygunluk fonksiyonu olarak kabul edilir.

$$J = \int_{t=0}^{t=tsim} (t\Delta\omega)^2 dt \tag{5.13}$$

Burada, $\Delta\omega$ belirli bir PSS parametreleri grubu için rotor hızı sapmasını temsil eder ve tsim simülasyon zaman aralığını belirtir. Amacı, çeşitli koşullar altında zaman ayarı ve aşımlarla ilgili olarak cihaz yanıtını iyileştirmek için uygunluk işlevini azaltmaktır. Mimari denklemi, kısıtlamaları PSS parametre sınırları [138], [139] olmak üzere önceki

daraltılmış optimizasyon problemi olarak tanımlanabilir. Optimize edilmiş parametre sınırları, problemin kısıtlarıdır.

$$K_{pmin} \leq K_p \leq K_{pmax} \tag{5.14}$$

$$T_{1min} \leq T_1 \leq T_{1max} \tag{5.15}$$

$$T_{2min} \leq T_2 \leq T_{2max} \tag{5.16}$$

$$T_{3min} \leq T_3 \leq T_{3max} \tag{5.17}$$

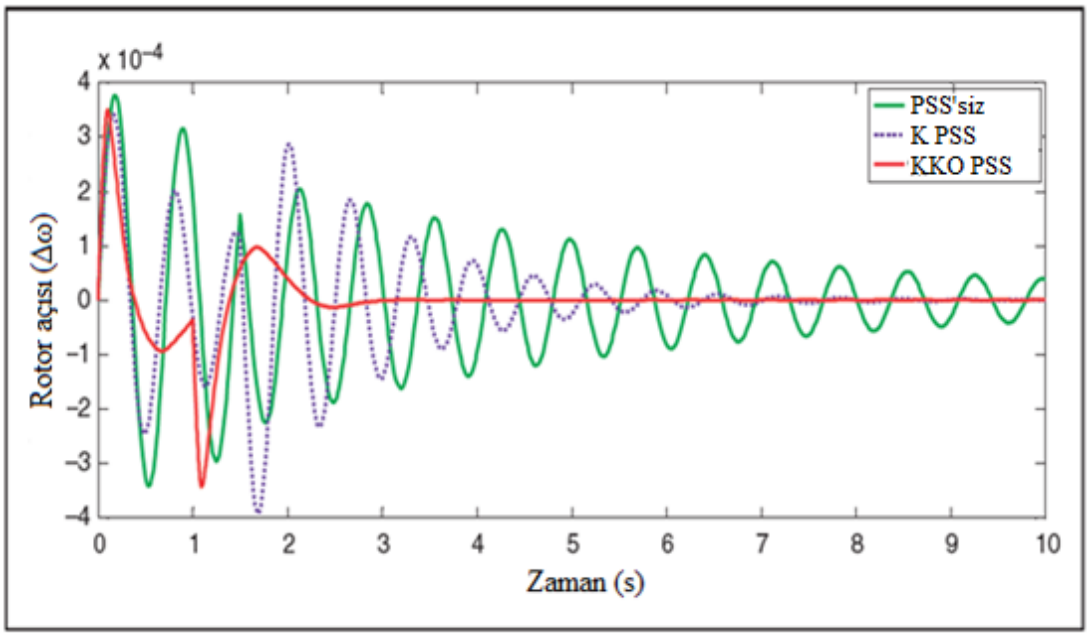
$$T_{4min} \leq T_4 \leq T_{4max} \tag{5.18}$$

Denklem (5.14), (5.15), (5.16), (5.17) ve (5.18) PSS'in parametrelerinin kısıtları göstermektedir. Bu kısıtlar göz önüne alınarak *J* minimize edilmeye çalışılmaktadır.

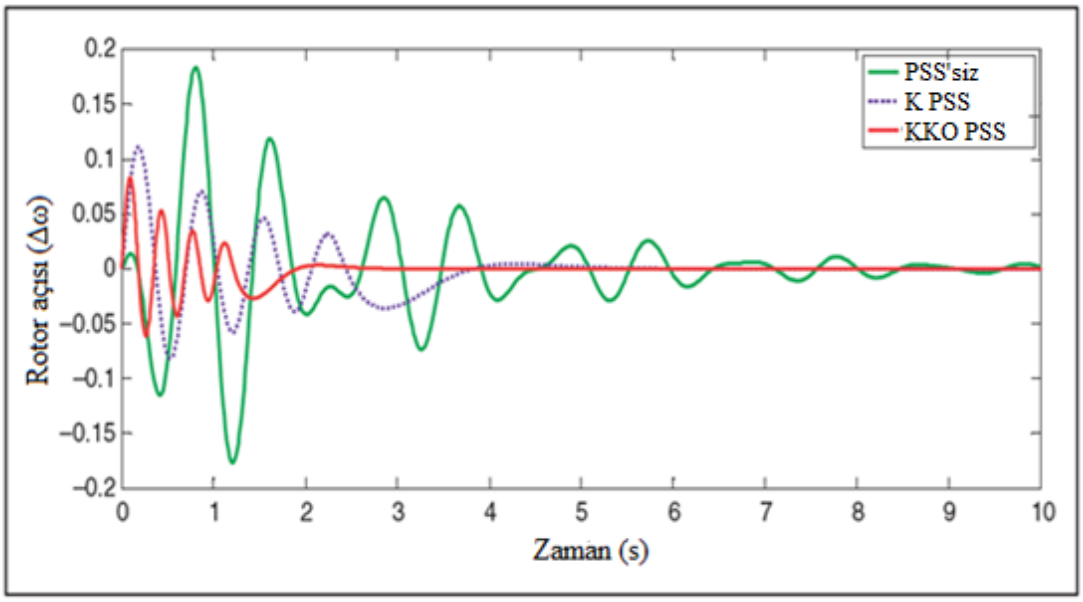
K_p 0.01 ile 100 arasındadır ve T_1, T_2, T_3, T_4 0.01 ile 1 arasındadır [2].

5.9. PROBLEMİN KKO, YAKA, GA ve PSO İLE ÇÖZÜMÜ

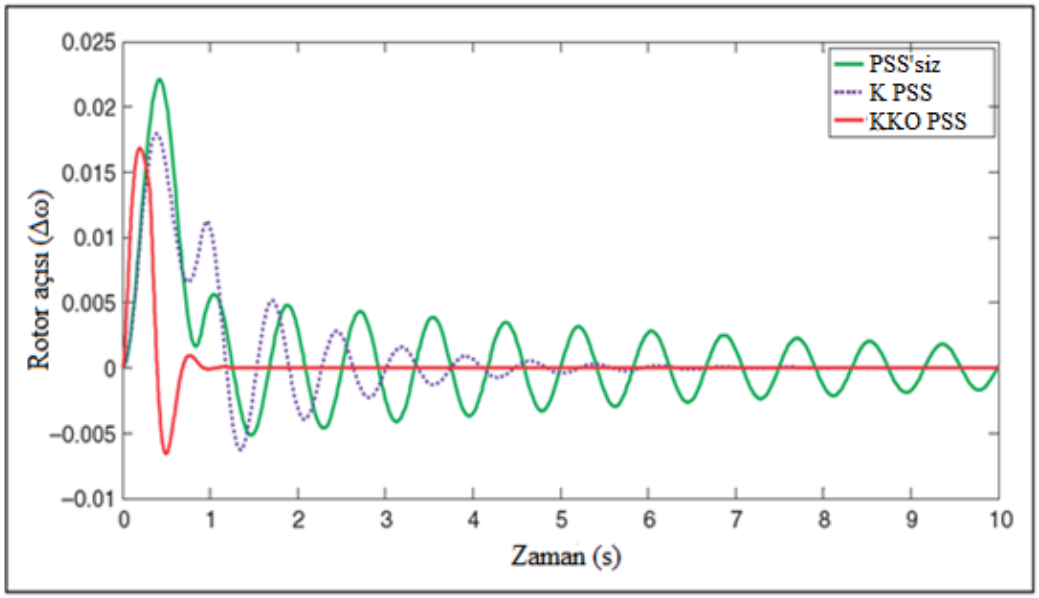
Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de çok makinalı sonsuz baralı bir sistemde PSS'siz, konvansiyonel PSS'li ve KKO PSS'li sistemde üç farklı durum için generatörlerin hız sapmasının sonuçları verilmektedir.



Şekil 5.6. PSS'siz, konvansiyonel ve KKO tabanlı PSS için generatörün hız sapması (1. durum) [130].



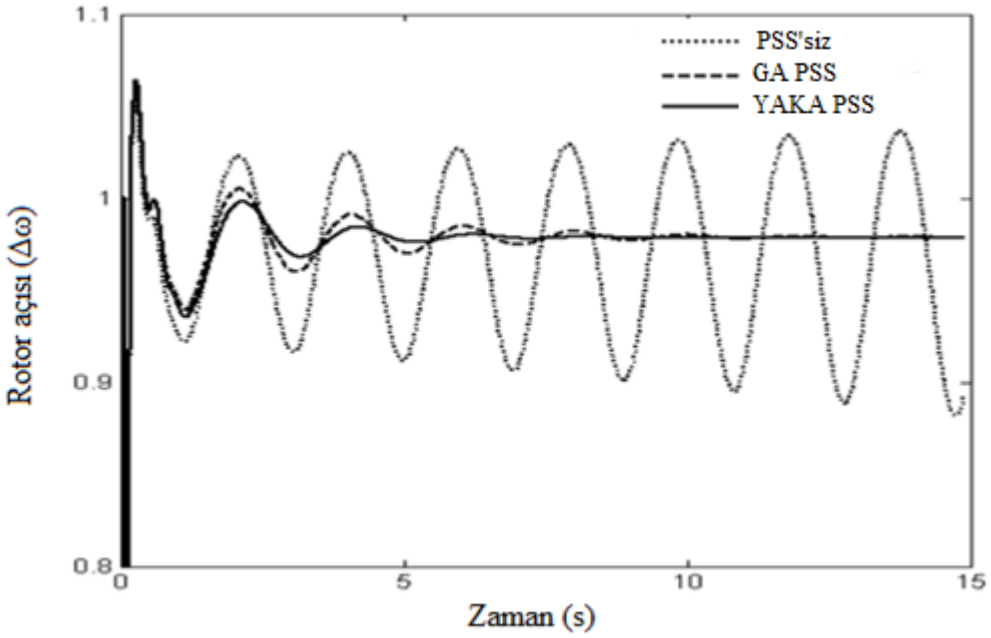
Şekil 5.7. PSS'siz, konvansiyonel ve KKO tabanlı PSS için generatörün hız sapması (2. durum) [130].



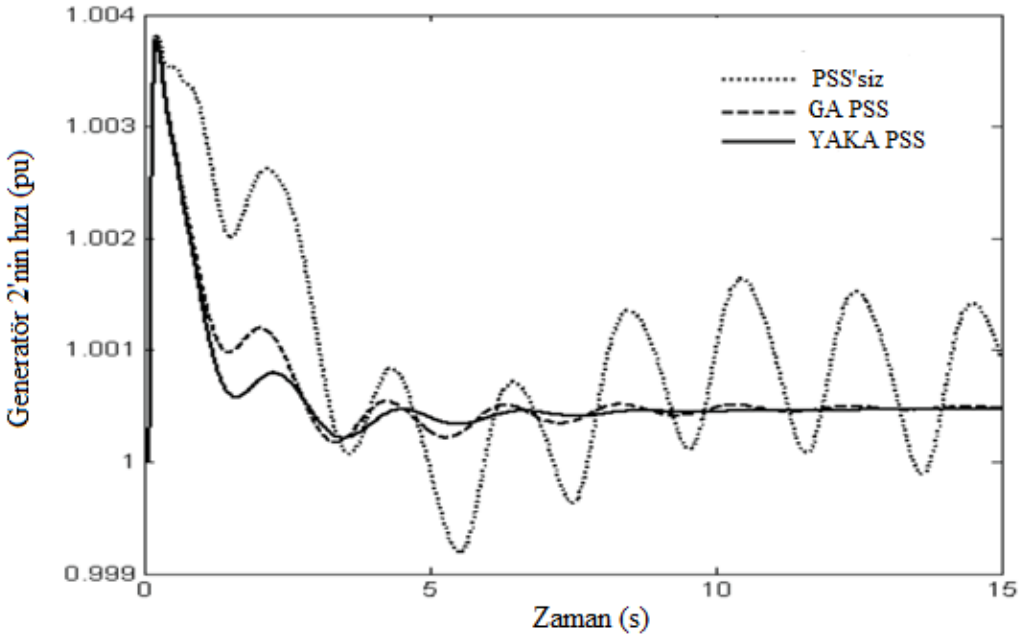
Şekil 5.8. PSS'siz, konvansiyonel ve KKO tabanlı PSS için generatörün hız sapması (3. durum) [130].

Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de görüleceği üzere sisteme KKO tabanlı PSS eklendiğinde sistem daha hızlı sönümleme gerçekleştirmektedir. Düşük frekanslı salınımların yerleşme süresinin diğer tekniklerle karşılaştırıldığında 3 saniyeden daha azaldığını göstermektedir. Ayrıca diğer tekniklere kıyasla KKO tabanlı PSS in yakınsaması daha erken olmaktadır. Önerilen yöntemin optimal sınır değerlerinin, gerçek zamanlı simülasyonda düşük frekanslı salınım için global sönümleme performansını iyileştirdiği açıkça gösterilmiştir. KKO tarafından elde edilen optimal PSS parametreleri, geleneksel algoritmalarla elde edilen parametrelerden büyük ölçüde farklıdır. Sonuç olarak, çok makineli sistemler için etkili PSS'leri sentezlemek için önerilen tasarım metodolojisi ile birleştirilmiş geleneksel bir dengeleme tasarım tekniği kullanılabilir.

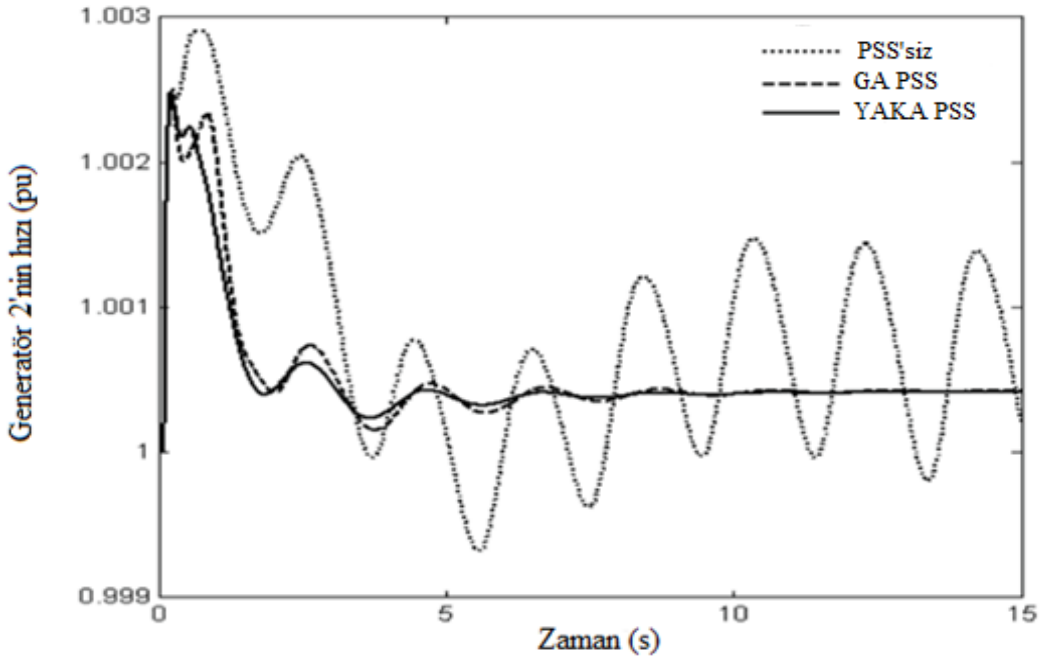
Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11 sırasıyla sistemin 3.barada hattan toprağa arıza durumunda gerilim büyüklüğünün değişimi, sistemin hat toprak arızası durumunda generatör hızının değişimi ve sistemin üç faz hata durumunda generatörün hız değişimi PSS'siz, GA tabanlı PSS'li ve YAKA tabanlı PSS'li sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.9. Sistemin hat toprak arızası durumunda gerilim büyüklüğünün PSS'siz, GA tabanlı PSS'li ve YAKA tabanlı PSS'li değişimi [133].



Şekil 5.10. Sistemin hat toprak arızası durumunda generatör hızının PSS'siz, GA tabanlı PSS'li ve YAKA tabanlı PSS'li değişimi [133].



Şekil 5.11. Sistemin üç faz hatası durumunda generatör hızının PSS'siz, GA tabanlı PSS'li ve YAKA tabanlı PSS'li değişimi [133].

Önerilen YAKA'nın dört makineli bir güç sistemi üzerindeki etkinliğini test etmek için çeşitli çalışma koşulları altında simülasyonu yapılmıştır. Önerilen stabilizatörlerin etkinliği ve dayanıklılığı ile düşük frekanslı salınımları azaltma ve sistem gerilim profillerini iyileştirme kapasiteleri, özdeğer analizi ve doğrusal olmayan simülasyon sonuçları ile gösterilmiştir.

Önerilen YAKA'nın performansını GA'nın performansına değerlendirmek için özdeğer analizi ve doğrusal olmayan zaman alanı simülasyonu kullanılmıştır. Simülasyon çalışmaları, YAKA dengeleyicilerinin, güç sistemi düşük frekanslı salınımlarını sönümlemede GA dengeleyicilerinden daha iyi performans gösterdiğini ve güç sistemi dinamik kararlılığını önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, GA ile karşılaştırıldığında, YAKA algoritmasının daha hızlı bir yakınsama oranına ve daha yüksek bir doğruluk derecesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

KAA, PSO ve GA tabanlı PSS'lerin karşılaştırmalı analizi ayrıca verilmiştir.

6. KARGA ARAMA ALGORİTMASIYLA TEK MAKİNALI SONSUZ BARALI BİR GÜÇ SİSTEMİNDE GÜÇ SİSTEMİ DENGELEYİCİSİNİN PARAMETRELERİNİN BULUNMASI

Ana ilhamını yiyeceklerini elde etmek için karga arama mekanizmasından alan Askarzadeh [134] tarafından Karga Arama Algoritması (KAA) adlı yeni bir sürü zekası meta-sezgisel optimizasyon yöntemi önerildi. Bu optimizasyon tekniğinin temel fikri, kargaların yiyeceklerini saklamak ve çalmak için ezberlemeye, iletişim becerilerine ve sosyal davranışlara dayanır. Kargaların vücut ölçülerine göre daha büyük beyinleri vardır. Beyin-vücut oranına göre insan beynine çok yakındır. Kargaların zeki olduğuna dair çok sayıda kanıt bulunmaktadır. Ayna deneylerinde öz farkındalık göstermişlerdir. Alet kullanabilirler ve alet yapma becerisine sahiptirler. Ayrıca, bir yaklaşım düşmanca olduğunda yüzleri hatırlama ve birbirlerini uyarma yeteneğine de sahiptirler.

Kargalar, ihtiyaç duyduklarında fazla yiyecekleri gizleyebilir ve elde edebilirler. Mevsimler boyunca yiyecekleri saklayabilirler. Ayrıca hırsızlık yaptıkları ve diğer kuşların yiyeceklerini çaldıkları bilinmektedir. Karga hırsızlık yaptığında, yiyeceklerinin başkaları tarafından çalınmasını önlemek için saklanacak yerleri değiştirmek gibi ek adımlar atılabilir. Popülasyon tabanlı bir sürü zekâsı meta-sezgisel optimizasyon yöntemi olan KAA, kargaların akıllı eylemlerine dayanır. Bu yöntemin ilkeleri aşağıdakilere bağlıdır [134];

- Sürüler halinde yaşarlar.
- Saklandıkları yerin konumunu hatırlarlar.
- Yiyecekleri çalmak için birbirlerini takip ederler.
- Kaynaklarını yağmalanma tehdidine karşı korurlar.

Bu meta-sezgisel algoritmanın amacı, gizli yiyecek konumunu belirlemek için karga i' nin başka bir karga j' yi takip etmesidir. Karga i bu süreçte yerini yavaş yavaş güncellemelidir. Ayrıca, soyulduğunda, karga yiyeceğin yerini değiştirmelidir.

Bir dizi karga içeren d boyutlu bir uzayın mevcut olduğu varsayılmaktadır. KAA, N karga ve iki matrisle başlatılır: Konum ve Anma matrisleri.

- Konum matrisi her karga i'nin x iterasyonunda konumunu tanımlar. Karga i'nin konum vektör $L^{i,x}$ $(i = 1,2, \dots, N; x = 1,2, \dots, x_{max})$ olarak tanımlanır. Burada $L^{i,x} = \left[L_1^{i,x}, L_2^{i,x}, \dots, L_d^{i,x}\right]$ ve x_{max} maksimum iteresyasyon sayısı olarak tanımlanır.
- Anma matrisi, saklanma yerlerinin konumlarının gizlendiği R'yi kaydetmiştir. Her karganın saklandığı yeri ezberlediği bir hafızası vardır. x iterasyonunda, karga i'nin saklanma konumu bir vektör olan $R^{i,x} = \left[R_1^{i,x}, R_2^{i,x}, \dots, R_d^{i,x}\right]$ tarafından tanımlanır. $R^{i,x}$ o zamana kadarki karganın ulaştığı en iyi konumdur.
- Karga i, yiyecek arama sırasında yiyecekleri çalmak için karga j'yi takip eder. Çoğunlukla arama sürecinde meydana gelen iki durum oluşur.

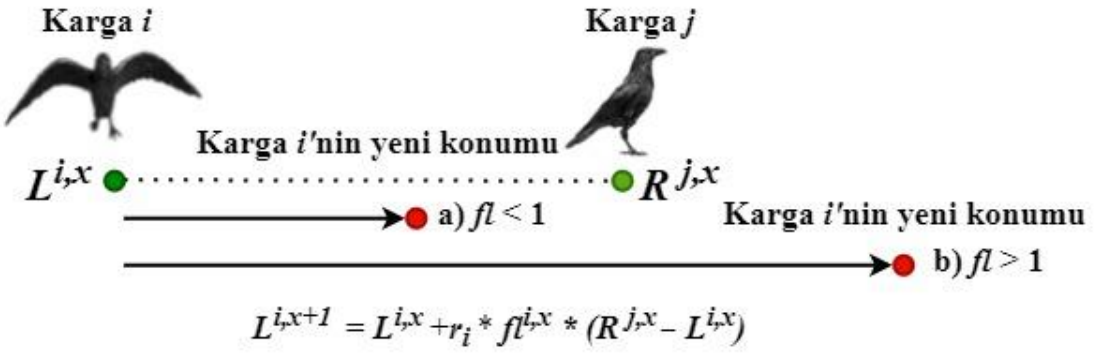
1.Durum

Karga i, karga j'yi takip ederken karga j farkında değildir. Sonuç olarak, karga i, karga j'nin gizli alanına girmektedir. Güncellenen karga i' nin konumu Denklem (6.1)'te ifade edilmiştir:

$$L^{i,x+1} = L^{i,x} + r_i * fl^{i,x} * \left(R^{i,x} - L^{i,x}\right) \quad (6.1)$$

Burada fl, karga i'nin uçuş uzunluğudur ve r_i eşit olarak dağılmış 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıyı belirtir.

fl arama yeteneği üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. fl küçük bir değer için yerel aramaya, büyük değer ise global aramaya yol açar. Şekil 6.1'te gösterildiği gibi fl<1 ise sonraki karga i'nin konumu $L^{i,x}$ ve $R^{i,x}$arasındaki kesikli çizgi üzerindedir. Öte yandan, eğer fl>1 ise, bir sonraki karga i'nin konumu, kesikli çizgide $R^{i,x}$'i geçebilir.



Şekil 6.1. KAA'da 1. durum arama mekanizması

2.Durum

Karga i, karga j'yi takip ediyor, karga j ise bunun farkında. Karga j, yiyeceğinin çalınmasını önlemek için arama alanında farklı bir konuma giderek karga i'yi aldatacaktır. Bu iki durum Denklem (6.2)'te ifade edilmiştir;

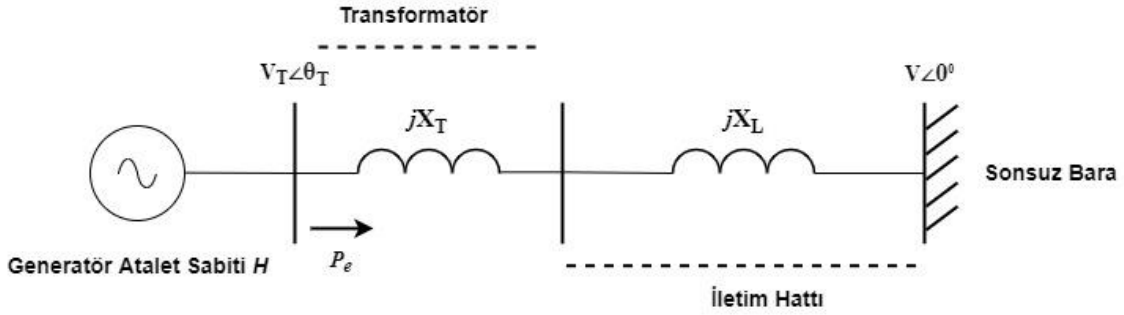
$$L^{i,x+1} = \begin{cases} L^{i,x} + r_i * fl^{i,x} * \left(R^{j,x} - L^{i,x}\right) & r_j \geq AP^{j,x} \\ rastgele\ bir\ konum & diğer \end{cases} \quad (6.2)$$

Burada $AP^{j,x}$, x yinelemesinde karga j'nin farkındalık olasılığıdır ve r_j ise 0 ile 1 arasında eşit olarak yayılan rastgele bir sayıyı belirtir. *AP*, konsantrasyon ve çeşitlilik arasındaki dengeyi düzenler. Küçük *AP* değerleri kullanarak, KAA'nın uygulanabilir bir çözümün halihazırda mevcut olduğu yerel bir alan araması daha olasıdır. Sonuç olarak, küçük *AP* değerlerinin kullanılmasıyla konsantrasyon arttırılır. Bununla birlikte, farkındalık olasılığının değeri arttıkça, mevcut iyi çözümlere yakınlık arama şansı azalır. Buna göre, büyük *AP* değerinin kullanılması değişkenliği arttırır.

6.1. GÜÇ SİSTEMİ MODELİ

Güç sistemi, bir iletim hattına bağlı sonsuz bir bara içerir ve Şekil 6.2'de görüldüğü gibi tek bir makine ve bir uyarı sistemi içerir [140].

Burada H saniye cinsinden generatör rotorunun atalet sabiti, V_T hat ile transformatöre bağlı baranın terminal gerilimi, θ_T generatör rotor kütlesinin açısı, P_e elektromanyetik güç, X_T transformatör sargıları kaçak endüktif reaktansıdır, X_L iletim hattı serisi endüktif reaktansıdır ve V sonsuz bara gerilimidir. Ok, güç veya yük akış yönünü gösterir.



Şekil 6.2. Tek Makinalı Sonsuz Baralı (SMIB) Sistem Modeli.

SMIB sistemi, uyartım sisteminin salınım modu sönümleme üzerindeki etkisini anlamada ve sönüm kontrol tasarımı için sezgiler yaratmada yardımcı olan senkronizasyon ve sönümleme torku ilkesini keşfetmek için kullanılır.

$$\dot{\delta} = \Omega\omega \tag{6.3}$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - D\omega) \tag{6.4}$$

SMIB'nin elektromekanik modeli Denklem (6.3) ve (6.4) ile önerilmiştir, burada δ sonsuz baraya kıyasla rotorun açısıdır, ω mekanik hız sapmasıdır, T_m, T_e , D ve H sırasıyla mekaniksel tork, elektriksel tork, sönümleme katsayısı ve atalet sabitidir.

$$E'_q = \frac{1}{T'_{d0}}(E_{fd} + (X_d + X'_d)i_d - E'_q) \tag{6.5}$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_A}(-E_{fd} + K_A(V_{ref} - V_T + V_S)) \tag{6.6}$$

Denklem (6.5) akı bozunumu modelini göstermektedir. E'_q generatör dahilini, E_{fd} alan gerilimini ve T'_{d0}, X_d, i_d ise sırasıyla d ekseni zaman sabiti, reaktans ve akımı temsil etmektedir. Denklem (6.6) alan gerilimini kontrol eden hızlı etkili tristör tipi gerilim regülatörünün transfer fonksiyonunu tanımlar. Denklemdeki V_{ref}, V_T, V_S sırasıyla referans, terminal barası ve ek gerilimlerdir. K_A ise denetleyicinin statik kazancıdır.

$$T_e = E_q i_q \tag{6.7}$$

$$E_q = E'_q + (X_q - X'_d)i_d,\ i_d = \frac{E_q - V\cos\delta}{X_e + X_q}, \qquad i_q = \frac{V\sin\delta}{X_e + X_q} \tag{6.8}$$

Sistem modeli ve ağ arasındaki ara yüz denklemleri, $X_q$ve i_q'nin q ekseni reaktansı ve akımı olduğu Denklem (6.7) ve (6.8) ile ifade edilir. Sistem modeli ve ilgili parametreleri hakkında ek ayrıntılar şuradan [1], [140] bulunabilir. SMIB'nin tam modellemesi böylece 1'den 6 ya kadar olan denklemlerle özetlenmiş bulunmaktadır.

6.2. KAA İLE PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ

Önerilen KAA tabanlı PSS'nin etkinliği, bu çalışmada kapsamlı doğrusal olmayan zaman alanı simülasyon çalışmaları ile değerlendirilmiştir. Simülasyonlar MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma, KAA'nın etkinliğini daha iyi göstermek için genetik algoritma (GA) yöntemi ve parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) ile karşılaştırılmıştır. Genetik algoritma, Charles Darwin'in doğal seleksiyon kavramına dayanan meta-sezgisel bir tekniktir. Bu teknik, bir sonraki neslin yavrularını üretmek için üreme için en uygun bireylerin seçildiği doğal

seçilim prosedürünü taklit eder. Öte yandan, parçacık sürüsü optimizasyonu, kuş sürülerinden ve okul balıklarının davranışlarından etkilenen popülasyona dayalı bir optimizasyon yöntemidir.

Optimizasyon yöntemlerinin dezavantajlarından biri, parametre ayarlamanın zaman almasıdır. Ayarlanacak daha az parametreye sahip algoritmaları uygulamak daha kolaydır. Bilişsel katsayı, sosyal katsayı, atalet ağırlığı ve maksimum hız değeri, PSO'nun ayarlanabilir parametreleridir. GA'da seçim tekniği, çaprazlama yüzdesi, çaprazlama tekniği, mutasyon yüzdesi, mutasyon tekniği ve değiştirme tekniği ayarlanabilir parametrelerdir.

KAA'da ise sadece iki ayarlanabilir parametre vardır: uçuş uzunluğu ve farkındalık olasılığı. KAA, PSO gibi, etkili çözümlerin ezberlenmesini içeren bellek içerir. PSO'da, her parçacık şimdiye kadar keşfettiği en iyi konuma ve grubun şimdiye kadar bulduğu en iyi yere çekilir. Sonuç olarak, şimdiye kadar tanımlanan en iyi çözümler her yinelemede hemen benimsenir. Her KAA yinelemesinin sonunda, her karga, sürüdeki kargalardan birini rastgele seçer (kendisi olabilir) ve saklanma noktasına kaçar (o karga tarafından bulunan en iyi çözüm).

Bu, KAA'nın her yinelemesinde, şimdiye kadar bulunan en iyi konumların doğrudan daha iyi konumları belirlemek için kullanıldığı anlamına gelir. GA ve PSO gibi KAA, açgözlü bir algoritma değildir, çünkü bir karga mevcut konumundan daha kötü yeni bir konum üretirse bu konuma göç edecektir. Açgözlü olmayan algoritmalar, üretilen çözümlerin aralığını genişletebilir.

Bu çalışmada önerilen stabilizatörün etkinliğini göstermek için dört ayrı durumun sonuçları tartışılmıştır. Durumlar şunlardır: (1) PSS'siz, (2) GA'lı, (3) PSO'lu ve (4) KAA'lı PSS.

Çizelge 6.1. Optimizasyon problemini çözmek için KAA, PSO ve GA parametreleri konfigürasyonu.

KAA Parametreleri	N	fl	AP	d	x_{max}
Değer	500	2	0.1	5	500

PSO Parametreleri	N	$c1$	$c2$	w	d	s_{max}
Değer	500	0.12	1.2	0.9	5	500

GA Parametreleri	N	pc	mp	mu	d	i_{max}
Değer	500	0.8	0.3	0.02	5	500

Burada $c1$, $c2$ ve w sırasıyla bilişsel katsayılar, sosyal katsayı ve atalet ağırlığıdır. pc çaprazlama yüzdesidir, mp mutasyon yüzdesidir ve mu mutasyon oranıdır. x_{max}, s_{max}, i_{max} maksimum yineleme sayılarıdır.

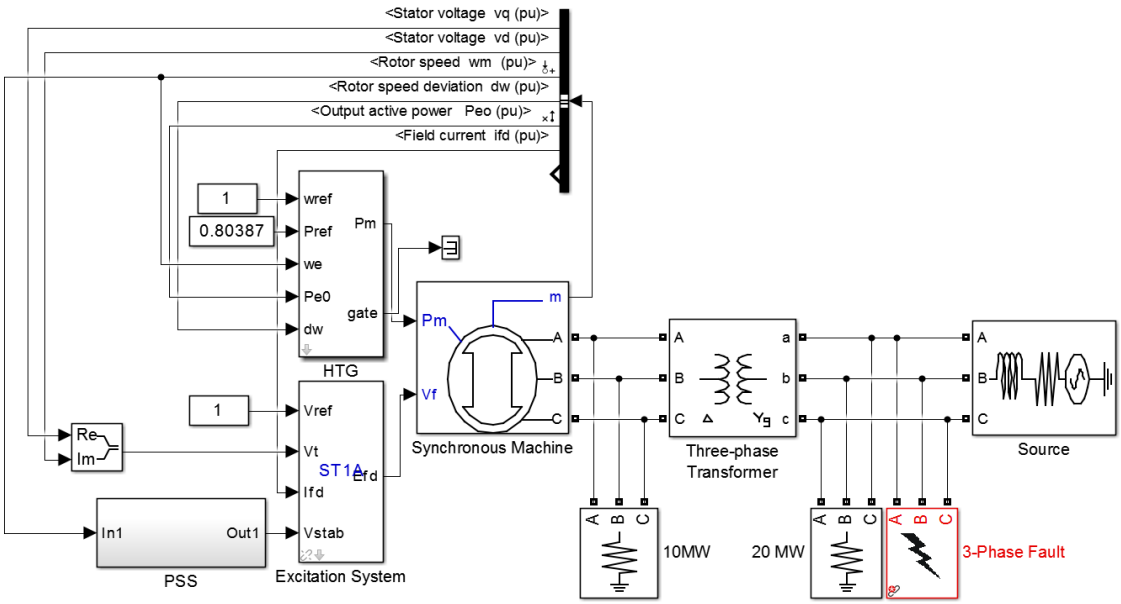
Bu çalışmada, SMIB sistemi için optimize edilecek PSS'nin $(K_p, T_1, T_2, T_3, T_4)$ 5 parametresi bulunmaktadır. KAA (N)'nin sürü büyüklüğü 500 olarak seçildi. GA'nın popülasyon büyüklüğü ve PSO'daki partikül sayısı da doğru bir karşılaştırma yapabilmek için 500 olarak seçildi. PSS'nin 5 parametresi olduğundan, tüm yöntemler için (d) boyutu 5 olarak seçilmelidir. KAA, PSO ve GA parametreleri Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

Tüm yöntemler için maksimum iterasyon sayısı 500 olarak seçilmiştir. KAA, optimizasyon problemini çözmek için MATLAB programı kullanıldı. GA ve PSO da MATLAB ortamında yapıldı. Bu teknikler PSS optimum parametrelerini hesaplamaktadır. Denklem (6.8)'de gösterilen uygunluk fonksiyonu, PSS parametrelerini optimize etmek için değerlendirilir ve Çizelge 6.2, PSO, GA ve önerilen yöntem KAA tarafından optimize edilen PSS parametre değerlerini gösterir. Bu değerler, 50 bağımsız çalışmanın ortalama değerleridir.

Çizelge 6.2. Optimize edilmiş PSS parametre değerleri.

Algoritma	K_p	T_1	T_2	T_3	T_4
KAA	98.75	0.0785	0.012	0.9875	0.012
PSO	5.06	0.5985	0.0021	0.4985	0.0205
GA	85.97	0.1203	0.1422	0.5247	0.5708

Üç fazlı bir arıza, Şekil 6.3'te gösterildiği gibi, 0.6 s zamanında iletim hattına uygulanır ve 0.7 s'de (hata temizleme süresi) silinir ve normal yüklü bir koşul için yanıtlar alınır. Hata 0.1 s sürmüştür ve hat açması olmadan hata temizlenmiştir ve orijinal sistem yeniden kurulmuştur. Simulink modelinin blok diyagramında faz A, B, C ve toprak seçilirken, üç fazlı arıza SMIB sistemine uygulanmıştır.



Şekil 6.3. PSS tarafından uyarılan hız düzenleyicili ve uyarma sistemli SMIB'nin simulink modeli.

Çizelge 6.3'te gösterilen KAA, PSO ve GA için değerlendirme süresi 50 bağımsız çalışmanın ortalama süresidir. KAA'nın değerlendirme süresi, Çizelge 6.3'te görüldüğü gibi PSO ve GA tekniklerinden daha kısadır. Bu açıkça, KAA tarafından daha hızlı yakınsamaya ulaşıldığını göstermektedir. KAA metodolojisini kullanan sistemler böylece önemli ölçüde zaman kazandıracak ve diğer meta-sezgisel tekniklerden daha pratik olacaktır.

Çizelge 6.3. KAA, PSO ve GA için değerlendirme süresi.

Algoritma	KAA	PSO	GA
Zaman (saniye)	220.51	390.24	420.82

6.2.1. Optimizasyon için KAA'nın Uygulanması

Aşağıdaki adımlar optimizasyon için KAA'nın uygulanmasına yönelik adımlardır.

1.Adım: Optimizasyon problemi ve algoritma için parametreleri ayarlayın.

Optimizasyon probleminin amaç fonksiyonunu, karar değişkenlerini ve kısıtlamaları tanımlanmalıdır. Sürü boyutu(N), maksimum yineleme sayısı (x_{max}), boyut (d), uçuş uzunluğu (fl) ve farkındalık olasılığı (AP) gibi KAA parametrelerini ayarlanmalıdır.

2.Adım: Arama alanındaki (d) N kargaların yerini ve hafızası ayarlanmalıdır.

N karga, d boyutlu bir arama alanında sürü üyeleri olarak rastgele dağıtılır. N kargaların her bir üyesi, soruna uygulanabilir bir çözüm sunar. Kontrol değişkenlerinin sayısı d ile tanımlanır.

$$\text{Kargalar} = \begin{bmatrix} L_1^1 & \cdots & L_d^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_1^N & \cdots & L_d^N \end{bmatrix}$$

Her karganın hafızası (Hafıza) daha sonra ayarlanır. İlk iterasyonlarında çok az uygulamaları olmasına rağmen, yiyeceklerini ilk konumlarında saklamışlardır.

$$\text{Hafıza} = \begin{bmatrix} R_1^1 & \cdots & R_d^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_1^N & \cdots & R_d^N \end{bmatrix}$$

3.Adım: Amaç fonksiyonunu hesaplanması.

Her karganın yerini yerleştirerek uygunluk fonksiyonunun değeri değerlendirilir. Uygunluk fonksiyonunun önemi, konum kalitesini yansıtır.

4.Adım: Kargalar için yeni pozisyonlar oluşturulması.

Bu amaçla karga i, karga j tarafından gizlenen yiyeceğin yerini bulmak için rastgele olarak sürüdeki kargalardan birini (örneğin karga j) seçer ve takip eder. Karga i'nin yeni konumuna Denklem 15 ile ulaşılır. Bu işlem tüm kargalara tekrarlanır.

5.Adım: Yeni konumun uygulanabilirliğinin doğrulanması.

Yeni konumların sınırları doğrulanır. Yeni yer uygunsa, karga yeri değiştirir. Aksi takdirde, mevcut konumunda kalır.

6.Adım: Yeni konumların amaç fonksiyonunu değerlendirilmesi.

Uygunluk fonksiyonu değerini belirlemek için her karganın yeni yerleri kullanılır.

7.Adım: Hafızanın güncellenmesi.

Karga hafızasının güncelleme prosedürü Denklem 16'da ki gibi verilmektedir:

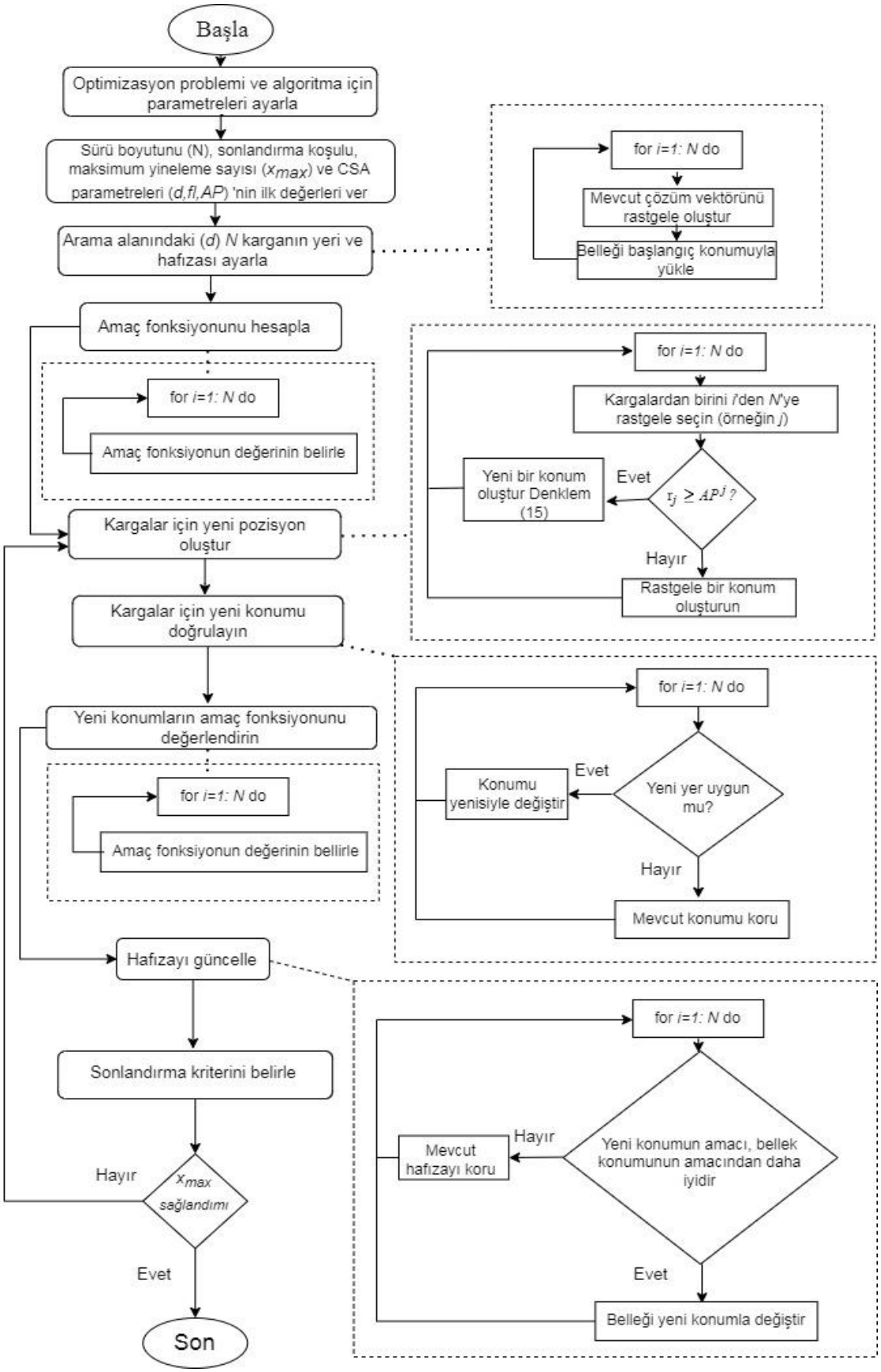
$$R^{i,x+1} = \begin{cases} L^{i,x+1} \ f\left(L^{i,x+1}\right) \ daha\ iyi\ olduğunda\ f\left(L^{i,x}\right) \\ R^{i,x} \ diğer\ durumlarda \end{cases} \tag{6.9}$$

Burada *f*(.) uygunluk fonksiyonu değerlerini temsil eder. Bir karganın mevcut konumunun amaç fonksiyon değeri, hafızaya alınan konumun amaç fonksiyon değerinden üstünse, karganın yeni konum için hafızasını değiştirdiği görülmektedir.

8.Adım: Sonlandırma kriterlerini belirlenmesi:

Optimizasyon probleminin sonlandırma kriteri, maksimum yineleme x_{max}'a ulaşılmasıdır. Sonlandırma kriteri sağlandığında, en iyi sonuç rapor edilir. Aksi takdirde, 4-7 arasındaki adımlar tekrarlanır.

KAA'nın akış şeması Şekil 6.4'te gösterilmektedir.



Şekil 6.4. KAA'nın akış şeması.

6.3. KAA İLE PROBLEMİN ÇÖZÜMÜNDE ELDE EDİLEN BULGULAR

Bu çalışmada, SMIB sisteminin PSS parametrelerinin optimal tasarımı için, kargaların akıllı davranışına dayanan yeni bir popülasyon tabanlı sürü zekâsı sezgisel optimizasyon yöntemi olan KAA önerilmiştir. PSS parametrelerinin belirlenmesi problemi, SMIB'nin performans özelliklerini geliştirmek için parametre kısıtlı, zaman alanı tabanlı bir amaç fonksiyonu kullanılarak KAA tarafından çözülen bir optimizasyon problemine dönüştürülür. Önerilen KAA tabanlı PSS denetleyicisinin performansı analiz edilmiş ve bir SMIB sistemi üzerindeki PSO ve GA teknikleri ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 6.5, sisteme sönüm sağlamayan herhangi bir PSS kullanılmadan ve PSS ile sistemin dinamik kararlılık analizinin simüle edilmiş sonuçlarını göstermektedir. PSS'li SMIB'nin PSS'siz olduğundan daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir.

KAA, PSO ve GA tabanlı PSS için sistem hızı sapması, alan akımı, generatörün aktif gücü ve mekanik güç sırasıyla

Şekil 6.6 , Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da gösterilmektedir. Güç sisteminin salınımları verimli bir şekilde azaltmış ve sistem kararlılığı GA tabanlı PSS ve PSO tabanlı PSS uygulamasıyla korunmuştur. KAA yöntemi ile elde edilen aşım ve kurulum süresi de şekillerde görüldüğü gibi diğer iki tekniğe göre daha üstündür.

KAA tabanlı PSS için sistem yerleşme süresi, diğer iki yöntemden önemli ölçüde daha az olan 2,7 saniye civarındadır. PSO ve GA için yerleşme süreleri 5,2 saniye ve 6,1 saniyedir, yani KAA tabanlı PSS, PSO tabanlı PSS'den %48,1 ve GA tabanlı PSS'den %55,7 daha hızlı yerleşir. Ayrıca, KAA tabanlı PSS için sistem yanıtı, şekillerde görüldüğü gibi diğer iki yöntemden daha üstün sönümleme özelliklerine sahiptir.

KAA için değerlendirme süresi Çizelge 6.3'te görüldüğü gibi diğer iki yönteme göre daha kısadır. PSO'dan %43,5, GA'dan %48,6 daha kısadır. Yakınsama oranı açısından, KAA, 50'den az yinelemede uygun bir bölge belirlediği için diğer iki yöntemden daha iyi performans gösterir. Bu, PSO ve GA için sırasıyla 100 ve 120'dir. Parametre ayarlama, optimizasyon tekniklerinin dezavantajlarından biri olan zaman alır. Ayarlanacak daha az parametreye sahip algoritmaların uygulanması daha kolaydır. KAA için ayarlanması gereken 2 parametre vardır. PSO ve GA için sırasıyla 4 ve 6'dır.

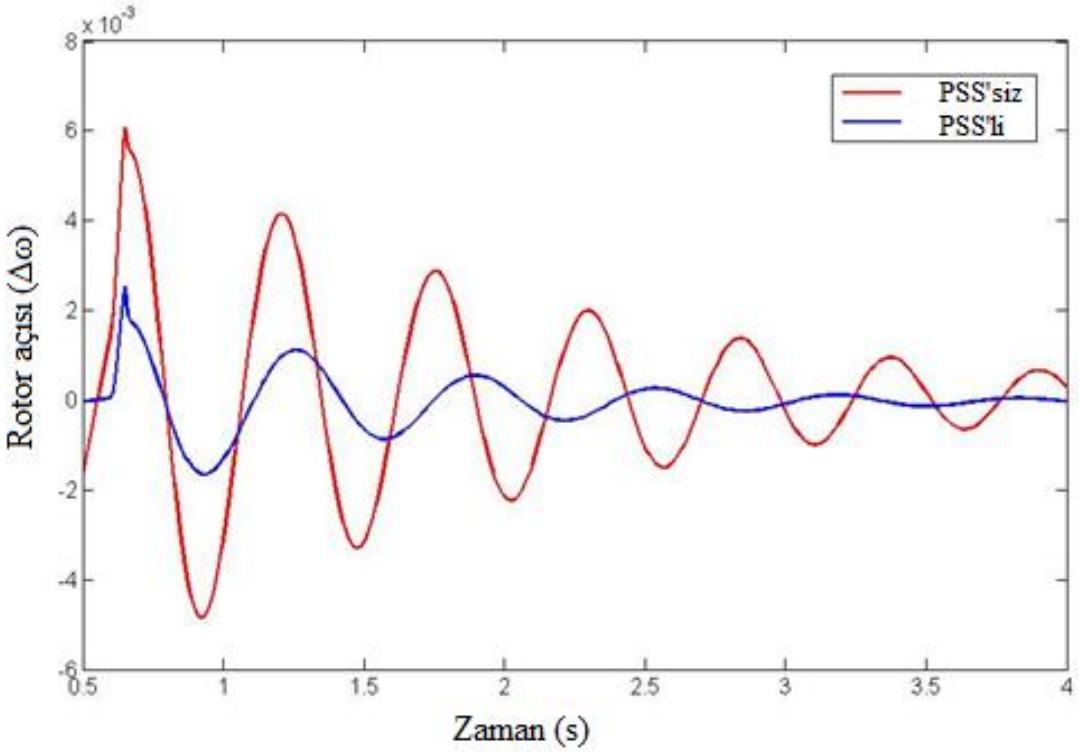
Simülasyonların sonuçları, PSO ve GA gibi diğer meta-sezgisel algoritmalara kıyasla optimizasyon sürecinin etkinliğini ve sağlamlığını kanıtlamıştır. GA tabanlı ve PSO

tabanlı PSS denetleyici tasarımları tarafından elde edilen performansla karşılaştırıldığında, simülasyonlar, KAA tabanlı PSS'nin sistem bozulduğunda çok daha iyi bir dinamik yanıt verdiğini göstermektedir.

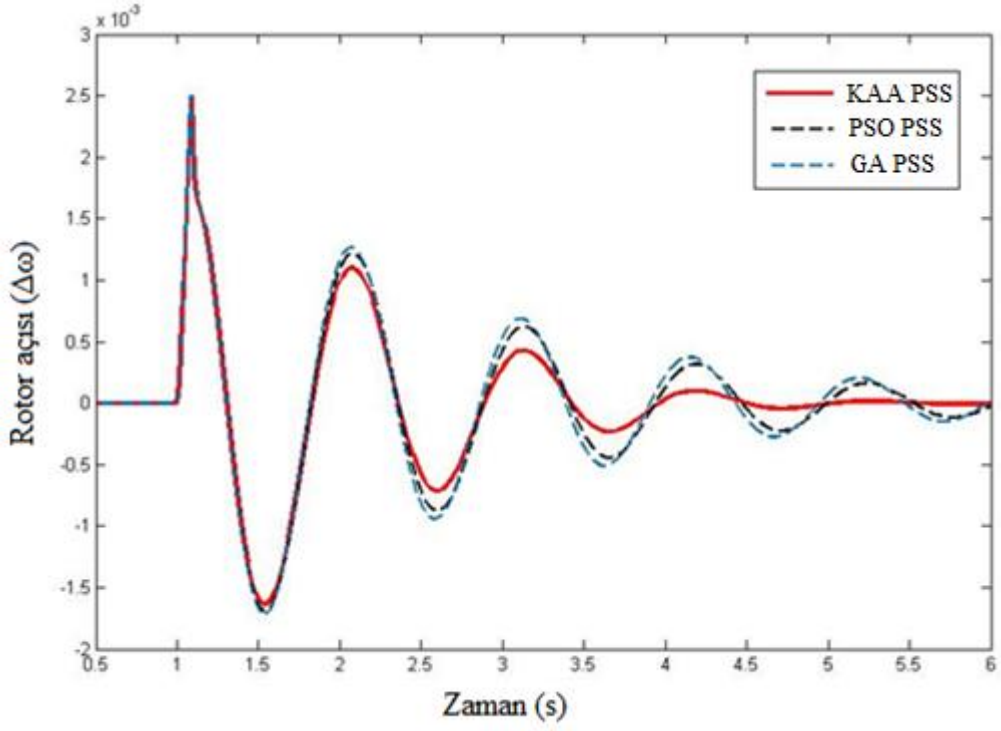
SMIB sisteminde KAA tabanlı PSS kullanıldığında, aşma ve düşük frekanslı salınımlar da diğer yöntemlere göre önemli ölçüde azalır. Simülasyonlar, KAA tabanlı PSS'nin, sistem kesintiye uğradığında, GA tabanlı ve PSO tabanlı PSS denetleyici tasarımıyla elde edilen performansa kıyasla çok daha gelişmiş bir dinamik yanıt sağladığını göstermektedir.

Ayrıca, KAA'nın amaç fonksiyonunun yakınsaması diğer tekniklerden çok daha hızlıdır. KAA tabanlı PSS, PSO tabanlı PSS ve GA tabanlı PSS ile karşılaştırıldığında aktif güç, rotor hızı, alan akımı ve mekanik gücün düşük frekanslı salınımlarını önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. SMIB sisteminde KAA tabanlı bir PSS kullanılarak, normal yüklü durumda aşma, yerleşme süresi ve düşük frekanslı salınımlar büyük ölçüde azaltılır. Sunulan tüm sonuçlar, KAA'nın güç sistemi stabilizatörünün parametrelerini SMIB sistemindeki diğer meta-sezgisel yöntemlerden çok daha iyi optimize edebildiğini onaylamaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntem KAA, PSS frekans salınım sönümleme problemlerinin çözümü için alternatif bir çözüm yöntemi olarak sunulmaktadır.

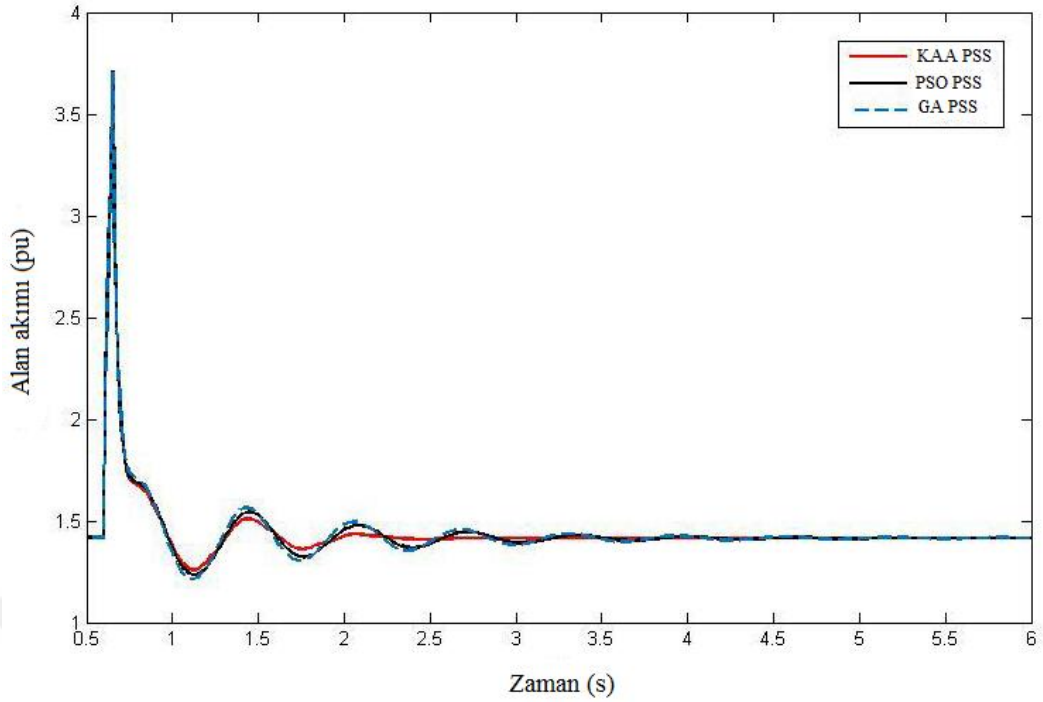
KAA'nın birçok avantajı olmasına rağmen, diğer meta-sezgisel yöntemler gibi bazı dezavantajları da vardır. KAA, tüm optimizasyon problemlerini çözme yeteneğine sahip değildir. Ayrıca, KAA yüksek boyutlu problemlerde oldukça iyi performans göstermez. Bunlara ek olarak, KAA'nın ayarlanabilir parametrelerini kontrol etme yeteneği sınırlıdır. KAA nispeten yeni bir arama yöntemi olduğundan, ek teorik araştırma gereklidir.



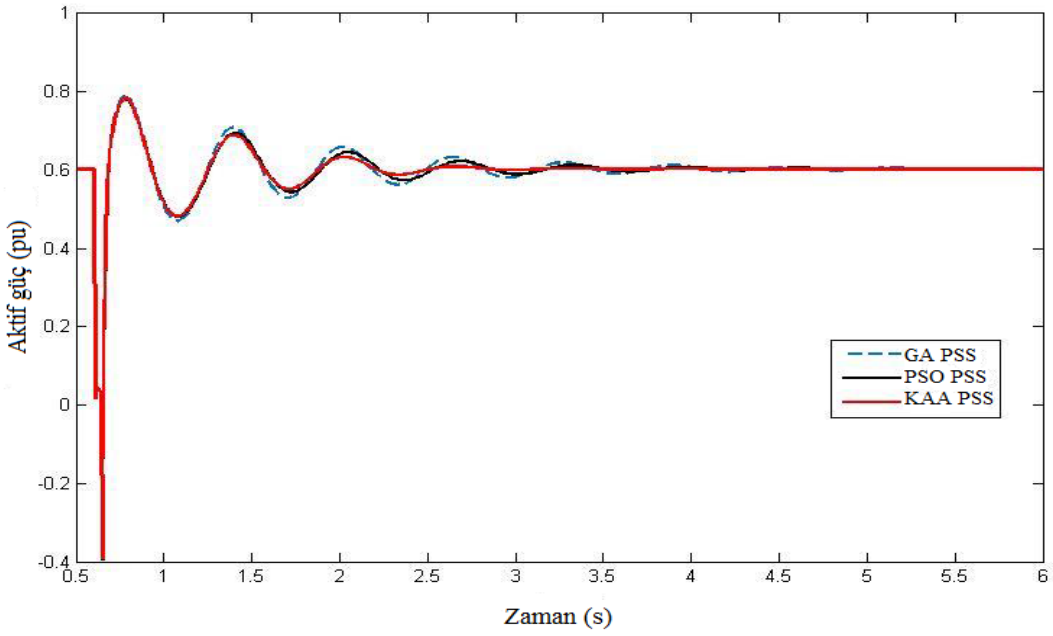
Şekil 6.5. PSS'li ve PSS'siz hız sapması (Δω).



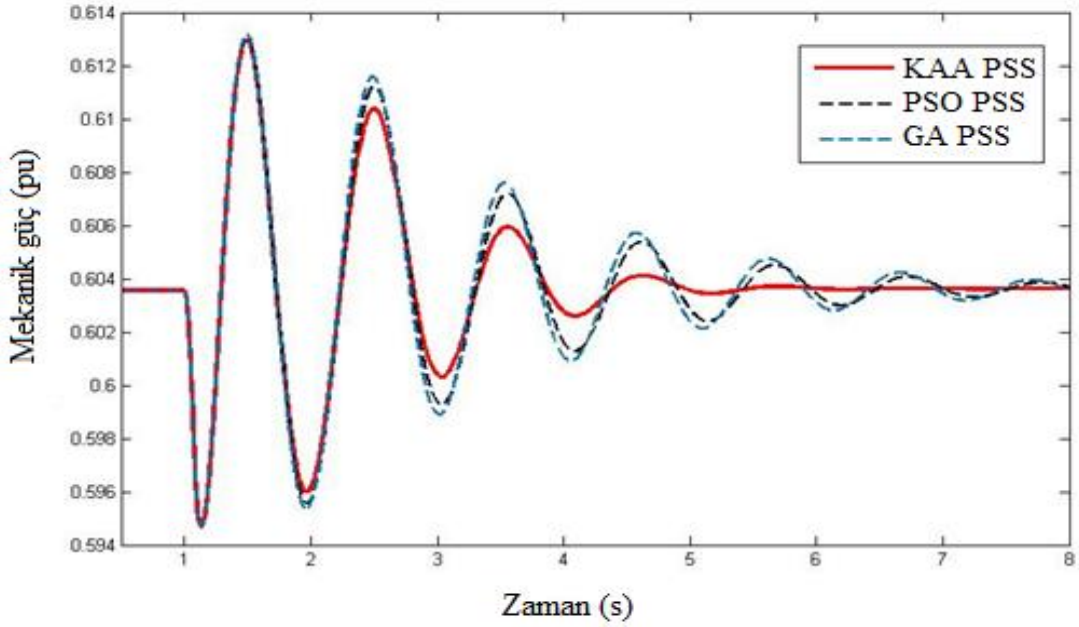
Şekil 6.6. KAA, PSO ve GA tabanlı PSS için generatörün hız sapması.



Şekil 6.7. KAA, PSO ve GA tabanlı PSS için generatörün alan akımı.



Şekil 6.8. KAA, PSO ve GA tabanlı PSS için Generatörün aktif gücü.



Şekil 6.9. KAA, PSO ve GA tabanlı PSS için mekanik güç

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çok makineli elektrik güç sistemlerinde generatörlerin rotor açısı ve hızının arıza sonrası salınımları incelendiğinde, sistemin geçici hal kararlılığının analizi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Güçlü bir simülasyon programı olan Power World programı yardımıyla sistemin salınım denklemleri Euler yöntemi ile çözülmüştür. Euler metoduyla yapılan güç sisteminin salınım denkleminin analiziyle sistemin kararlılığı analiz edilmiş ve önemli sonuçlar elde edilmiştir. Sistemde oluşan kısa süreliğine olan bir arızanın 3. saniyeden sonra kararlı hale geçtiği görülmüştür. Güç açısının ve frekansın arıza durumunda yapmış olduğu salınım gözlemlenmiş ve kararlı hale geri dönmesi 3. saniyeden sonra olduğu tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda H sabitine bağlı olarak değişen temizlenme süresinin 0,5 saniye ve sonrası olması durumunda sistem kararsız duruma girmiş olduğu görülmüştür. 0,3 ve 0,4 saniye temizlenme sürelerinde sistemin kararlılığını nasıl koruduğu yapılan analizlerle görülmüştür.

Rüzgâr santrali içeren bir güç sisteminde farklı rüzgâr türbini generatörlerinin geçici hal kararlılığı analizi de bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Bu veriler ışığında denilebilir ki; 1.Tip türbin generatör çifti diğer çiftlere göre daha düşük bir kritik temizlenme süresine sahiptir. Bu daha küçük kritik temizlenme süresi sistemi daha kırılgan yapmaktadır. Ancak toparlanma süresini de kısaltmış bulunmaktadır. 1.Tip için bu süre 2-3 saniye civarındadır. Bunun yanında 2.Tip için bu değer 4-5 saniye iken 3. Tip için bu süre 5-6 saniye civarındadır.

Bunun sebebi de sahip oldukları eylemsizlik katsayılarının (H sabitinin) büyüklüğünün belirgin etkisinin olmasıdır. Generatör hızının rotor açısına göre değişimi, generatörün yapmış olduğu salınımların büyüklüğü ve kararlı duruma ulaşma süreleri de bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Daha büyük H sabiti demek sistemin daha ağır çalışmasına, geç senkronizmadan çıkıp senkron hıza geç dönmesi demektir. Nispeten küçük olan sistemin toparlanması ve senkronizmadan çıkmaması 4-5 saniye civarlarında olmuştur. Sistemin H sabiti değiştirilerek bu süre 10 saniyelere kadar çıkmıştır. Senkron reaktansının arıza durumunda göstermiş olduğu salınımın incelenmesi de elektrik güç sisteminde geçici hal kararlılığı analizinde önemli bilgiler vermektedir.

Bir rüzgâr türbinini bir güç sistemine entegre ederken, sistemimizden ne beklediğimizi bilmemiz gerekir. Nispeten hızlı kontrol yapabilen bir sistemin H değeri daha düşük olan bir türbin generatör çifti uygun bir seçim olacaktır. Olası sistem hatalarının önceden tespiti ve sisteme uygun generatör türbin çiftinin belirlenmesi sayesinde maliyet analizleri de daha doğru yapılacaktır. Bu çalışmada, güç sistemimizin büyüklüğüne bağlı olarak dinamik analizleri verilen türbin generatör çiftlerinin seçimi yapılmıştır.

Bu çalışmada, çok makineli bir güç sisteminde PSS tasarımı için YAKA algoritması uygulanmıştır. Çok çeşitli sistem konfigürasyonları üzerinde PSS'nin ayarlanması sorunu, amacın sönüm oranı ve sönüm faktörü üzerinde iki hedefin bir araya getirilmesi olduğu çok amaçlı bir fonksiyon olarak formüle edilmiştir. Önerilen YAKA'nın etkinliği, farklı çalışma koşulları altında simülasyon çalışmaları ile dört makineli bir güç sistemi üzerinde test edilmiştir. Özdeğer analizi ve doğrusal olmayan simülasyon sonuçları, önerilen stabilizatörlerin verimliliğini ve sağlamlığını ve bunların düşük frekanslı salınımları sönümleme ve ayrıca sistem gerilim profillerini iyileştirme yeteneklerini gösterir. Önerilen YAKA'nın performansı, özdeğer analizi ve doğrusal olmayan zaman alanı simülasyonu yoluyla GA ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon çalışmaları, YAKA tarafından tasarlanan stabilizatörlerin, güç sistemi düşük frekanslı salınımlarını sönümlemede GA'nınkinden daha iyi performans gösterdiğini ve güç sisteminin dinamik kararlılığını büyük ölçüde artırdığını göstermektedir. Sonuçlar, YAKA algoritmasının GA'dan ziyade yüksek doğruluk derecesine sahip hızlı bir yakınsama oranına sahip olduğunu göstermektedir.

Ayrıca; modern bir KKO tabanlı PSS tasarımı ve PSS'nin optimal konumu bu çalışmada verilmiştir. KKO tabanlı PSS'nin analizi yapılmıştır. Doğrusal olmayan zaman alanı simülasyonları, düşük frekanslı salınımların yerleşme süresinin diğer tekniklerle karşılaştırıldığında 3 saniyeden daha azaldığını göstermektedir. Ayrıca yakınsama testi, önerilen yaklaşımın performansının diğer tekniklere göre daha iyi yakınsama sağladığını da ortaya koymaktadır. KKO tabanlı PSS, basit gerçekleştirme, kısa yürütme süresi ve yerel optimumdan zengin kaçış mekanizması özelliklerine sahiptir. Vaka çalışmaları, önerilen yöntemle tasarlanan PSS parametresinin büyük güç salınımlarını etkili bir şekilde sönümleyebildiğini, ancak yine de iyi küçük sinyal kararlılığını koruduğunu doğrulamaktadır. Önerilen yöntemle elde edilen optimal limit değerlerinin, gerçek zamanlı operasyonda düşük frekanslı salınım için global sönümleme performansını

iyileştirdiği açıkça gösterilmiştir. KKO tarafından elde edilen PSS parametrelerinin optimal değeri, geleneksel algoritmalarla elde edilen parametrelerden çok uzaktır. Bu nedenle, çok makineli sistemler için etkili PSS'leri sentezlemek için geleneksel bir dengeleyici tasarım tekniği ile önerilen tasarım metodolojisinin kombinasyonu kullanılabilir.

Buna ek olarak, SMIB sisteminin PSS parametrelerinin optimal tasarımı için, kargaların akıllı davranışına dayanan yeni bir popülasyon tabanlı sürü zekâsı sezgisel optimizasyon yöntemi olan KAA bu çalışmada önerilmiştir. PSS parametrelerinin belirlenmesi problemi, SMIB'nin performans özelliklerini geliştirmek için parametre kısıtlı, zaman alanı tabanlı bir amaç fonksiyonu kullanılarak KAA tarafından çözülen bir optimizasyon problemine dönüştürüldü. Önerilen KAA tabanlı PSS denetleyicisinin performansı analiz edildi ve bu yöntem PSO ve GA teknikleri ile ilk defa bu çalışmada karşılaştırıldı.

Simülasyonlar, KAA tabanlı PSS'nin, sistem kesintiye uğradığında, GA tabanlı ve PSO tabanlı PSS denetleyici tasarımıyla elde edilen performansa kıyasla çok daha gelişmiş bir dinamik yanıt sağladığını göstermektedir. Ayrıca, KAA'nın amaç fonksiyonunun yakınsaması diğer tekniklerden çok daha hızlıdır. KAA tabanlı PSS, PSO tabanlı PSS ve GA tabanlı PSS ile karşılaştırıldığında aktif güç, rotor hızı, alan akımı ve mekanik gücün düşük frekanslı salınımlarını önemli ölçüde azalttı. SMIB sisteminde KAA tabanlı bir PSS kullanılarak, normal yüklü durumda aşma, yerleşme süresi ve düşük frekanslı salınımlar büyük ölçüde azaltılır. Sunulan tüm sonuçlar, KAA'nın güç sistemi stabilizatörünün parametrelerini SMIB sistemindeki diğer meta-sezgisel yöntemlerden çok daha iyi optimize edebildiğini onaylamaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntem KAA, PSS frekans salınım sönümleme problemlerinin çözümü için alternatif bir çözüm yöntemi olarak sunulmaktadır. Bu çalışmada PSS parametrelerinin belirlenmesinde SMIB sisteminin kararlılığı için KAA başarılı bir şekilde kullanılmış. İleride yapılacak çalışmalarda daha büyük ve daha karmaşık sistemler içinde bu yöntem kullanılabilir.

8. KAYNAKLAR

[1] P. Kundur, N. J. Balu, ve M. G. Lauby, *Power System Stability and Control*, Newyork,USA: McGraw-Hill Education, 1994.

[2] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, V.Vittal, "Definition and classification of power system stability ıeee/cıgre joint task force on stability terms and definitions", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 19, sayı 3, ss. 1387–1401, 2004.

[3] K. Bhumkittipich ve C. Jan-Ngurn, "Study of voltage stability for 22kv power system connected with lamtakhong wind power plant, thailand", *Energy Procedia*, c. 34, ss. 951–963, 2013.

[4] D. R. Chandra, M. S. Kumari, M. Sydulu, F. Grimaccia, M. Mussetta, S. Leva, M.Q. Duong, "Impact of SCIG, DFIG wind power plant on IEEE 14 bus system with small signal stability assessment", *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)*, 2014, ss. 1–6.

[5] L. Adjoudj, F. Lakdja, F. Z. Gherbi, ve D. Ould Abdsallem, "Improving the stability of the system west Algerian network (2012) by inserting renewable energy source", *2015 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*, 2015, ss. 53–58.

[6] M. K. Abd, S. J. Cheng, ve H. S. Sun, "Optimal placement and optimal mix of RDGs for improving voltage stability and maximum loadability using PSAT", *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2016, ss. 1574–1578.

[7] H. Chen, L. Shi, ve Y. Ni, "Solution of voltage stability assessment for complicated power system incorporating wind power", *The Journal of Engineering*, c. 2017, sayı 13, ss. 2292–2297, 2017.

[8] H. R. Chamorro, M. Ghandhari, ve R. Eriksson, "Wind power impact on power system frequency response", *2013 North American Power Symposium (NAPS)*, 2013, ss. 1–6.

[9] L. Shi, S. Dai, L. Yao, Y. Ni, ve M. Bazargan, "Impact of wind farms of dfig type on power system transient stability", *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, c. 02, sayı 08, ss. 475–481, 2010.

[10] E. Muljadi, M. A. Pai, ve T. B. Nguyen, "Transient stability of the grid with a wind power plant", *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 2009, ss. 1–7.

[11] D. Naimi ve T. Bouktir, "Impact of wind power on the angular stability of a power system", *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, sayı 12, ss. 83–94, 2008.

[12] A. Mohammed ve B. Tarek, "Power system transient stability analysis with high wind power penetration", *International Electrical Engineering Journal (IEEJ)*, c. 4, sayı 1, ss. 907–913, 2013.

[13] L. Meegahapola, D. Flynn, ve T. Littler, "Transient stability analysis of a power system with high wind penetration", *2008 43rd International Universities Power Engineering Conference*, 2008, ss. 1–5.

[14] S. Xia, Q. Zhang, S. T. Hussain, B. Hong, ve W. Zou, "Impacts of Integration of Wind Farms on Power System Transient Stability", *Applied Sciences*, c. 8, sayı 8, s. 1289, 2018.

[15] J. Tamura, T. Yamazaki, M. Ueno, Y. Matsumura, ve S. I. Kimoto, "Transient stability simulation of power system including wind generator by PSCAD/EMTDC", *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No. 01EX502)*, 2001, c. 4, ss. 5-pp.

[16] Y. Liu, Y. Chi, W. Wang, ve H. Dai, "Impacts of large scale wind power integration on power system", *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2011, ss. 1301–1305.

[17] S. Surender Reddy, "Transient stability analysis of power system with wind generators", *International Journal of Applied Engineering Research*, c. 12, sayı 19, ss. 8523–8528, 2017.

[18] Yuan-Chyuan Lee ve Chi-Jui Wu, "Damping of power system oscillations with output feedback and strip eigenvalue assignment", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 10, sayı 3, ss. 1620–1626, 1995.

[19] J. da Cruz ve L. Cera Zanetta, "Stabilizer design for multimachine power systems using mathematical programming", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 19, sayı 8, ss. 519–523, 1997.

[20] L. C. Zanetta ve J. J. DaCruz, "An ıncremental approach to the coordinated tuning of power systems stabilizers using mathematical programming", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 20, sayı 2, ss. 895–902, 2005.

[21] M. A. Abido, "Robust design of multimachine power system stabilizers using simulated annealing", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 15, sayı 3, ss. 297–304, 2000.

[22] Y.-Y. Hsu ve C.-Y. Hsu, "Design of a proportional-integral power system stabilizer", *IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1. No. 2, May 1986*, sayı 2, ss. 46–52, 1986.

[23] Y.-Y. Hsu ve K. Liou, "Design of self-tuning PID power system stabilizers for synchronous generators", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c.2, sayı 3, ss. 343–348, 1987.

[24] A. Sil, T. K. Gangopadhyay, S. Paul, ve A. K. Maitra, "Design of robust power system stabilizer using H∞ mixed sensitivity technique", *2009 International Conference on Power Systems, ICPS '09*, ss. 27–30, 2009.

[25] M. J. Gibbard, "Robust design of fixed-parameter power system stabilizers over a wide range of operating conditions", *IEEE Transactions on Power Systems*, c.6, sayı 2, 1991.

[26] D. A. Pierre, "A perspective on adaptive control of power systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 2, sayı 2, ss. 387–395, 1987.

[27] Y. Zhang, G. P. Chen, O. P. Malik, ve G. S. Hope, "An artificial neural network

based adaptive power system stabilizer", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 8, sayı 1, ss. 71–77, 1993.

[28] M. Soliman, A. L. Elshafei, F. Bendary, ve W. Mansour, "LMI static output-feedback design of fuzzy power system stabilizers", *Expert Systems with Applications*, c. 36, sayı 3, ss. 6817–6825, 2009.

[29] V. Mukherjee ve S. P. Ghoshal, "Intelligent particle swarm optimized fuzzy PID controller for AVR system", *Electric Power Systems Research*, c. 77, sayı 12, ss. 1689–1698, 2007.

[30] P. S. Bhati ve R. Gupta, "Robust fuzzy logic power system stabilizer based on evolution and learning", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 53, sayı 1, ss. 357–366, 2013.

[31] K. Saoudi ve M. N. Harmas, "Enhanced design of an indirect adaptive fuzzy sliding mode power system stabilizer for multi-machine power systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 54, ss. 425–431, 2014.

[32] A. Ghasemi, H. Shayeghi, ve H. Alkhatib, "Robust design of multimachine power system stabilizers using fuzzy gravitational search algorithm", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 51, ss. 190–200, 2013.

[33] D. K. Chaturvedi ve O. P. Malik, "Neurofuzzy Power System Stabilizer", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 23, sayı 3, ss. 887–894, 2008.

[34] M. A. Awadallah ve H. M. Soliman, "A neuro-fuzzy adaptive power system stabilizer using genetic algorithms", *Electric Power Components and Systems*, c. 37, sayı 2, ss. 158–173, 2009.

[35] S. M. Radaideh, I. M. Nejdawi, ve M. H. Mushtaha, "Design of power system stabilizers using two level fuzzy and adaptive neuro-fuzzy inference systems", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, c. 35, sayı 1, ss. 47–56, 2012.

[36] J. M. Ramirez, R. E. Correa, ve D. C. Hernández, "A strategy to simultaneously tune power system stabilizers", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 43, sayı 1, ss. 818–829, 2012.

[37] E. Nechadi, M. N. Harmas, A. Hamzaoui, ve N. Essounbouli, "A new robust adaptive fuzzy sliding mode power system stabilizer", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 42, sayı 1, ss. 1–7, 2012.

[38] H. N. Al-Duwaish ve Z. M. Al-Hamouz, "A neural network based adaptive sliding mode controller: Application to a power system stabilizer", *Energy Conversion and Management*, c. 52, sayı 2, ss. 1533–1538, 2011.

[39] M. A. Abido, "Simulated annealing based approach to PSS and FACTS based stabilizer tuning", *International Journal of Electrical Power and Energy System*, c. 22, sayı 4, ss. 247–258, 2000.

[40] M. A. Abido ve Y. L. Abdel-Magid, "Tabu search based approach to power system stability enhancement via excitation and static phase shifter control", *Electric Power Systems Research*, c. 52, sayı 2, ss. 133–143, 1999.

[41] M. A. Abido, "Novel approach to conventional power system stabilizer design

using tabu search", *International Journal of Electrical Power and Energy System*, c. 21, sayı 6, ss. 443–454, 1999.

[42] M. A. Abido ve Y. L. Abdel-Magid, "A genetic-based fuzzy logic power system stabilizer for multimachine power systems", *1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*, 1997, c. 1, ss. 329–334.

[43] Y. L. Abdel-Magid ve M. A. Abido, "Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 18, sayı 3, ss. 1125–1132, 2003.

[44] S. Ekinci ve A. Demiroren, "PSO based PSS design for transient stability enhancement", *Istanbul University - Journal of Electrical and Electronics Engineering*, c. 15, sayı 1, ss. 1855–1862, 2015.

[45] H. Labdelaoui, F. Boudjema, ve D. Boukhetala, "A multiobjective tuning approach of power system stabilizers using particle swarm optimization", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, c. 24, sayı 5, ss. 3898–3909, 2016.

[46] K. M. Passino, "Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control", *IEEE Control Systems*, c. 22, sayı 3, ss. 52–67, 2002.

[47] Z. Hasan, K. Salman, J. Talaq, ve M. E. El-Hawary, "Optimal tuning of power system stabilizers by biogeography based optimization method", *2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2016, ss. 1–6.

[48] D. Chitara, K. R. Niazi, A. Swarnkar, ve N. Gupta, "Cuckoo search optimization algorithm for designing of a multimachine power system stabilizer", *IEEE Transactions on Industry Applications*, c. 54, sayı 4, ss. 3056–3065, 2018.

[49] S. Ekinci, D. Izci, H. L. Zeynelgil, ve S. Orenc, "An Application of Slime Mould Algorithm for Optimizing Parameters of Power System Stabilizer", *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 2020, ss. 1–5.

[50] A. Sabo, N. I. Abdul Wahab, M. L. Othman, M. Z. A. Mohd Jaffar, ve H. Beiranvand, "Optimal design of power system stabilizer for multimachine power system using farmland fertility algorithm", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, c. 30, sayı 12, 2020.

[51] B. M. Alshammari ve T. Guesmi, "New chaotic sunflower optimization algorithm for optimal tuning of power system stabilizers", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, c. 15, sayı 5, ss. 1985–1997, 2020.

[52] A. F. Mijbas, B. A. A. Hasan, ve H. A. Salah, "Optimal stabilizer PID parameters tuned by chaotic particle swarm optimization for damping low frequency oscillations (lfo) for single machine ınfinite bus system (SMIB)", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, c. 15, sayı 4, ss. 1577–1584, 2020.

[53] D. Butti, S. K. Mangipudi, ve S. R. Rayapudi, "An improved whale optimization algorithm for the design of multi-machine power system stabilizer", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, c. 30, sayı 5, 2020.

[54] D. Izci, "A novel improved atom search optimization algorithm for designing power system stabilizer", *Evolutionary Intelligence*, c. 14, sayı 2, ss. 204–218,

2021.

[55] B. HEKİMOĞLU, "Çekirge optimizasyon algoritması kullanılarak çok makinalı güç sistemi için gürbüz kesir dereceli PID kararlı kılıcısı tasarımı", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 35, sayı 1, ss. 165–180, 2019.

[56] L. Abualigah ve A. Diabat, "Advances in sine cosine algorithm: A comprehensive survey", *Artificial Intelligence Review*, c. 54, sayı 4, ss. 2567–2608, 2021.

[57] R. Devarapalli ve B. Bhattacharyya, "A hybrid modified grey wolf optimization-sine cosine algorithm-based power system stabilizer parameter tuning in a multimachine power system", *Optimal Control Applications and Methods*, c. 41, sayı 4, ss. 1143–1159, 2020.

[58] L. Abualigah, D. Yousri, M. Abd Elaziz, A. A. Ewees, M. A. A. Al-qaness, ve A. H. Gandomi, "Aquila optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm", *Computers & Industrial Engineering*, c. 157, ss. 1-37, 2021.

[59] N. Razmjooy, S. Razmjooy, Z. Vahedi, V. V. Estrela, ve G. G. de Oliveira, "A new design for robust control of power system stabilizer based on moth search algorithm", *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2021, ss. 187–202.

[60] A. Kalmikov, "Wind power fundamentals", *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, 2017, ss. 17–24.

[61] W. Tong, "Wind power generation and wind turbine design", *Choice Reviews Online*, c. 48, sayı 07, ss. 48-78, 2011.

[62] A. Betz, "The Maximum of the theoretically possible exploitation of wind by means of a wind motor", *Wind Engineering*, c. 37, sayı 4, ss. 441–446, 2013.

[63] G. A. M. van Kuik, "The Lanchester–Betz–Joukowsky limit", *Wind Energy*, c. 10, sayı 3, ss. 289–291, 2007.

[64] A. Perdana, "Wind turbine models for power system stability studies", Ph.D.dissertation, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg, Seweden, 2006.

[65] A. Honrubia-Escribano, E. Gómez-Lázaro, J. Fortmann, P. Sørensen, ve S. Martin-Martinez, "Generic dynamic wind turbine models for power system stability analysis: A comprehensive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. c.81, ss. 1939-1952, 2018.

[66] L. Y. Pao ve K. E. Johnson, "A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms", *2009 American Control Conference*, 2009, ss. 2076–2089.

[67] F. Wu ve X. Zhang, "Impact of wind turbines on power system stability", REP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability, 2007, ss.1-7.

[68] Z. Tian ve Z. Wu, "PSS control and simulation of asynchronous wind generator connected into power grid", *2013 Chinese Automation Congress*, 2013, ss. 708–712.

[69] K. THANPISIT ve I. NGAMROO, "Power oscillation damping control by PSS and DFIG wind turbine under multiple operating conditions", *Turkish Journal of*

Electrical Engineering & Computer Sciences, c. 25, ss. 4354–4368, 2017.

[70] M. Tazil, V. Kumar, R. C. Bansal, S. Kong, Z. Y. Dong, ve W. Freitas, "Three-phase doubly fed induction generators: an overview", *IET Electric Power Applications*, c. 4, sayı 2, s. 75, 2010.

[71] A. K. Srivastava, R. Zamora, ve D. Bowman, "Impact of distributed generation with storage on electric grid stability", *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, ss. 1–5.

[72] Z. Wang, "on-Line Transient Stability Studies Incorporating Wind Power", Ph.D. dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, Clemson Univeristy, South Carolina, USA, 2012.

[73] H. H. Al Marhoon, I. Leevongwat, ve P. Rastgoufard, "A practical method for power systems transient stability and security analysis", *PES T&D 2012*, 2012, ss. 1–6.

[74] H. Saadat, *Power system analysis*, New York, USA: McGraw-hill, 1999.

[75] S. A. S. Alkadhim, "Simulation of Multi-Machine Transient Stability", Research project, College of Electrical and Electronics Techniques, Middle Technical University, Iraq, Repuclic of Iraq, 2010.

[76] U. Arifoglu, *Güç sistemlerinin bilgisayar destekli analizi (problem çözümlü)*. Alfa Yayinlari, İstanbul, Türkiye, 2002.

[77] Z. Wang, E. B. Makram, G. K. Venayagamoorthy, ve C. Ji, "Dynamic estimation of rotor angle deviation of a generator in multi-machine power systems", *Electric Power Systems Research*, c. 97, ss. 1–9, 2013.

[78] N. S. K. J. Menike, "Computer simulation of transient stability analysis of power systems" M.S. thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, The Univeristy of Windsor, Windsor, Ontario, Canada, 2004.

[79] J. D. Glover, M. S. Sarma, ve T. Overbye, *Power Systems Analysis and Design 5th Edition*, San Francisco, USA: Cengage Learning, 2011.

[80] P. S. R. Murty, "Power System Stability", *Electrical Power Systems*, 2017, ss. 479–526.

[81] S. Fetissi, D. Labed, ve I. Labed, "The transient stability study of a synchronous generator based on the rotor angle stability", *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, c. 5, sayı 6, s. 1319, 2015.

[82] X. Wang, Y. Chen, G. Han, ve C. Song, "Nonlinear dynamic analysis of a single-machine infinite-bus power system", *Applied Mathematical Modelling*, c. 39, sayı 10–11, ss. 2951–2961, 2015.

[83] S. Namdev, "Power system stability analysis of single machine ınfinite bus system using firefly algorithm", c. 5, sayı 9, 2017.

[84] S. Padhi ve B. P. Mishra, "Numerical method based single machine analysis for transient stability", c. 4, sayı 2, ss. 330–335, 2014.

[85] A. Ghosh, G. Ledwich, O. P. Malik, ve G. S. Hope, "Power system stabilizer based on adaptive control techniques", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, c. PAS-103, sayı 8, ss. 1983–1989, 1984.

[86] T. Cutsem ve C. Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Boston,

MA: Springer US, 1998.

[87] D. J. Hill ve I. M. Y. Mareels, “Stability theory for differential/algebraic systems with application to power systems”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, c. 37, sayı 11, ss. 1416–1423, 1990.

[88] M. A. Pai, *Energy Function Analysis for Power System Stability*. Boston, MA: Springer US, 1989.

[89] Q. B. Chou, P. Kundur, P. N. Acchione, ve B. Lautsch, “Improving nuclear generating station response for electrical grid islanding”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 9, ss. 42-42, 1989.

[90] P. Kundur, D. Lee, J. Bayne, ve P. Dandeno, “Impact of turbine generator overspeed controls on unit performance under system disturbance conditions”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, c. PAS-104, sayı 6, ss. 1262–1269, 1985.

[91] P. Kundur, “A survey of utility experience with power plant response during partial load rejection and system disturbances”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, c. PAS-100, sayı 5, ss. 2471–2475, 1981.

[92] J. Lu, M. H. Nahrir, ve D. A. Pierre, “A fuzzy logic-based self tuning power system stabilizer optimized with a genetic algorithm”, *Electric Power Systems Research*, c. 60, sayı 2, ss. 77–83, 2001.

[93] M. A. Abido ve Y. L. Abdel-Magid, “Tuning of a fuzzy logic power system stabilizer using genetic algorithms”, *Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC ’97)*, 1997, ss. 595–599.

[94] P. M. Anderson ve A. A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, Iowa, USA: Iowa State University Press, 1977.

[95] A. R. Fereidouni, B. Vahidi, T. Hoseini Mehr, ve M. Tahmasbi, “Improvement of low frequency oscillation damping by allocation and design of power system stabilizers in the multi-machine power system”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, c. 52, sayı 1, ss. 207–220, 2013.

[96] J. V. Milanovi, “Damping of the low-frequency oscillations of the generator: dynamic interactions and the effectiveness of the controllers”, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, c. 149, sayı 6, s. 753, 2002.

[97] F. P. de Mello, L. N. Hannett, ve J. M. Undrill, “Practical Approaches to Supplementary Stabilizing from Accelerating Power”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, c.97, sayı 5, ss. 1515–1522, 1978.

[98] K. Ohtsuka, S. Yokokawa, H. Tanaka, ve H. Doi, “A multivariable optimal control system for a generator”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. EC-1, sayı 2, ss. 88–98, 1986.

[99] R. Asgharian, “A robust H/sup ∞/ power system stabilizer with no adverse effect on shaft torsional modes”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 9, sayı 3, ss. 475–481, 1994.

[100] A. Feliachi, X. Zhang, ve C. S. Sims, “Power system stabilizers design using optimal reduced order models. I. Model reduction”, *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 3, sayı 4, ss. 1670–1675, 1988.

[101] Hui Ni, G. T. Heydt, ve L. Mili, “Power system stability agents using robust wide

area control", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 17, sayı 4, ss. 1123–1131, 2002.

[102] S. Abe ve A. Doi, "A new power system stabilizer synthesis ın multimachine power systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, c. 102, sayı 12, ss. 3910–3918, 1983.

[103] L. Guan, S. Cheng, ve R. Zhou, "Artificial neural network power system stabiliser trained with an improved BP algorithm", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, c. 143, sayı 2, s. 135, 1996.

[104] G. E. Boukarim, Shaopeng Wang, J. H. Chow, G. N. Taranto, ve N. Martins, "A comparison of classical, robust, and decentralized control designs for multiple power system stabilizers", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 15, sayı 4, ss. 1287–1292, 2000.

[105] R. J. Fleming, M. M. Gupta, ve J. Sun, "Improved power system stabilizers", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 5, sayı 1, ss. 23–27, 1990.

[106] M. R. Khaldi, A. K. Sarkar, K. Y. Lee, ve Y. M. Park, "The modal performance measure for parameter optimization of power system stabilizers", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 8, sayı 4, ss. 660–666, 1993.

[107] M. L. Kothari, K. Bhattacharya, ve J. Nanda, "Adaptive power system stabiliser based on pole-shifting technique", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, c. 143, sayı 1, s. 96, 1996.

[108] Yuan-Yih Hsu *vd.*, "Experience with the identification and tuning of excitation system parameters at the second nuclear power plant of Taiwan power company", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 11, sayı 2, ss. 747–753, 1996.

[109] A. J. A. S. Costa, F. D. Freitas, ve A. S. De Silva, "Design of decentralized controllers for large power systems considering sparsity", *IEEE Power Engineering Review*, c. 12, sayı 1, ss. 144–152, 1997.

[110] H. M. Soliman, A. L. Elshafei, A. A. Shaltout, ve M. F. Morsi, "Robust power system stabiliser", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, c. 147, sayı 5, s. 285, 2000.

[111] F. P. Demello ve C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control", *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, c. 88, sayı 4, ss. 316–329, 1969.

[112] J. H. Chow, G. E. Boukarim, ve A. Murdoch, "Power system stabilizers as undergraduate control design projects", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 19, sayı 1, ss. 144–151, 2004.

[113] S. K. Yee ve J. V. Milanovi, "Nonlinear time-response optimisation method for tuning power system stabilisers", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, c. 153, sayı 3, s. 269, 2006.

[114] S. G. Yaseen ve N. M. Al-Slamy, "Ant colony optimization", *IJCSNS*, c. 8, sayı 6, s. 351, 2008.

[115] C. Darwin, *The origin of species*. PF Collier & son New York, USA: 1909.

[116] J. T. Ma ve L. L. Lai, "Application of genetic algorithm to optimal reactive power dispatch including voltage-dependent load models", *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 1995, c. 1, s. 5.

[117] P. Mazumder ve E. M. Rudnick, *Genetic Algorithms for VLSI Design, Layout and Test Automation*, New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1999.

[118] R. Eberhart ve J. Kennedy, "Applications of modern heuristic optimization methods in power and energy systems", MHS'95 Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Scienc IEEE, ss. 213–255, 1995.

[119] J. Kennedy ve R. Eberhart, "Ieee, Particle swarm optimization", *1995 IEEE International Conference on Neural Networks Proceedings*, 1948, c. 1, s. 6.

[120] M. Clerc ve J. Kennedy, "The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space", *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, c. 6, sayı 1, ss. 58–73, 2002.

[121] Y. Shi ve R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization: developments, applications, and resources", Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, c. 1, ss. 81–86, 2001.

[122] L. dos Santos Coelho ve V. C. Mariani, "Particle swarm optimization with quasi-Newton local search for solving economic dispatch problem", *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2006, c. 4, ss. 3109–3113.

[123] K.-H. Han ve J.-H. Kim, "Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization", *IEEE transactions on evolutionary computation*, c. 6, sayı 6, ss. 580–593, 2002.

[124] B. S. G. de Almeida ve V. C. Leite, "Particle swarm optimization: a powerful technique for solving engineering problems", *Swarm Intelligence*, c.1, ss-1-21, 2019.

[125] K. O. Jones, "Ant colony optımızatıon", *Robotica*, c. 23, sayı 6, ss. 815–815, 2005.

[126] Chia-Feng Juang ve Po-Han Chang, "Designing fuzzy-rule-based systems using continuous ant-colony optimization", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, c. 18, sayı 1, ss. 138–149, 2010.

[127] M. Birattari, P. Pellegrini, ve M. Dorigo, "On the ınvariance of ant colony optimization", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, c. 11, sayı 6, ss. 732–742, 2007.

[128] V. Selvi ve D. R. Umarani, "Comparative analysis of ant colony and particle swarm optimization techniques", *International Journal of Computer Applications*, c. 5, sayı 4, ss. 1–6, 2010.

[129] S.-M. Baek, J.-W. Park, ve I. Hiskens, "Optimal tuning for linear and nonlinear parameters of power system stabilizers in hybrid system modeling", *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, 2007, ss. 1665–1672.

[130] M. M. Linda ve N. K. Nair, "Optimal design of multi-machine power system stabilizer using robust ant colony optimization technique", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, c. 34, sayı 7, ss. 829–840, 2012.

[131] D. F. Signorini ve J. M. Slattery, "Neural networks.", *Lancet (London, England)*, c. 346, sayı 8988, s. 1500, 1995.

[132] D. Karaboga ve B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical

function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm", *Journal of Global Optimization*, c. 39, sayı 3, ss. 459–471, 2007.

[133] M. Eslami ve H. Shareef, "Artificial bee colony algorithm for optimal design of power system stabilizer", *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, 2012, ss. 1–6.

[134] A. Askarzadeh, "A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm", *Computers & Structures*, c. 169, ss. 1–12, 2016.

[135] B. Pal ve B. Chaudhuri, *Robust Control in Power Systems*, New York, USA: Springer, 2006.

[136] P. W. Sauer ve M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, New Jersey, USA: Prentice Hall, 1998.

[137] B. S. Surjan ve R. Garg, "Power system stabilizer controller design for smıb stability study", *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, sayı 1, ss. 209–214, 2012.

[138] H. Shayeghi, H. A. Shayanfar, S. Jalilzadeh, ve A. Safari, "Multi-machine power system stabilizers design using chaotic optimization algorithm", *Energy Conversion and Management*, c. 51, sayı 7, ss. 1572–1580, 2010.

[139] A. Safari, H. Shayeghi, ve H. A. Shayanfar, "Optimization based control coordination of statcom and pss output feedback damping controller using pso technique", *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, c. 2, s. 4, 2010.

[140] J. H. Chow ve J. J. Sanchez-Gasca, *Power System Modeling, Computation, and Control*, New Jersey, USA: Wiley, 2019.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hamdullah YOKUŞ

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2022
Y. Lisans	Elektrik ve Bilgisayar Müh.	University of Alabama	2014
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Erciyes Üniversitesi	2009

YAYINLAR

Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler:

W.E. Baughman, H. Yokus, S Balci, D.S. Wilbert, P. Kung ve S.M. Kim, "Observation of Hydrofluoric Acid Burns on Osseous Tissues by Means of Terahertz Spectroscopic Imaging," IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, c. 3, sayı 4, ss. 387-394, 2013.

H. Yokus ve A. Ozturk "A Robust Crow Search Algorithm-Based Power System Stabilizer for the SMIB System," Neural Computing and Applications, c.34, ss. 9161-9173, 2022.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

H. Yokus, S. Balci, D.S. Wilbert, P. Kung ve S.M. Kim, “Identification of tissue interaction of terahertz radiation toward functional tissue imaging by terahertz spectroscopic imaging,” *38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, ss. 1-2, 2013.

H. Yokus, W. Baughman, S. Balci, M. Bolus, D. Wilbert, P. Kung, ve S.M. Kim, “Identification of tissue interaction of terahertz radiation toward functional tissue imaging,’’ *Terahertz and Ultrashort Electromagnetic Pulses for Biomedical Applications* SPIE, c. 8585, ss. 87-93, 2013.

H. Yokus ve A. Öztürk, “Salınım Denklemlerinin Nümerik Çözümü ile Güç Sistemi Kararlılığının İncelenmesi,’’ *International Marmara Sciences Congress (Güz),* ss. 1336-1342, 2018.

H. Yokus ve A. Öztürk, “Çok makinalı elektrik güç sistemlerinde salınım denklemlerinin Euler metoduyla çözümü ile kararlılık analizi,’’ *International Marmara Sciences Congress (Bahar),* ss. 949-957, 2019.

H. Yokus ve A. Öztürk, “Farklı generatör modellerine göre rüzgâr santrali içeren güç sısteminin karşılaştırmalı olarak geçici hal kararlılıklarının analizi,’’ *International Marmara Sciences Congress (Güz),* ss. 652-659, 2019.