



T.C.

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SEZGİSEL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI
KULLANILARAK GÜÇ SİSTEMİ DENGELİYİCİSİNİN
OPTİMAL TASARIMI**

BURAK KAYA

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Doç. Dr. İbrahim EKE

KIRIKKALE-2024



T.C.

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SEZGİSEL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI
KULLANILARAK GÜÇ SİSTEMİ Dengeleyicisinin
OPTİMAL TASARIMI**

BURAK KAYA

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Doç. Dr. İbrahim EKE

KIRIKKALE-2024

Burak KAYA tarafından hazırlanan “SEZGİSEL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI KULLANILARAK GÜÇ SİSTEMİ DENGELİYİCİSİNİN OPTİMAL TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. İbrahim EKE

Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Anabilim Dalı,
Kırıkkale Üniversitesi

İmza

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Doç. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN

Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Anabilim Dalı,
Gazi Üniversitesi

İmza

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Özge Pınar AKKAŞ

Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Anabilim Dalı,
Kırıkkale Üniversitesi

İmza

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 08/08/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

(İmza)

Burak KAYA

08/08/2024

ÖZET

SEZGİSEL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI KULLANILARAK GÜÇ SİSTEMİ Dengeleyicisinin OPTİMAL TASARIMI

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. İbrahim EKE

Ağustos 2024, 151 sayfa

Bu çalışma, güç sistemlerinde ani yük değişimleri ve kısa devre arızalarının yol açtığı geçici kararsızlıkların önüne geçmek amacıyla geliştirilen yeni bir yaklaşıma odaklanmaktadır. Güç Sistemi Dengeleyicisi (GSD), bu tür durumlarda rotor hızındaki değişimleri düzenleyerek sistemin kararlılığını sağlamada kritik bir rol oynar. Çalışmanın ana amacı, GSD parametrelerinin optimizasyonunu sağlamak için Elektrik Balığı Optimizasyonu (Electric Fish Optimization-EFO) yöntemini kullanarak daha verimli ve güvenilir bir güç sistemi tasarımı sunmaktır.

Çalışma kapsamında önerilen EFO tabanlı GSD modeli, çok makinalı bir test sistemi (multi-machine test system-MMTS) üzerinde değerlendirilmiştir. EFO algoritması, doğadaki balıkların sürü halinde hareket etme davranışını taklit eden bir optimizasyon yöntemidir ve bu yöntemle GSD' nin geleneksel ayarlarının ötesine geçilerek, kısa devre ve yük değişimi durumlarında daha iyi performans göstermesi hedeflenmiştir.

Araştırmanın benzetim çalışmaları bölümü, MATLAB/Power PSS uygulaması aracılığıyla yapılan simülasyonlardan oluşmaktadır. Bu simülasyonlar, önerilen EFO tabanlı GSD modelinin performansını, yaygın olarak kullanılan Yapay Arı Kolonisi (YAK) ve Farksal Gelişim Algoritması (FGA) sistemlerle karşılaştırmalı olarak analiz etmektedir. Simülasyon sonuçları, EFO tabanlı GSD'nin rotor hız değişimlerini daha etkin bir şekilde söndürdüğünü, bu sayede sistemdeki dinamik kararlılığın önemli ölçüde iyileştirildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, çalışma, güç sistemlerinin kararlılığını artırmak için GSD parametrelerinin optimizasyonunda EFO algoritmasının etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu, enerji sistemlerinde güvenli ve kararlı bir operasyon sağlamak adına önemli bir katkı sunmaktadır. EFO yöntemi hem verimlilik hem de kararlılık açısından geleneksel yöntemlere kıyasla üstün performans sergilemiş ve gelecekteki güç sistemi optimizasyon çalışmaları için umut verici bir araç olarak öne çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: Yapay arı kolonisi algoritması (YAK), çok makinalı bir test sistemi (MMTS), güç sistem dengeleyicisi (GSD), farksal gelişim algoritması (FGA), elektrik balığı optimizasyonu (EFO).

ABSTRACT

OPTIMAL DESIGN OF POWER SYSTEM STABILIZER USING HEURISTIC OPTIMIZATION ALGORITHMS

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronics Engineering, Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim EKE

August 2024, 151 pages

This study focuses on a new approach developed to prevent transient instabilities caused by sudden load changes and short circuit faults in power systems. The Power System Stabilizer (PSS) plays a critical role in such scenarios by regulating rotor speed fluctuations to maintain system stability. The main objective of this study is to present a more efficient and reliable power system design by optimizing PSS parameters using the Electric Fish Optimization (EFO) method.

The proposed EFO-based PSS model is evaluated on a multi-machine test system (MMTS). The EFO algorithm is an optimization method that mimics the schooling behavior of fish in nature, aiming to surpass the conventional settings of PSS and achieve better performance under short-circuit and load change conditions.

The simulation studies section of the research conducted through the MATLAB/Power PSS application. These simulations compare the performance of the proposed EFO-based PSS model with that of the commonly used Artificial Bee Colony (ABC) and Differential Evolution Algorithm (DE). The simulation results demonstrate that the EFO-based PSS more effectively dampens rotor speed fluctuations, thereby significantly improving dynamic stability within the system.

In conclusion, the study reveals that the EFO algorithm provides an effective solution for optimizing PSS parameters to enhance the stability of power systems. This finding represents a significant contribution to ensuring safe and stable operation in energy systems. The EFO method has shown superior performance in terms of both efficiency and stability compared to traditional methods, making it a promising tool for future power system optimization efforts.

Key Words: Artificial bee colony algorithm (ABC), multi-machine test system (MMTS), power system stabilizer (PSS), differential evolution algorithm (DE), electric fish optimization (EFO).

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarından dolayı tez hocam Doç. Dr. İbrahim EKE 'ye sonsuz teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarına doğrudan veya dolaylı olarak katkıda bulunan Doç. Dr. Burak YILDIRIM' a teşekkür ederim. Ayrıca bu süreçte bana desteklerini esirgemeyen aileme de minnettarım.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER DİZİNİ	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	2
1.2. Güç Sistemi Dengeleyicisi İçin Literatür Araştırması	3
1.3. Araştırmanın Bölümleri	9
2. GÜÇ SİSTEMİ	11
2.1. Güç Sistemi Kararlılığı	11
2.1.1 Rotor Açısı Kararlılığı	13
2.1.2 TMSGGB Bağlı Senkron Jeneratörün Güç Karakteristiği	16
2.1.3 Gerilim Kararlılığı	22
2.1.4 Frekans Kararlılığı	22
2.1.5 Rezonans Kararlılığı	23
2.1.6 Dönüştürücü Kaynaklı Kararlılık.....	23
3. SENKRON MAKİNA.....	24
3.1. Senkron Makinenin Dinamik Modellenmesi	25
3.2. Senkron Makine Modelinin Basitleştirilmesi	27
3.3. Park Dönüşüm Matrisi	27
3.4. Rotor Referans Çevre Dönüşümü	29
3.5. Tek Makine Sonsuz Güçlü Bara Sistemi	31
3.5.1 Salınımların Klasik Model Aracılığı ile İncelenmesi	32
3.5.2 Senkron Jeneratörün Basitleştirilmiş Modeli.....	34
3.6. Senkron Jeneratör Uyarım Sistemleri	39
3.6.1 AA Tipi Uyarım Sistem Modelleri	40
3.6.2 ST Tipi Uyarım Sistem Modelleri	40
3.7. Güç Sistemi Dengeleyicisi	40

3.7.1 Güç Sistemi Dengeleyicisi Çeşitleri	43
4. ÇOK MAKİNALI GÜÇ SİSTEM ANALİZİ	45
4.1. Basitleştirilmiş Bir Sistem Modeli	45
4.1.1. Jeneratör Denklemleri Ve Atalet Merkezi Referans.....	47
4.1.2. Doğrusal Durum Uzayı Denklemleri.....	50
4.2. Ayrıntılı Model: Durum – 1	51
4.3. Ayrıntılı Model: Durum – 2	55
5. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI	62
5.1. Farksal Gelişim Algoritması	63
5.1.1. Farksal Gelişim Algoritması Terimleri	63
5.1.2. Popülasyon Yapısı ve Parametre Sınırları	63
5.1.3. Mutasyon	64
5.1.4. Çaprazlama	66
5.1.5. Uygunluk Fonksiyonu	69
5.1.6. Seçim	69
5.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması	70
5.2.1. Gerçek Arıların Yiyecek Arama Davranışları	70
5.2.2. Başlangıç Yiyecek Kaynağı Bölgelerinin Üretilmesi.....	73
5.2.3. İşçi Arıların Yiyecek Kaynağı Bölgelerine Gönderilmesi	73
5.2.4. Gözcü Arıların Olasılık Değerlerinin Hesaplanması.....	75
5.2.5. Gözcü Arıların Yiyecek Kaynağı Bölgesi Seçmeleri	75
5.2.6. Kaynağı Bırakma Kriteri: Limit ve Kaşif Arı Üretimi.....	75
5.2.7. Seleksiyon Mekanizmaları	75
5.3. Elektrik Balığı Optimizasyon Algoritması.....	76
5.3.1. Elektrik Balıkları	76
5.3.2. Elektrik Balıklarında Sürü Zekası	77
5.3.3. EFO Algoritması	78
5.3.4. Başlangıç Popülasyonu.....	79
5.3.5. Aktif Elektrolokasyon	81
5.3.6. Pasif Elektrolokasyon	82
5.3.7. Arama Stratejisi	84
6. BENZETİM ÇALIŞMALARI	85
6.1. İki Bölge Dört Jeneratörlü Güç Sistemi Parametreleri	85
6.2. Güç Sistemi Dengeleyicisi Parametreleri.....	87
6.3. Amaç Fonksiyonu	87

6.4. Güç Sisteminde Kısa Devre Durumları	89
6.5. Güç Sisteminde Yük Değişim Durumları	89
6.6. Sezgisel Yöntemler İle GSD Parametre Ayarı.....	90
7. UYGULANAN TEKNİKLERİNİN SONUÇLARI.....	93
7.1. Simülasyon Sonuçları	93
7.2. Simülasyon Grafikleri	98
7.3. Simülasyon Grafik Sonuçları	114
8. GENEL DEĞERLENDİRMELER	116
KAYNAKLAR	117
EKLER.....	123
ÖZGEÇMİŞ.....	135



ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

3.1. IEEE uyarıcı modelleri.....	40
6.1. Jeneratör parametreleri.....	86
6.2. İletim hattı parametreleri.....	86
6.3. Jeneratör değerleri.....	86
6.4. Şönt kapasitör değerleri.....	86
6.5. GSD parametreleri	87
6.6. Yük değişim durumları	89
6.7. Algoritmalarda (YAK, FGA ve EFO) kullanılan değişkenler	91
7.1. FGA uygulanan güç sistemi dengeleyicisi parametreleri kısa devre sonuçları	93
7.2. YAK uygulanan güç sistemi dengeleyicisi parametreleri kısa devre sonuçları	93
7.3. EFO uygulanan güç sistemi dengeleyicisi parametreleri kısa devre sonuçları	94
7.4. FGA uygulanan güç sistemi dengeleyicisi parametreleri yük değişimi sonuçları	94
7.5. YAK uygulanan güç sistemi dengeleyicisi parametreleri yük değişimi sonuçları	95
7.6. EFO uygulanan güç sistemi dengeleyicisi parametreleri yük değişimi sonuçları	95
7.7. Hata değerlerinin algoritmalara göre sonuçları.....	96
7.8. Durumlara göre IAE hata değerleri sönümlenme sonuçları.....	96
7.9. Kısa devre ve yük değişimi durumunda zamana göre sönümlenme sonuçları	97
7.10. Sonuç grafiklerine göre açısal hız ve sönümlenme zamanları	114
7.11. Sonuç grafiklerine göre rotor açısı değerleri.....	115

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

1.1. Tipik güç sisteminin ana parçaları	1
2.1. Güç sistem kararlılığı sınıflandırılması.....	12
2.2. Farklı rotor açısı davranışları	14
2.3. Üniteler arası salınımlar	15
2.4. Bölgeler arası salınımlar	15
2.5. Yerel mod salınımlar	16
2.6. Güç sistemi yapısı	16
2.7. Güç Sistemi basitleştirilmiş modeli	16
2.8. Vektör diyagramı	17
2.9. Güç ileme karakteristiği.....	18
3.1. Senkron makine rotor ve stator devreleri.....	25
3.2. Senkron jeneratör d-q eksen eşdeğer devreleri	29
3.3. Senkron makine modeli	32
3.4. Senkronizasyon ve sönümleme momenti etkisi.....	33
3.5. GSD içeren TMSG B modeli.....	38
3.6. Uyarım kontrol sisteminin fonksiyonel blok diyagramı	39
3.7. Kontrol bileşenleriyle birlikte TMSG B'nin şematik blok diyagramı.....	41
3.8. GSD parametre blok diyagramı	42
4.1. Çok makinalı güç sistemi diyagramı	46
4.2. Eşitliği temsil eden bir direnç ağı	46
4.3. (a) Küçük sinyal analizi için bir azaltılmamış elektrik şebekesi, (b). küçük sinyal analizi için bir azaltılmış elektrik şebekesi	50
4.4. Stator eşdeğer devresi	51
4.5. Azaltılmış şebeke sistemi (jeneratörün iç baralar ile).....	52
5.1. Deneme vektörü sürecini gösteren tek-nokta çaprazlama	67
5.2. Nokta çaprazlama ile deneme vektörünün oluşturulması	68
5.3. Üstel çaprazlama ile deneme vektörünün oluşturulması	68
5.4. Arılarda dans	71
5.5. Yiyecek arama çevrimi	72
5.6. Balık sürüsünde av tespiti ve iletişim	79
5.7. EFO' nun yerel arama gösterimi	81
5.8. EFO' nin küresel arama gösterimi.....	82
6.1. İki bölge dört jeneratörlü kundur modeli.....	85
6.2. Hata işaretinin zamana göre değeri.....	88
6.3. Kısa devre durumları	89
6.4. Matlab/PSS_Power tek bölge modeli	92
6.5. Matlab/PSS_Power iki bölge modeli.....	92
7.1. Durum 1 (L-G) rotor hız değişimi kararlılığı.....	98
7.2. Durum 1 (L-G) rotor hız değişimi GSD yok	98
7.3. Durum 1 (L-G) rotor açısı değişimi kararlılığı	99
7.4. Durum 1 (L-G) rotor açısı değişimi	99
7.5. Durum 2 (L-L-G) rotor hız değişimi kararlılığı.....	100
7.6. Durum 2 (L-L-G) rotor hız değişimi GSD yok.....	100
7.7. Durum 2 (L-L-G) rotor açısı değişimi kararlılığı	101
7.8. Durum 2 (L-L-G) rotor açısı değişimi GSD yok	101

7.9. Durum 3 (L-L-L-G) rotor hız değişimi kararlılığı	102
7.10. Durum 3 (L-L-L-G) rotor hız değişimi GSD yok	102
7.11. Durum 3 (L-L-L-G) rotor açısı değişimi kararlılığı.....	103
7.12. Durum 3 (L-L-L-G) rotor açısı değişimi GSD yok.....	103
7.13. Durum 4 (L-L-L) rotor hız değişimi kararlılığı.....	104
7.14. Durum 4 (L-L-L) rotor hız değişimi GSD yok	104
7.15. Durum 4 (L-L-L) rotor açısı değişimi kararlılığı	105
7.16. Durum 4 (L-L-L) rotor açısı değişimi GSD yok.....	105
7.17. Durum 5 (L-L) rotor hız değişimi kararlılığı	106
7.18. Durum 5 (L-L) rotor hız değişimi GSD yok	106
7.19. Durum 5 (L-L) rotor açısı değişimi kararlılığı.....	107
7.20. Durum 5 (L-L) rotor açısı değişimi GSD yok.....	107
7.21. Durum 6 (Hafif Yük) rotor hız değişimi kararlılığı	108
7.22. Durum 6 (Hafif Yük) rotor hız değişimi GSD yok	108
7.23. Durum 6 (Hafif Yük) rotor açısı değişimi kararlılığı.....	109
7.24. Durum 6 (Hafif Yük) rotor açısı değişimi GSD yok	109
7.25. Durum 7 (Nominal Yük) rotor hız değişimi kararlılığı.....	110
7.26. Durum 7 (Nominal Yük) rotor hız değişimi GSD yok	110
7.27. Durum 7 (Nominal Yük) rotor açısı değişimi kararlılığı	111
7.28. Durum 7 (Nominal Yük) rotor açısı değişimi GSD yok.....	111
7.29. Durum 8 (Ağır Yük) rotor hız değişimi kararlılığı	112
7.30. Durum 8 (Ağır Yük) rotor hız değişimi GSD yok	112
7.31. Durum 8 (Ağır Yük) rotor açısı değişimi kararlılığı.....	113
7.32. Durum 8 (Ağır Yük) rotor açısı değişimi GSD yok.....	113

SİMGELER DİZİNİ

ω	Rotor hızı
ω_i	Sanal öz değer
ω_{sm}	Mekanik senkron açısal hızı
σ_i	Gerçek öz değer
T_A	Uyarıcı zaman sabiti
T_D	d eksen geçici hal kısa devre zaman sabiti
T_{d0}	d eksen geçici hal açık devre zaman sabiti
T_E	Elektrik momenti
T_M	Mekanik momenti
T_{qd0}	Dönüşüm matrisi
T_W	GSD sıfırlama filtresi zaman sabiti
V_{ref}	Referans gerilimi
V_s	Sonsuz güçlü bara gerilimi
V_T	Senkron jeneratör uç gerilimi
W_K	Dönen bir kütlenin kinetik enerjisi
x'_d	d eksen geçici reaktansı
x_{ds}	E_q ile V_s arasındaki toplam endüktif reaktansı
x_e	Eşdeğer hat empedansı
X_e	Sonsuz güçlü baraya kadar endüktif reaktansı
X_g	Senkron jeneratörün indüktif reaktansı
X_h	Hat endüktif reaktansını
X_m	Senkron motorun indüktif reaktansı
X_T	Transformatörün endüktif reaktansı
Y_{DQ}	D ve Q eksen sistemin admitans
δ	Rotor açısı
ΔT_e	Elektriksel moment değişimi
$\Delta \delta$	Rotor açısı değişimi
$\Delta \omega$	Rotor hız değişimi
λ_i	Öz değer
Λ_r	Rotor sargılarının akı
Λ_s	Stator sargılarının akı
ξ_i	Sönümleme oranı

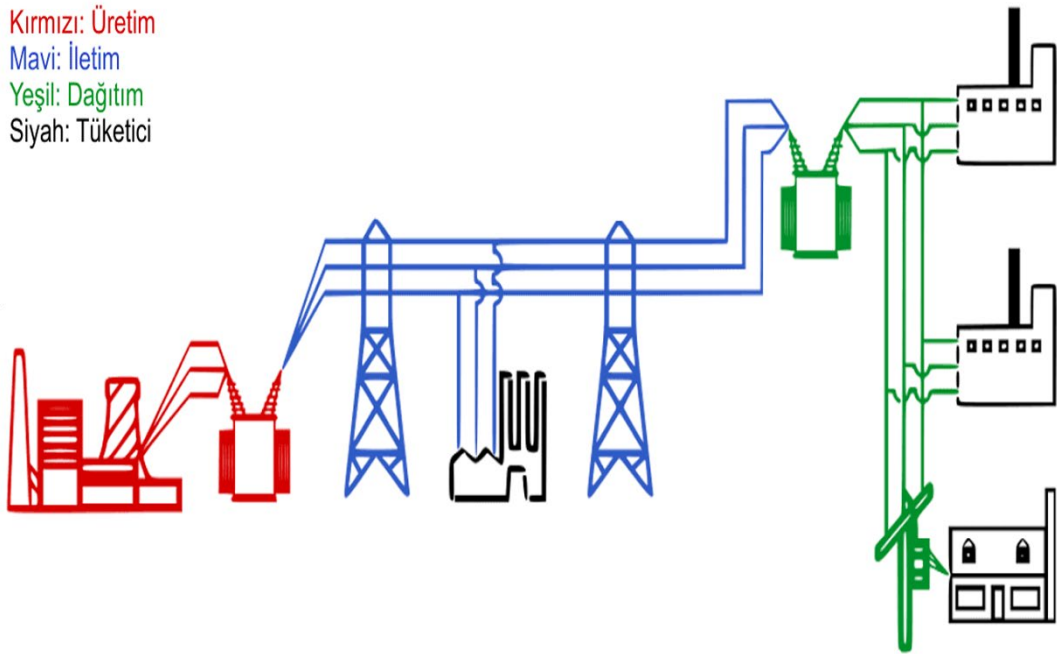
D	Elektriksel sönümleme momenti katsayısı
D_m	Mekanik sönümleme momenti katsayısıdır.
E_{fd}	Uyarma gerilimi
E_G	Senkron jeneratörün indüklenen gerilimi
E_M	Senkron motorda indüklenen gerilimi
E_q	q eksenli senkron jeneratörün indüklenen gerilimi
H	Atalet sabiti
J	Atalet momenti
$K1 - K6$	Senkron jeneratör doğrusal model sabitleri
K_A	Uyarıcı kazancı
K_D	Kontrolör türev katsayısı
K_S	Sönümleme momenti katsayısı
K_{GSD}	GSD'nin kazancı
K_I	Kontrolör integral katsayısı
K_P	Kontrolör oransal katsayısı
K_S	Senkronlama momenti katsayısı
L_D	d eksenli geçici hal öncesi endüktansı
L_{lkd}, L_{md}	d eksenli endüktansları
L_{lkq}, L_{mq}	q eksenli endüktansları
M	Eylemsizlik sabiti
P_E	Elektriksel güç
P_M	Mekanik güç
r_e	Eşdeğer hat direnci
T'_{do}	d eksenli geçici hal öncesi açık devre zaman sabiti
$T1, T2, T3, T4$	GSD faz kompanzasyon filtresi zaman sabitleri
T_a	Tahrik momenti

KISALTMALAR DİZİNİ

FGA	Farksal gelişim algoritması
YAK	Yapay arı kolonisi algoritması
EFO	Elektrik balığı optimizasyonu
GSD	Güç sistem dengeleyicisi
OGR	Otomatik gerilim regülatörü
TMSGB	Tek makine sonsuz güçlü bara
POWER_PSS	İki bölge güç sistemi simülasyonu

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, ekonomik ve güvenilir bir şekilde üretilip tüketiciye ulaştırılırken voltaj kararlılığını sağlayarak kesintisiz güç temini amacıyla enerji sistemleri kurulmuştur. Bu sistemler, küçük ölçekli olmalarına rağmen normal koşullarda kararlılık gösterirken, yüksek talep veya arıza durumlarında risk altındadır. Büyük sistemler ise alternatif kaynaklardan güç sağlama avantajına sahip olsa da kararlılık sorunları yaşayabilir. Modern operatörler, çeşitlilikten faydalanma ve güvenilirliği sürdürme yeteneği gibi önemli özellikleri ararlar. Ancak, artan taleple birlikte sistemler karmaşık hale gelmiş ve daha duyarlı hale gelmiştir. Bu bağlamda, enerji sistemlerinde kararlılık, sistemin bozucu bir etkiye maruz kaldığında, bu etkinin ardından işletme koşullarını etkiden önceki duruma geri getirme kabiliyetini ifade eder. (Eke, 2011)



Şekil 1.1. Tipik güç sisteminin ana parçaları

Güç sistemleri genellikle üretim, iletim, dağıtım ve tüketici olmak üzere Şekil 1.1’deki gibi dört alt sisteme ayrılır. (Yousf, 2019)

Güç sistemlerinin incelenmesinde, senkron makinelerin bir iletim hattı ve transformatör üzerinden sonsuz kapasiteye sahip bir şebeke ağına bağlandığı kabul edilirse, senkron jeneratörlerin normal işletme koşullarında önemli rolleri vardır. Sistemde ilave yük girişi veya çıkışı durumunda, düşük frekans ve genlikteki salınımlara (0.2 - 3.0 Hz) neden olabilir. Bu salınımlar, uzun süre devam ederse güç iletimini kısıtlayabilir ve sistemin çökmesine yol açabilir (Vandiver vd., 2010). Bozucu etkilerin meydana getirmesi ile elektrik ve mekanik güç dengesi bozulduğunda, güç sisteminin açısal kararlılığını sürdürebilmek için yeterli senkronizasyon momenti üretilmelidir. OGR, jeneratör uyarma alanına akım sağlayarak senkron makinenin senkronizmada kalmasını sağlar. Bu salınımı sönümler ve senkron makinenin istikrarını korur.

Büyük bir problemle karşılaşması durumunda, güç sistemi için senkronizasyon momenti yetersiz olabilir. Bu tür durumlarda, sönümlleme momentini artırmak için senkron makineye GSD eklenir. 1960'ların ortalarından itibaren GSD'ler, gerilim regülatörü girişine ek bir sinyal uygulayarak sönümlleme momenti oluşturmaya başlamışlardır. Güç sisteminin kararlılığı genellikle iki kategoride incelenir: kararlı durum veya küçük sinyal kararlılığı ve geçici kararlılık. Küçük sinyal kararlılığı, güç sisteminin küçük değişimlere maruz kaldıktan sonra kararlı durumuna geri dönme yeteneğini ifade eder. Geçici kararlılık ise güç sisteminin büyük bozulmalar, sistem hataları ve iletim hattı kesintileri gibi durumlara karşı senkronizasyonunu sürdürme yeteneğini tanımlar. (Gupta vd., 2003)

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Elektrik sistemlerinde rotor açısı kararlılığını iyileştirmek için güç sistemi dengeleyicisi kullanılır. Ancak, GSD'nin parametreleri en uygun çalışma noktasında en iyi performansı gösterir, ancak bu her zaman en uygun sonucu garanti etmez. Bu nedenle, değişen sistem koşullarında başarı kaybına uğramayan, dayanıklı bir GSD tasarımı için sezgisel algoritmalar kullanılır.

Güç sistem kararlılığı için mevcut yöntemleri ve modelleri bu çalışma ile açıklanması amaçlanmaktadır. TMSGB sistemi için GSD tasarımı üzerinde odaklanılmıştır. Ayrıca, çok bölgeli güç sistemleri için yapay arı kolonisi, farksal gelişim algoritması ve elektrik balığı optimizasyonu gibi sezgisel algoritmalar kullanılarak GSD

parametrelerinin ayarlanması hedeflenmektedir. Güç sistemleri, elektromekanik sönümlü titreşimlere sahip büyük bir enterkonnekte sistemdir. Bu titreşimler sırasında, elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüşerek senkron jeneratörler arasında transfer edilir. Rotor hızı ve güç akımı, bu titreşimler için önemli değişkenlerdir. Güç akışındaki salınımlar, enerji hatlarının her noktasında meydana gelebilir ve sabit hat akımı ile sınırlanan transfer kapasitesini artırarak güvenlik marjlarını gerektirir. Farklı arıza durumları, senkron jeneratörlerin senkronizasyondan çıkmasına ve kararlılık sorunlarına yol açabilir. Bu durumlar, rotor açısının kontrolüne odaklanan optimizasyon yöntemleri kullanılarak kararsızlık durumları analiz edilerek sönümlenmesi için çalışılacaktır.

Bu çalışmada, güç sisteminin rotor açısı kararlılığı iki ayrı model üzerinde değerlendirilmiştir. İlk model, TMSGB için Heffron-Phillips modelini içermektedirken ikinci model, dört makineli iki bölgeli güç sistemi için Prabha Kundur'un "Güç Sisteminde Kararlılık ve Kontrol" adlı kitabında verilen modelidir (Kundur, 1994). MATLAB ve Power_PSS Simulink ortamında, bu modeller kullanılarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, iki bölgeli dört makineli güç sistemi için güç sistemi dengeleyicisi tasarımı yapılmıştır. Parametrelerin ayarı için sezgisel algoritmalar kullanılmış, farklı kısa devre ve yük değişimi durumlarında hata değerinin optimize edilerek sistemin kararlılığı incelenmiştir.

Özellikle, elektrik balığı optimizasyonu ile ayarlanan güç sistemi dengeleyicisinin performansı, diğer algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, her algoritmanın güç sistemi dengeleyicisi parametrelerini etkili bir şekilde ayarlayıp ayarlayamadığını ve sistemin kararlılığına olan etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

1.2. Güç Sistemi Dengeleyicisi İçin Literatür Araştırması

Larsen, E. V. ve Swann D.A.; (1981), Bu çalışmada, Larsen ve Swann'ın geleneksel güç sistem dengeleyicisi modeline yönelik çalışmaları incelenmiş, GSD tasarımında kritik parametrelerin belirlenmesinde ve güç sistem kararlılığının artırılmasında önemli bir katkı sağlanmıştır. (Larsen ve Swann, 1981)

Larsen, E. V. ve Swann D.A.; (1981), Bu araştırmalarında ise, güç sistem dengeleyicisinin sürekli ve dinamik hal kararlılığının belirlenmesi ve çeşitli

salınımlara göre tepkisinin incelendiği, GSD' nin dinamik koşullara ve çeşitli salınımlara nasıl tepki verdiğinin anlaşıldığı ve geleneksel yöntemlerle GSD parametre ayarının nasıl gerçekleştirilebileceğine dair önemli bilgiler sunulduğu belirtilmektedir. (Larsen ve Swann, 1981)

Larsen, E. V. ve Swann D.A.; (1981), Araştırmacılar, güç sistem dengeleyicisi tasarımıyla ilgili Larsen ve Swann'ın çalışmaları, GSD'nin performansını belirleyen kritik parametreleri belirleyerek güç sistem kararlılığını artırmak için belirgin bir katkı sağlamıştır. (Larsen ve Swann, 1981)

Chi-Jui, W. ve Yuan-Yih, H.; (1988), Bu yapılam araştırmada, PID tabanlı ve kendinden ayarlamalı güç sistem dengeleyicisinin, çok makineli güç sistemlerinin çalışma aralığı geniş tutularak kararlılığın sürekli halini sağlamak için etkili bir sönümlleme sağladığı belirlenmiştir, bu da geleneksel olmayan bir GSD tasarımı için yeni bir anlayış sunmuştur. (Chi-Jui ve Yuan-Yih, 1988)

Hsu, Y.Y. ve Su, C. C.; (1988), Araştırmacılar, santralleri pompaj depolamalı olanlar için yapılan özdeğer-özvektör tabanlı GSD çalışmaları ve geçici durum kararlılık analizi kapsamında değerlendirmişlerdir, bu da uygun parametre değerlerinin belirlenmesini ve GSD'nin etkili sönümlleme sağlayacağı güç salınım durumlarını detaylı bir şekilde analiz etmeyi amaçlamaktadır. (Yuan-Yih ve Cheng, 1990)

Trudnowski, D. J., Smith, J. R.; (1991), Araştırmacılar, GSD transfer fonksiyonu ile modeli olarak düşük dereceli jeneratör belirlemek için yöntem geliştirmişlerdir. Prony sinyal analizi ile ifade edilen bu yöntemle elektromekanik salınımların yerel ve bölgelerarası analizine olanak sağlamaktadır. (Trudnowski vd., 1991)

Chao- Rong Chen ve Yuan- Yin Hsu; (1991), Araştırmacılar, güç sistemi dengeleyicisi tasarımıda yeni bir yaklaşım olarak, yapay sinir ağı yöntemi ile senkron jeneratörün sürekli hal kararlılığı konusunda analiz geliştirmişlerdir; bu YSA, jeneratör çıkışları ve güç sistemi dengeleyicisi parametreleri gibi kritik değişkenleri içerir, offline olarak eğitilmiş ve büyük bir güç sisteminde test edilmiştir. Bu çalışma, YSA'nın kararlılık göstermesi ve geleneksel sistemlerden farklı bir tasarım olması bakımından önemlidir. (Chen ve Hsu, 1991)

Zhou, E. Z., Malik, O. P. ve Hope, G. S.; (1991), Araştırmacılar, GSD' nin çok makineli güç sistemlerinde optimal konumunu belirlemek için yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem, sağ özvektör durum değişkenlerini sol özvektörlerin kontrol

sinyali karakteristikleriyle birleştirerek 13 makineli sistemde en iyi GSD konumunu belirleme olanağı sağlamıştır. Zaman alanı benzetim çalışmaları, bu yöntemin uygun ve doğru olduğunu göstermektedir. (Zhou vd., 1991)

Yang, T.C.; (1997), H_{∞} optimizasyon yöntemi, güç sistem dengeleyicisi tasarımında kullanılmış ve farklı ağırlık fonksiyonlarının seçimi incelenerek geleneksel dengeleyici tasarımıyla karşılaştırılmıştır. (Yang, 1997)

Gurralla, G. ve Sen; (2008), Bu alışmada, Heffron ve Phillips tarafından önerilen araştırmalar, GSD tasarımının temelini oluşturur ve senkron makinedeki düşük genlikli salınımları incelemek için tek makine sonsuz güçlü bara sistemini önermektedir. (Gurralla ve Sen, 2008)

U. Gülseren; (2010); Bu tez, jeneratör rotor aı kararlılığının, düşük frekanslı elektromekanik osilasyonların sönümlenmesinin ve jeneratör uyarılma kontrol sisteminin dinamik performansının artırılmasını amaçlar; bu kapsamda, beş farklı kural içeren Fuzzy Güç Sistem Dengeleyicisi ayrıntılı olarak incelenmiş ve FPSS'in kural izelge su optimizasyonu genetik algoritma ile gerçekleştirilmiştir. (Gülseren, 2010)

S. Duman; (2010), Araştırmada, TMSGGB sistemde bozucu koşullarda, genetik algoritma ile PID kontrolör parametreleri optimize edilmiş ve yapılan simülasyonlar önerilen kontrolörünün klasik yöntemlere göre küçük bozunum koşullarında daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. (Duman, 2010)

S. Ekinici; (2010), Bu tezde, farklı çok makine modelleri için kontrolör tasarımı Parçacık Sürü Optimizasyonu ile gerçekleştirilmiş; kontrolör parametreleri, jeneratörlerin salınımlı rotor hızındaki sapmaları azaltmak için belirlenmiştir ve nerilen GSD kontrolörleri çeşitli arıza durumlarında test edilmiş ve simülasyon sonuçları sunulmuştur. (Ekinici, 2010)

İ. Eke, M. C. Taplamacıoğlu, İ. Kocaarslan; (2011), Tek bir jeneratörle işleyen bir güç sistemine yönelik GSD parametrelerinin ayarlanması üzerine yapılan araştırmada, yeni bir yöntem geliştirilmiş ve bu yöntem, yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak zlmştir; önerilen yapay arı kolonisi tabanlı GSD' nin etkinliğini göstermek için, TMSGGB sistemde küçük bozucu sinyaller altında analiz yapılmıştır. (Eke vd., 2011)

B.Taşar, M.zdemir; (2011), çalışmada, farklı senaryolarda yapılan simülasyonlar, güç sistem dengeleyicisinin etkilerini değerlendirmek için bulanık mantık tabanlı güç

sistem dengeleyicisi, geleneksel GSD ve klasik PID kontrolörüyle yapılan karşılaştırmaları içerir. (Taşar ve Özdemir, 2011)

H. A. Duwaish, Z. A. Hamouz; (2011), Yapılan araştırmada, güç sistem dengeleyicisine, adaptif kayan kipli kontrolör tabanlı yapay sinir ağları uygulanmış ve bu yaklaşımın güç sistem dengeleyicisinin çok bölgeli çalışma için etkili sönümleme sağladığı gösterilmiştir; bununla birlikte, geleneksel güç sistem dengeleyicisi sabit parametrelere sahip basit bir yapıya sahiptir. (Al-Duwaish ve Hamouz, 2011)

O. Abedinia, R. Izadfar, A. Shayanfar, N. Amjady; (2012), Bu çalışmada, çok makineli güç sistemlerinde salınımların sönümlenmesi için güç sistem dengeleyicisi parametrelerinin ayarlanmasında Multi-objective Honey Bee Mating Optimization tekniği kullanılmıştır. (Abedinia vd., 2012)

E. Bal; (2012), Belirli bir model üzerinde, geleneksel Güç Sistem Dengeleyici ve PID kontrolörlerinin sabitleri, Yapay Arı Kolonisi ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu algoritmaları yöntemleriyle belirlenmiş ve analiz performansları incelenmiştir. (Bal, 2012)

A. Ağın; (2013), Çalışmada, senkron jeneratördeki küçük yük değişimlerinin etkisi Heffron-Phillips modeliyle incelenmiş ve karınca kolonisi algoritması, parçacık sürüsü optimizasyonu, genetik algoritma ve yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak güç sistemi dengeleyicisi parametreleri belirlenmiştir. Bu parametrelerin performansı, çeşitli optimizasyon algoritmalarıyla değerlendirilmiş ve genetik algoritmanın en başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. (Ağın, 2013)

A. Khodabakhshian, R. Hemmati; (2013), Araştırmacı, GSD' nin parametrelerini belirlemek amacıyla Kültürel Algoritma yöntemi kullanmış ve bu yöntemi iki farklı çok-makineli elektrik sistemleri üzerinde simülasyonlarla test etmiştir. (Khodabakhshian ve Hemmati, 2013)

F. Turan; (2013), Çalışmada, Alkumru Hidroelektrik Santrali'nin Matlab/Simulink programında, iki ünite ve bunların bağlandığı iletim sistemi için bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bu modelde güç sisteminde gerçekleşen arızaların ve yük değişimlerinin etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş, GSD' nin arızalarda hem aktif hem de pasif durumlarda tepkisi değerlendirilmiş ve gerçek zamanlı deneysel sonuçlar analiz edilmiştir. (Tufan, 2013)

D.K. Sambariya, R. Prasad; (2014), Yapılan çalışmada, GSD tasarımı için Yarasa Algoritması kullanılarak GSD'nin kazancı ve kutup-sıfır parametreleri optimize edilmiştir, öz değer yöntemine ile objektif fonksiyonu, GSD'nin parametreleri için önerilen optimizasyonunda belirlenmiştir. (Sambariya ve Prasad, 2014)

M. Aminu; (2014), Bu tezde, Geniş-Alan Baskılama Dengeleyicisi, Model Öngörümlü Denetleç (MPC) kullanarak güç sistemlerinde alanlar arası salınımları sönümlemeyi hedeflemektedir. Bu yöntemde MPC denetleyicisi, lineer kesikli zamanlı durum uzayı modelini kullanarak en uygun kontrol sinyalinin hesaplar, ardından bu sinyaller yerel salınımları sönümlemek için Güç Sistemi Kararlı Dengeleyicisine iletilir. (Husein, 2014)

A. Abdülaziz; (2015), Bu çalışmada, çoklu-makinalı güç sistemlerinde bütünleşik güç akış dengeleyicisi ile iki adet güç sistemi, parçacık sürü optimizasyonu tekniğini kullanarak tasarımlar gerçekleştirilmiş ve böylece bölgeler arası salınımlar etkili bir şekilde bastırılmıştır. (Abdulazeez, 2015)

Z. Ferhad; (2015), Bu çalışmada, yarası algoritması ve ateş böceği algoritması temelli dengeleyiciler ile yapay arı kolonisi algoritması tabanlı GSD performansı, özellikle tek makine senaryosunda karşılaştırılmış ve dört makine iki bölge güç sisteminde daha hızlı sönümleme sağlayan yapay arı kolonisi tabanlı dengeleyicinin öne çıktığı belirlenmiştir. (Farhad, 2015)

H. M. Somarin; (2016), Bu araştırmada, mikro şebeke dengeleyicisi tasarlanmış ve güç sistemlerindeki salınımları sönümlendirmek için uyarma gerilim referansına eklenen yardımcı işareti kullanan bir güç sistemi dengeleyicisi benimsenmiştir; senkron-evirici kullanılarak gerçek bir senkron jeneratörün davranışını taklit eden bir dengeleyici tasarlanmış ve kayan kipli kontrol yöntemi önerilmiştir. (Somarin, 2016)

K. H. Saleh; (2016), Bu tezde, güç sistem dengeleyicisi ve statik VAR dengeleyici kullanılarak sönümlemeli salınımların ve geçici kararlılığın artırılması hedeflenmiştir; güç sistem dengeleyicisi izole edilmiş senkron jeneratörün elektromanyetik salınımlarını etkili bir şekilde sönümlemesi için tahrik ve/veya kontrol ünitesine entegre edilmiş olması incelenmiştir, bu çalışma, güç sistem dengeleyicisi ve statik VAR dengeleyici arasındaki karşılaştırma sayesinde hangi yöntemlerin daha etkili olduğunu anlamamıza yardımcı olmaktadır. (Saleh, 2016)

K. K. Salman; (2017), Bu tez, Bazıyan Doğal Gaz Güç Santrali'nin modellenmesi ve simülasyon çalışmasını içererek, Güç Sistemi Dengeleyicisi ile birlikte IEEE AC7B tipi uyarım sistemi, senkron jeneratör ve bir transformatörü dikkate alır; simülasyonlar, BGPP'ye uyarlanmıştır ve çeşitli bozucu koşullar altında farklı sistem değişkenlerini analiz eder. (Salman, 2017)

H. Abdalqadir; (2018), Bu tez, güç iletim sistemindeki geçiş kararlılığını artırmayı hedefleyen GSD ve Statik Var Kompanzasyonunun etkisini inceliyor. MATLAB/Simulink modellenmesiyle yapılan simülasyonlar, GSD+SVK 'nın gerilim ve reaktif güç kararlılığını önemli ölçüde artırdığını gösterdi. Ayrıca, GSD+SVK' nın devre kesicilerin röle ayarları için kritik toparlanma sürelerini belirlemede etkin olduğu sonucuna ulaşıldı. (Abdalqadir, 2018)

I. Yousf; (2019), Bu tezde, küçük bozulmaların etkisi altındaki bir güç sistemi için Aktif Bozulma Dışlama Denetimi ve Geribesleme Hata Öğrenme Denetimi dengeleyicileri tasarlanmıştır. Simülasyonlar, önerilen denetim yöntemlerinin sistem kararlılığı ve performansını konvansiyonel karşılaştırıcılardan daha iyi göstermektedir. (Yousf, 2019)

Ş. Baycan; (2019), Bu çalışmada, 2 alanlı 4 jeneratörlü Kundur modeline dayalı olarak, alanlar arası salınımları sönümlemek için bir Statik VAR Kompanzatör tabanlı geniş alan sönümleme kontrol sistemi tasarlanmıştır. Global sinyal geometrik ölçü kullanılarak sönümleme sağlanmış ve değişken ağ gecikmelerini telafi etmek için bir algoritma geliştirilmiştir. Önerilen sistem, Matlab/SIMULINK ve gerçek zamanlı simülatörde test edilmiştir. (Yalçın, 2019)

M. Özbay; (2021), Bu çalışmada, senkron jeneratörlerde OGR, GSD ve Türbin Yöneticisi modellerinin entegre edilmesiyle güç sisteminin küçük sinyal kararlılık analizleri gerçekleştirilmiş ve bir Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör tabanlı rüzgar türbini eklenerek analiz yapılmıştır. Katı Oksit Yakıt Hücresi nin dahil edilmesiyle dört makinalı iki alanlı test sisteminde kararlılık incelenmiştir. (Özbay, 2021)

M. Demirbaş; (2021), Bu çalışmada, Güç Sistem Analizi kullanılarak yapılan benzetimlerde, farklı denetleyiciler ve sistem bileşenleriyle küçük sinyal kararlılığı incelenmiş; ayrıca, Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör tabanlı rüzgar türbini ve Enerji Depolama Sisteminin'nin entegrasyonu ile analiz derinleştirilmiştir. Değerlendirmeler,

senkron jeneratör açısal hızı, güç değişimleri ve bara gerilimleri üzerinde yoğunlaşmıştır. (Demirbaş, 2021)

H. Yokuş; (2022), Bu çalışmada, TMSGB sisteminde Karga Arama Algoritması ile GSD parametrelerinin belirlenmesi üzerine odaklanılmış, çok makineli bir güç sisteminde ise Yapay Arı Kolonisi Algoritması ve Karınca Kolonisi Algoritması gibi algoritmalarla karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Sonuçlar, Karınca Kolonisi Algoritması tabanlı GSD dengeleyicisinin diğerlerine göre daha iyi dinamik tepki verdiğini göstermektedir. (Yokuş, 2022)

K. Montakhabı; (2022), Bu çalışmada, güç sistemlerinde acil durum kontrolünü artırmak için yapay sinir ağları tabanlı bir yaklaşım önerir ve jeneratörlerin normal hızını ve sistemin arızadan önceki haline dönmesini sağlayan bir kontrol stratejisi geliştirmiştir. Yapay sinir ağları tabanlı kontrolör, jeneratörün rotor hızını ve mekanik gücünü ayarlayarak sistemi dengeler. Tez, yapay sinir ağları tabanlı kontrolün geliştirilmesi ve model öngörülü kontrol tabanlı kontrolörlerle karşılaştırılmasına odaklanır, matematiksel modele bağımlı ve bağımsız kontrolörlerin performans farklarını ortaya koymaktadır. (Montakhabı, 2022)

M. Motallebzadeh; (2022), Bu tezde, güç sistemlerinin acil durumlarında geçici kararlılığı artırmak için Adaptif Geri Adım Kontrolü yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem, doğrusal olmayan bir geri besleme kontrol yöntemi olup kontrol yasası, öz yinelemeli bir şekilde uyarlanabilir geri adım atma yaklaşımı kullanılarak oluşturulmuştur. Lyapunov fonksiyonu yaklaşımı, rotor açısı ve jeneratörün bağıl hızının yakınsamasını ve kontrolör tarafından sağlanan aktif elektrik gücünü analiz etmek için kullanılmıştır. Adaptif Geri Adım Kontrolü 'nin parametreleri, Parçacık sürü algoritması kullanılarak başarıyla ayarlanmıştır. (Motallebzadeh, 2022)

1.3. Araştırmanın Bölümleri

Çalışmanın birinci bölümü, GSD ile ilgili yapılan çalışmaları kapsarken, ikinci kısımda güç sistemleri kararlılıkları ve TMSGB konusunda genel bir açıklama sunulmuştur. Üçüncü kısımda, güç sistemlerinin dinamik davranışlarını anlamak ve GSD tasarlamak amacıyla, TMSGB sistemi ile senkron jeneratörünün modeli çıkarılmıştır. Dördüncü bölümde, çok makinalı güç sisteminin analizi incelenmiş ve sistem modelinin formülasyonu detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Beşinci bölümde,

GSD parametre ayarı için Elektrik Balığı Optimizasyonu, Yapay Arı Kolonisi ve Farksal Gelişim algoritmaların işleyişi incelenmiştir. Son bölümde ise, önerilen EFO tabanlı GSD' nin parametre ayarları üzerinde analizler gerçekleştirilmiş ve EFO tabanlı GSD' nin üstünlüğü açıkça gösterilmiştir. Tüm çalışmalarda, güç sistemine kısa devre ve yük değişim analizleri eklenmiş ve GSD parametre ayarı geniş alan bölgesi çalışmaları için gerçekleştirilmiştir, FGA ve YAK algoritması kullanılarak GSD parametreleri ayarlanmış ve sadece EFO tabanlı GSD ile gerçekleştirilen analiz çalışmalarının sonuçlarıyla karşılaştırılma yapılmıştır.

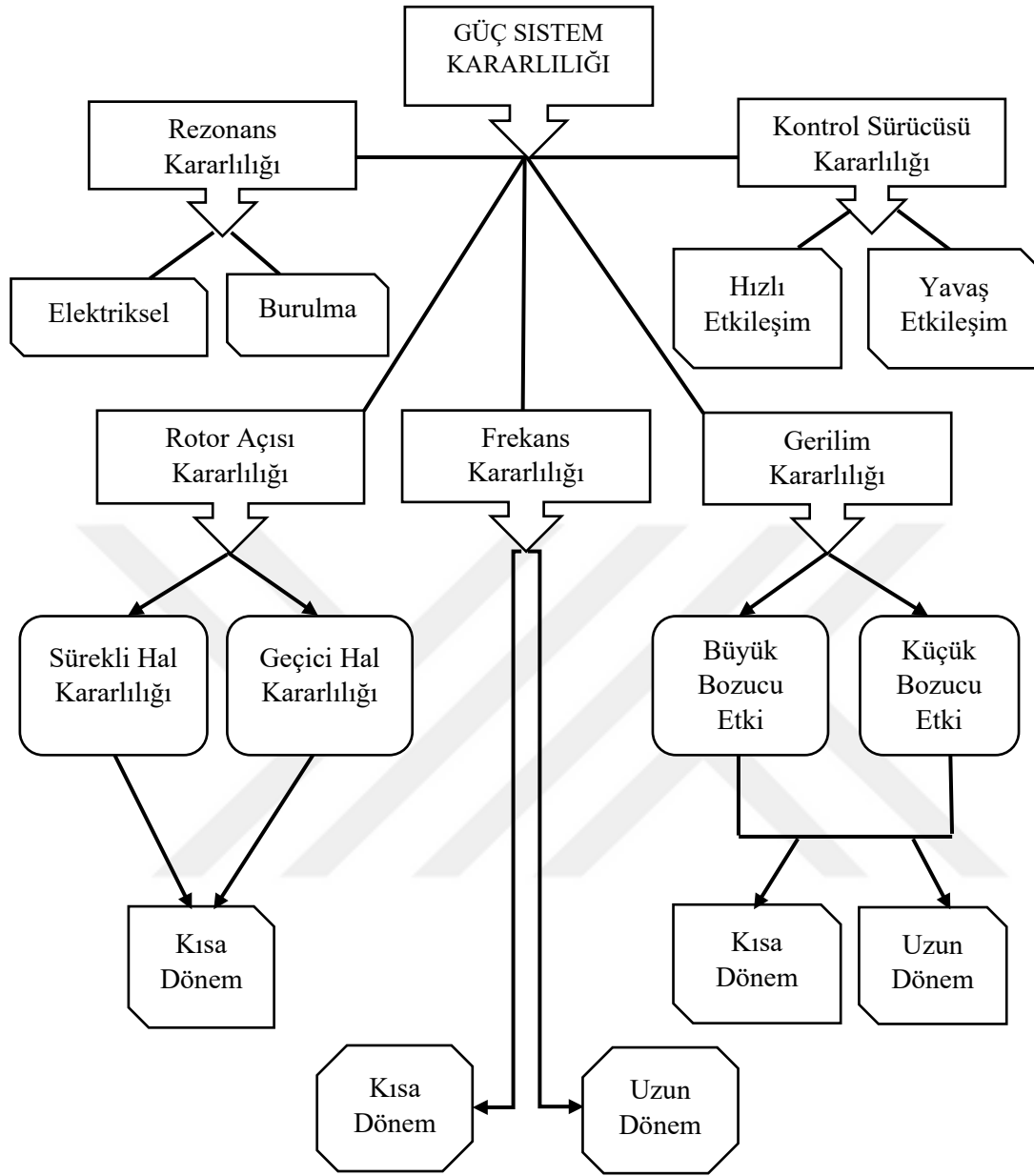


2. GÜÇ SİSTEMİ

Şebeke güç sistemi; üretim istasyonu, iletim hattı ve dağıtım sistemi olarak üç ana parçadan oluşur. Sürekli ve kararlı hizmet için gerekli önlemler alınmalıdır. Ancak istenmeyen arızalar bazen meydana gelebilir. Elektrik talebinin artmasıyla güç sistemleri karmaşıklaşır, büyük enerji santralleri kurulur, enterkonneksiyonlar artar ve ekstra yüksek gerilim bağlantı hatları gibi problemler ortaya çıkar. (Rogers, 2000) (Machowski vd., 1997) (Anderson ve Fouad, 2003)

2.1. Güç Sistemi Kararlılığı

Kararlılık, sistemde istikrarın sağlanması için kritik öneme sahiptir. İki ana kavram kararlılık analizinde öne çıkar: Küçük sinyal kararlılığı (senkronizasyonun sürdürülmesi) ve geçici kararlılık (ilk çalışma durumunun korunması). Jeneratörler elektrik gücünü üretmek için kullanılır ve transformatörler, iletim hatları üzerinden gücün akım seviyesini düşürürken voltaj seviyesini yükseltir ve kayıpları azaltır. Kararlılık için, sistemdeki kararsızlıklar farklı sınıflara ayrılarak ele alınır. Bu sınıflandırmada; fiziksel etkinin büyüklüğüne, türüne, etkilediği elemanların tipine ve etki süresine göre gruplandırıldığında Şekil 2.1' deki gibi bir değerlendirme yapılmaktadır. (Kundur, 1994) (Anderson ve Fouad, 2003)



Şekil 2.1. Güç sistem kararlılığı sınıflandırılması

Güç sistemlerinin istikrarsızlık türlerini analiz etmek için bazı basitleştirici varsayımlara ihtiyaç vardır. Bu analizi kolaylaştırmak için güç sistemleri genellikle belirli kategorilere ayrılır. Bu sınıflandırma, cihazların kararlılığını tahmin etme, bozucu faktörleri belirleme, istikrarsızlık eğilimlerinin doğasını anlama ve istikrarın yeniden sağlanması gibi faktörleri içerir. Bu sınıflandırma, güç sistemlerinin istikrarsızlıkla ilgili sorunlarının tanımlanması ve ele alınmasında önemli bir rol oynar. Genel olarak güç sistemi kararlılığı aşağıdaki gibi üç ana kategoriye ayrılır: (Kundur, 1994) (Anderson ve Fouad, 2003) (Machowski vd., 1997)

1-Uzun ve kısa vadeli olarak ikiye ayrılan frekans kararlılığı.

2-Büyük ve küçük bozulma gerilim kararlılığı olarak kategorize edilen gerilim kararlılığı.

3-Küçük bozulma açısı kararlılığını içeren rotor açısı kararlılığı veya (küçük sinyal kararlılık) ve geçici kararlılık.

2.1.1 Rotor Açısı Kararlılığı

Bu kararlılık, senkron makinelerin enterkonnekte sistemlerdeki rotor açısı kararlılığına odaklanmakta ve makinelerin çıkış güçlerinin rotor açısı salınımlarına bağlı olduğu temel bir prensibe dayanır. (Tosun, 2011) Senkron makinelerin endüvi ve uyarma sargılarından oluştuğu ve bunların rotor hızıyla senkronize olduğu belirtiliyor. Sonuç olarak, sistemdeki tüm senkron jeneratörlerin rotor hızlarının senkronize olması gerekiyor.

Senkron makinelerin karmaşıklığını anlamak, rotor açısı salınımlarının güç çıkışını nasıl etkilediğini açıklamak için önemlidir. Rotor açısı, dönen manyetik alan içindeki shaftın sabit referanslara göre konumunu belirler. Güç girişi değiştiğinde, jeneratör ucu rotor açısına uyum sağlar. Arıza durumlarında, makine rotor açısına bağlı olarak hızlanır veya yavaşlar, bu da farklı hızlarda çalışan makineler arasında güç transferini etkiler. Ancak, hız farkı çok büyükse, güç aktarımı azalabilir ve makine senkronizasyonunu kaybedebilir.

Senkron makinelerin kararlılığı, elektriksel çıkış momenti ile mekanik giriş momenti arasındaki denge kabiliyetine bağlıdır. Her jeneratör için sabit kararlı durum koşullarında, hızdaki denge her iki tork arasında sağlanır. Eğer bir jeneratör diğerinden sürekli olarak daha hızlı dönüyorsa, bu durumda hızı artan jeneratör, yükü azalan jeneratörden alarak onun hızını yavaşlatır ve rotorların açısal farkını azaltır. Ancak, bu denge sınırlıdır ve belirli bir açısal fark için geçerlidir. Eğer büyük bir bozucu etkiyle açısal fark sınırların ötesine geçerse, yeterli senkronizasyon momenti sağlanamaz ve açısal fark artar. Sonuç olarak, güç iletimi azalır ve jeneratör senkronizasyonunu kaybedebilir. (Kundur, 1994) (Anderson ve Fouad, 2003) (Tacer, 1990)

Elektirikteki değişikliği çözmek için iki bileşen vardır. Senkron bir makinenin torku ΔT :

(i) Hız sapması ($\Delta\omega$) ile aynı fazda sönümleme torku bileşeni.

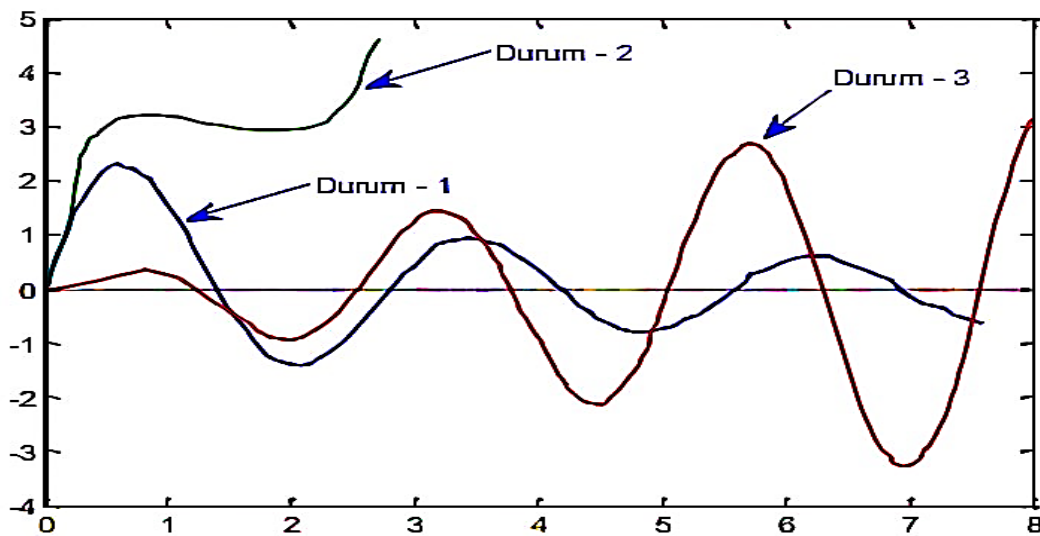
(ii) Rotor açısı p ($\Delta\delta$) ile aynı fazda tork bileşeninin senkronize edilmesi.

$$TS\Delta\delta + TD\Delta\omega = T_e \quad (2.1)$$

Genel olarak, senkron makinelerin rotorunun açısal kararlılığı, ilk çalışma durumuna bağlı olup, mekanik ve elektriksel momentlerin rotor üzerindeki etkisiyle salınımların değişimine dayanır. Senkron makinenin arızasının koşulları ve önemine göre, sistemdeki bozulmaların doğası ve konumu, açısal kararlılık ve rotor kararlılığı şu şekilde sınıflandırılabilir: (Anderson ve Fouad, 2003)

(i) Küçük sinyal kararlılığı: Güç sistemlerinde, senkronizasyonun sürdürülmesi küçük bozulmaların etkisine bağlıdır. İletim hattı, jeneratör uyarma tipi ve çalışma noktası gibi faktörler, sistemin davranışını şekillendirir. Küçük bozulmalar genellikle iki tür kararsızlık yaratır: sönümleyici momentin eksikliğiyle artan genlikli rotor salınımları ve senkronlayıcı momentin yetersizliğiyle rotor açısının sürekli artması. Küçük sinyal kararlılığı, zararsız salınımların etkileriyle ortaya çıkar. (Padiyar, 2004)

(ii) Geçici kararlılık: Büyük güç tüketicilerinin devre dışı kalması veya kısa devreler gibi ciddi etkilerde, senkronizasyonun sürdürülmesi hayati öneme sahiptir. Bu durum, etki öncesinde ve sonrasında farklı sürekli hal çalışma noktalarını içerir. Geçici hal kararlılığını etkileyen faktörler arasında arıza sonrası iletim sistemi reaktansı, jeneratör reaktansı ve iç gerilim genliği, sonsuz bar gerilimi genliği, jeneratör ataleti ve yüklenme durumu, arıza temizleme süresi ve arıza sırasında jeneratör çıkışı yer alır. (Machowski vd., 1997)

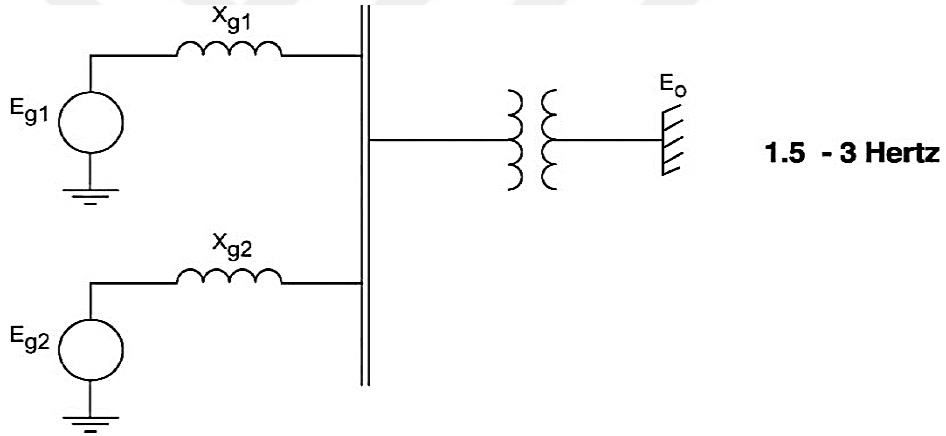


Şekil 2.2. Farklı rotor açısı davranışları

Şekil 2.2' de rotor açısının zamana bağlı değişiminde ilk durumda, rotor açısı salınımlarının genlikleri zamanla azalır, bu nedenle bu durum kararlıdır. İkinci senaryoda, senkronizasyon kaybından dolayı rotor açısı sürekli artması sonucu ilk salınım kararsızlığı olarak bilinir ve yetersiz senkronizasyon momentinden kaynaklanır. Üçüncü durumda ise, sistem birinci duruma göre kararlı olabilir, ancak zamanla salınım genlikleri büyür. En yaygın kararsızlık genellikle üçüncü durumdaki kararsızlıktır. (Farhad, 2015) (Küçüktezcan, 2012)

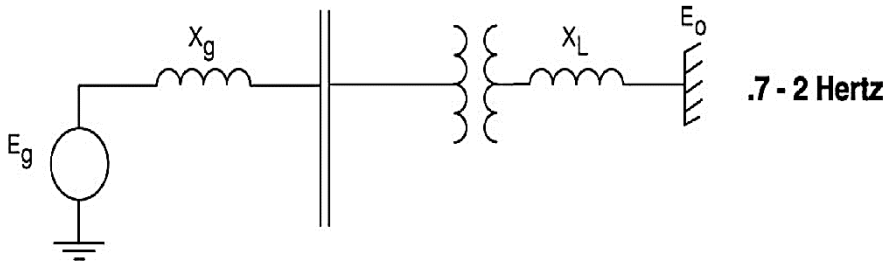
Sürekli hal kararlılığı için önemli bir faktör olan güç sistemlerinde salınımların yetersiz sönümlenmesi için farklı güç salınımları tanımları vardır. Bunlar;

-Üniteler Arası Salınımlar; Bir santralde veya komşu 2 veya daha fazla senkron makinede 1.5-3 Hz. aralığındaki salınımlar, genellikle yetersiz olarak ayarlanabilir uyarmlar, statik var kompanzatorleri, yüksek gerilimli doğru akım dönüştürücüler ve hız regülatörleri gibi ekipmanlarla ilişkilendirilir.



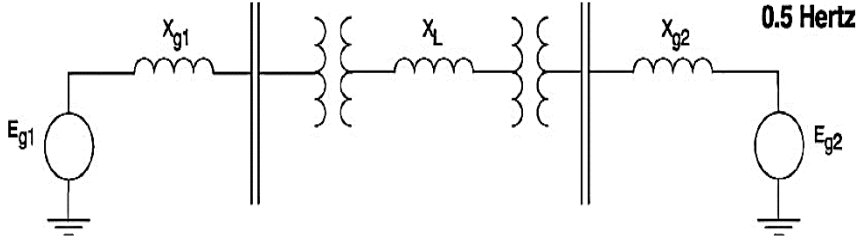
Şekil 2.3. Üniteler arası salınımlar

-Bölgeler Arası Salınımlar; Enterkonnekte sistemlerde, çok sayıda jeneratör kombinasyonu arasında 0.5 Hz.' den küçük salınımlar gözlemlenir. Bu salınımlar genellikle zayıf şekilde entegre edilmiş yakın kuplajlı makine grupları veya iki grup arasındaki kararsızlıklardan kaynaklanır



Şekil 2.4. Bölgeler arası salınımlar

-Yerel Mod Salınımlar; Bir yük bölgesinde, bir veya daha fazla senkron makinenin yaptığı 0.7-2 Hz. aralığındaki güç salınımları tanımlandığı üzere, genellikle bir üretim tesisini veya güç sisteminin küçük bir bölümünü etkiler.

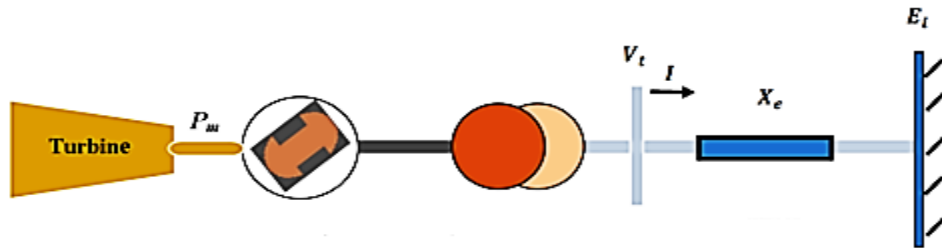


Şekil 2.5. Yerel mod salınımlar

-Torsiyonel Mod Salınımlar; Sistemde dönen türbin-jeneratör mili ile ilgili olan torsiyonel modların kararsızlığı; kontrolörler, seri kompanzasyonlu hatlar, uyarma kontrolleri ve hız regülatörleri tarafından oluşturulabilir. (Rogers, 2000) (Kundur, 1994)

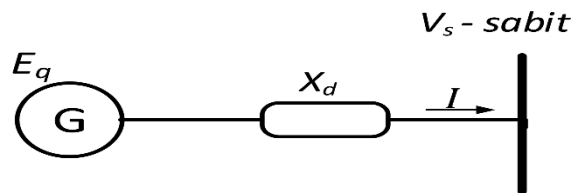
2.1.2 TMSGB Bağlı Senkron Jeneratörün Güç Karakteristiği

Senkron jeneratör, sonsuz güçlü bir şebekeden beslenir ve şebeke gücü jeneratör gücünden çok büyüktür. Sonsuz güçlü barada gerilim ve faz açısı sabittir. Bu çalışmada, birbirine bağlı senkron makinelerden oluşan bir güç sistemi ele alınır. TMSGB sistemi, tek bir makinenin genel konfigürasyonunu gösterir; burada V_t jeneratör terminal gerilimi, E_t sonsuz bara gerilimi ve X_e iletim hattı reaktansıdır. (Pal ve Chaudhuri, 2003) (Machowski vd., 1997) (Kundur, 1994)



Şekil 2.6. Güç sistemi yapısı

Bu basitleştirilmiş yapısının güç sistemi modeli, Şekil 2.7' de gösterilir.

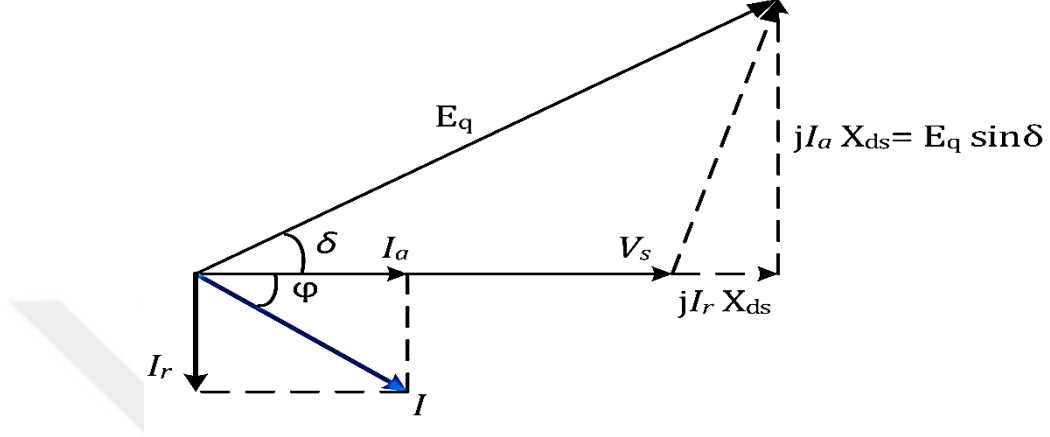


Şekil 2.7. Güç Sistemi basitleştirilmiş modeli

Bu modelde,

$$X_{ds} = X_d + X_e, (X_e = X_T + X_h/2) \quad (2.2)$$

Şekil 2.8'de vektör diyagramı basitleştirilmiş modelin Şekil 2.7'sinde gösterildiği gibidir.



Şekil 2.8. Vektör diyagramı

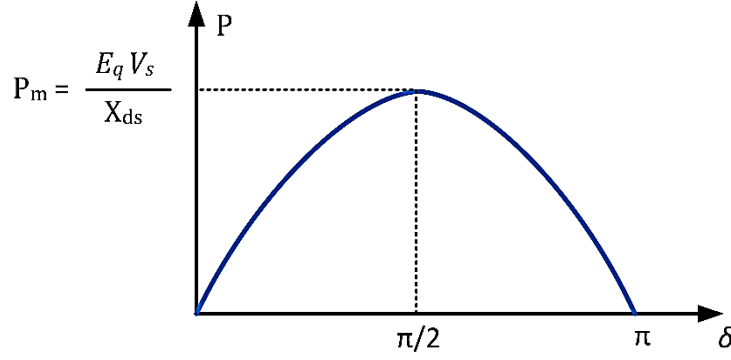
Şekil 2.8'de gösterildiği gibi aktif gücün eşitliği:

$$P = V_s \cdot I \cos \phi = V_s \cdot I_a \quad (2.3)$$

Bu eşitliğin her iki tarafı X_{ds}/X_{ds} ile çarpılarak $I_a X_{ds} = E_q \sin \delta$ eşitliğinden $I_a = E_q \sin \delta / X_{ds}$ elde edilip Eşitlik 2.3' de I_a karşılığınanılır ve yerine konulduğunda,

$$P = V_s \cdot I_a \cdot \frac{X_{ds}}{X_{ds}} = \frac{V_s \cdot E_q}{X_{ds}} \sin \delta \quad (2.4)$$

Elde edilen denklem senkron jeneratörün güç karakteristiği olarak adlandırılır. Bu güç karakteristiği E'_q , V_s , X_{ds} ve δ değişkenlerine bağlıdır. V_s ve X_{ds} sabit değişkense, sadece değişim E'_q ve δ ile olmaktadır. OGR olmayan senkron jeneratörlerde çalışma noktasının yavaş değişimi nedeniyle E'_q Sabit kabul edildiğinde, senkron jeneratörün güç karakteristiği δ ile değişir ve bu değişim Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Güç iletim sınırı değeridir burada sistemin P_m ile ifade edilmiştir.



Şekil 2.9. Güç iletme karakteristiği

Senkron jeneratör salınım denklemi:

Kararlılık türü olan sürekli hal çalışmasında, güç açısı sabittir ve herhangi bir bozulma durumunda rotorun manyetik alanla olan açısı değişebilir, bu da manyetik motor kuvvetine göre hızlanarak veya yavaşlayarak bir bağıl hareket başlatır ve bu hareket, sistemin kararlılığını etkileyen salınımlara neden olur. Senkron jeneratörün kararlılığı, rotorun tekrar senkron hızda kalmasına bağlıdır. Geçici bir durumda, rotor başlangıç konumuna geri döner. Ancak, yük, şebeke ve üretim koşullarında bir değişiklik olduğunda, rotor yeni bir güç açısına oturur. (Kundur, 1994) (Anderson & Fouad, 2003) (Nalbantoğlu, 2010) (Yazıcı, 2008)

ω_s hızı ile dönen bir senkron jeneratörün salınım eşitlikleri ve T_e elektriksel momentini üreten kayıpların ihmal edildiği kararlı durumda mekanik momentin elektriksel momente eşit olduğu aşağıdaki Eşitlik 2.5' de elde edilir.

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

Fakat bir bozucu giriş, jeneratörü T_a momenti ile kararlı durumdan çıkarsa, rotorun hızlanmasına ($T_m > T_e$) veya yavaşlamasına ($T_m < T_e$) neden olur.

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.6)$$

Jeneratör ve türbinin bileşke atalet momenti J , sönümlleme ve sürtünme momenti ihmal edildiğinde, dönen kütle için Newton'un ikinci kuralına göre Eşitlik 2.7 şu şekildedir.

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.7)$$

Açısal referans ω_{sm} mekanik senkron açısal hızı ile hareket eden θ_m senkron hızı referans alarak rotor hızını dikkate alınır, bu durumda statorun duran referans eksenine göre rotorun açısal konumu θ_m olarak ifade edilir.

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.8)$$

Burada δ_m senkron hızdaki referans çatıdan ölçülen $t = 0$ anında bozucu öncesi rotor pozisyonudur. Eşitlik 2.8' in türevi, rotorun açısal hızı Eşitlik 2.9' u verirken, ikinci türev ise rotor ivmesini Eşitlik 2.10' da gösterir.

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.9)$$

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.10)$$

Eşitlik 2.10' da atalet momenti J yerine koyulur ve ω_m ile çarpılırsa;

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

Güç cinsinden eşitlik, açısal hız ile moment çarpımının güce eşit olduğu varsayıldığı takdirde,

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_T - P_e \quad (2.12)$$

M karakteri, eylemsizlik sabiti olarak adlandırılan $J\omega_m$ büyüklüğü ile tanımlanır. Dönen bir kütlenin kinetik enerjisi ise ω_k 'nın tanımı Eşitlik 2.13' de aşağıdaki gibidir.

$$\omega_k = \frac{1}{2} J\omega_m^2 = \frac{1}{2} M\omega_m^2 \quad (2.13)$$

Yukarıdaki Eşitlik 2.13' de eylemsizlik sabiti M tek başına bırakıldığında, aşağıdaki Eşitlik 2.14 elde edilir:

$$M = \frac{2\omega_k}{\omega_m} \quad (2.14)$$

Eşitlik 2.14' de M eylemsizlik sabiti ile ifade edilmesine rağmen, rotor hızı senkron hızdan ayrılırsa M sabit olarak kabul edilmez. Fakat, kararlılık kaybolmadığı durumunda, ω_m çok büyük bir değişim göstermediği sürece M 'nin senkron hızda olduğu için sabit kabul edildiği aşağıdaki Eşitlik 2.15' de gösterilmiştir.

$$M = \frac{2w_k}{w_{sm}} \quad (2.15)$$

Eşitlik 2.15 eylemsizlik sabiti cinsinden salınımı aşağıda yazılmıştır.

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_T - P_e \quad (2.16)$$

Daha yaygın olarak, salınım eşitliği elektriksel güç açısı δ ile ifade edilir. Kutup sayısı p olan bir senkron jeneratörde ise, mekanik güç açısı δ_m ve elektriksel güç açısı δ ile ilişkilendirilir.

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad (2.17)$$

Ya da,

$$\omega = \frac{p}{2} \omega_m \quad (2.18)$$

Mekanik ve elektriksel hız arasındaki Eşitlik 2.17 ve 2.18' de yukarıda olduğu gibidir. Sönümlleme momenti ihmal edildiğinde, elektriksel güç açısı ile salınım Eşitliği 2.19 gibi tanımlanır.

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

Sistemdeki ve hızdaki değişime karşı yönde üretilen moment P_d ,

$$P_d = D \frac{d\delta}{dt} \text{ ve } D = \frac{2D_m}{p} \quad (2.20)$$

Güç sistem analizlerinde birim değerler kullanıldığı için salınım Eşitlik 2.20 genellikle birim değer olarak tanımlanır. Eşitlik, S_B baz gücüne bölünerek M yerine eşitlikteki denklem kullanıldığında, aşağıdaki Eşitlik 2.21 elde edilir.

$$\frac{2}{p} \frac{2\omega_k}{\omega_{sm} S_B} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_T}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} - \frac{P_d}{S_B} \quad (2.21)$$

Eşitlik 2.21 ω_k/S_B bağıntısında, H sabiti önemli bir büyüklük olarak bilinir.

$$H = \frac{\text{Nominal hızda MJ kinetik enerji}}{\text{MVA makina gücü}} = \frac{\omega_k}{S_B} \quad (2.22)$$

H sabiti birimi saniye olarak kabul edilir ve 1 sn ile 10 sn arasında jeneratörün boyutu ve tipine bağlı olarak değişebilir. H parametresi ile bağıntısı birim değer cinsinden düzenlendiğinde;

$$\frac{2}{p} \frac{2w_k}{w_{sm}S_B} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{T(pu)} - P_{e(pu)} - P_{d(pu)} \quad (2.23)$$

$P_{e(pu)}$, $P_{d(pu)}$ ve $P_{m(pu)}$ Sırasıyla birim değer cinsinden elektriksel, sönümlenme ve mekanik gücüdür. Eşitlik 2.23 mekanik v elektriksel açısal hız arasındaki denklige göre ($\omega_{sm} = \frac{2}{p} \omega_s$) salınım Eşitlik 2.24,

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{T(pu)} - P_{e(pu)} - P_{d(pu)} = P_{acc(pu)} \quad (2.24)$$

P_{acc} Net ivmelenme gücü olup, Eşitlik 2.25 aşağıdaki gibi yazılır:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d(d\delta/dt)}{dt} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} - D \frac{d\delta}{dt} \quad (2.25)$$

Rotor açısının zamana göre türevi senkron jeneratör hızına ilişkin eşitlikte alındığında,

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega = \omega - \omega_s \quad (2.26)$$

Bu Eşitlik 2.26 elektriksel radyan cinsinden rotor hız sapması ($\Delta\omega$) terimini yerine yazıldığında,

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\delta}{dt} = P_{T(pu)} - P_{e(pu)} - D\Delta\omega_{(pu)} \quad (2.27)$$

Hız sapmasının birim değer olarak ifade edildiği salınımda ω_s baz hız olarak kabul edildiğinde,

$$\frac{d\Delta\omega_{(pu)}}{dt} = \frac{1}{2H} (P_{T(pu)} - P_{e(pu)} - P_{D(pu)}) \quad (2.28)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \omega_s \Delta\omega_{(pu)} \quad (2.29)$$

Bu model, doğrusallaştırma ve geçici hal kararlılığı analizini ifade etmek amacıyla kullanılır. Salınım eşitliği modeli olarak da bilinen bu model, senkron jeneratörün farklı seviyelerdeki modellerini ortaya çıkarır. Bu modelde, makinenin elektriksel güç veya moment belirleme yaklaşımı esas alınır.

2.1.3 Gerilim Kararlılığı

Gerilim kararlılığı, başlangıç çalışma durumundaki gerilim kararlılığı olarak tanımlanır. Arıza sonrasında tüm baralarda kabul edilebilir voltajları sabit tutması beklenir. Bu, sistemin jeneratör ve yük arasında denge sağlayabilmesine dayanır. Yük talebindeki artış, kontrolsüz voltaj düşüşlerine neden olabilir. Eşit olmayan yük sağlandığında voltaj dengesizliği meydana gelebilir. Gerilim kararlılığı, küçük bozucu ve büyük bozucu gerilim kararlılığı olarak iki alt sınıflandırmada ele alınır. Bir güç sistemi küçük kararsızlıklara maruz kaldığında, ana gerilimleri kararlı veya sabit değerlere yakınsa, o sistemin küçük bozucu gerilimi kararlıdır. Büyük kararsızlıklara maruz kaldığında bir güç sistemi, ana gerilimleri kararlı veya sabit değerlere yakınsa, o sistemin büyük bozucu gerilimi kararlıdır. (Zubaydi, 2012) (IEEE 1110, 2002)

Gerilim kararlılığını etkileyen faktörler arasında yüksek endüktanslı şebekelerdeki aktif ve reaktif enerji transferi, jeneratörün reaktif güç ve gerilim kontrolü kapasitesi, indirme istasyonu trafo kademe değişim ayarları ve dağıtım sistemi gerilim regülatörleri, şebekeye bağlı yüklerin karakteristikleri ve reaktif güç kompanzasyon cihazı özellikleri önemlidir. Bara geriliminin genliğinin artması için her baraya giren reaktif gücün artması gereklidir ve bu durumda gerilim-reaktif güç hassasiyeti pozitif olur. Ancak, bir bara için gerilim-reaktif güç hassasiyeti negatifse, gerilim kararsızlığı oluşabilir. Reaktif güç talebinin karşılanamaması, gerilim kararsızlığının temel nedenlerinden biridir. (Machowski vd., 1997) (Kundur, 1994)

2.1.4 Frekans Kararlılığı

Frekans kararlılığı, sistemdeki güç ve yük arasındaki dengeyi koruma kabiliyetidir. Genellikle ani bir üretim kaybından sonra belirlenir ve frekans kontrolüyle düzeltilir. Kısa ve uzun dönem olmak üzere iki kategoride incelenir. Kısa dönemde, koruma cihazları ve jeneratör kontrolleri etkilidir; uzun dönemde ise türbin gibi faktörler önemlidir. Kontrol ekipmanlarının koordinasyonu ve yetersiz üretim rezervleri frekans kararlılığını etkileyen faktörlerdendir. (Kocarslan ve Çam, 2005)

2.1.5 Rezonans Kararlılığı

Rezonans, enerji alışverişi periyodik olarak salınımlı bir ortamda gerçekleştiğinde oluşur. Bu salınımlar, akış yolunda enerjinin yetersiz dağılımı durumunda büyür ve (elektriksel olarak) güç sistemlerinde gerilim/akım/tork büyüklüklerinin artmasına neden olabilir. Bu büyüklükler belirlenen eşikleri aştığında, rezonans kararsızlığının meydana geldiği söylenir. Rezonans kararlılığı terimi, eş zamanlı olmayan rezonansı (SSR) içerir. SSR, elektriksel veya elektromekanik bir rezonansla ilişkili olabilir. SSR'nin iki olası biçimde ortaya çıkabileceği belirtilmiştir: (i) seri kompanzasyonlu hat(lar) ile türbin-jeneratör arasında mekanik şaftta seri telafisi ve mekanik burulma frekansları arasındaki rezonans nedeniyle ve (ii) seri kompanzasyonlu hat(lar) ile jeneratör arasında elektriksel özellikler arasındaki rezonans nedeniyle. Bu iki kategori, burulma rezonansı ve tamamen elektriksel bir rezonans olarak belirtilmiştir. (Hatziargyriou vd., 2021)

2.1.6 Dönüştürücü Kaynaklı Kararlılık

Elektrik güç sistemlerinde, kontrol sistemlerinin elektromekanik dinamiklerle ve ağ geçişleriyle etkileşimi, geniş bir frekans aralığında kararsızlığa neden olabilir. Bu etkileşimler, yavaş ve hızlı etkileşimler olarak sınıflandırılabilir. Yavaş etkileşimler, göreceli olarak düşük frekansta gözlemlenen kararsızlık fenomenlerini içerirken, hızlı etkileşimler göreceli olarak yüksek frekanslarda gözlemlenen fenomenleri kapsar. Hızlı etkileşimler genellikle güç elektroniği tabanlı sistemlerin kontrol sistemlerinin hızlı dinamik etkileşimlerini içerir ve yüksek frekanslı salınımlara neden olabilir. Öte yandan, yavaş etkileşimler genellikle güç elektroniği tabanlı cihazların kontrol sistemlerinin, senkron jeneratörlerin elektromekanik dinamikleri ve bazı jeneratör kontrolcülerini gibi daha yavaş tepki süreli bileşenlerle etkileşiminden kaynaklanan kararsızlıkları içerir. Bu kararsızlık türleri, voltaj kararlılığına benzer olabilir, ancak mekanizmaları farklıdır; voltaj kararsızlığı yükler tarafından sürüklense de dönüştürücü kaynaklı kararsızlık güç elektroniği dönüştürücü kontrolcülerıyla ilişkilidir. (Hatziargyriou vd., 2021)

3. SENKRON MAKİNA

Senkron jeneratörler, genellikle büyük yapıya ve yüksek güç üretim kapasitesine sahiptirler. Diğer endüksiyon makinelerine kıyasla üretim maliyetleri daha yüksek olsa da büyük güçlerde yüksek verimlilik sağlarlar. Bu jeneratörler, rotor ve stator olmak üzere ana iki manyetik parçadan oluşur. Stator, içinde armatür sargılarını barındırır ve genellikle manyetik çelikten imal edilir. Güç sağlayan armatür sargısı, üç aynı faz sargısının statorun iç yüzeyinde eşit aralıklarla yerleştirilmesiyle oluşur.

Rotorda bulunan uyarma sargısı, doğru akım ile beslendiğinde, statordaki üç fazlı endüvi sargılarında rotorun manyetik alanı alternatif gerilim oluşturur. Diğer senkron jeneratörlerin stator devreleriyle bağlandığında ise, tüm jeneratörlerin rotorlarının bu frekansla senkronize olmasını gerektirir. Ayrıca, stator akımları ve gerilimlerinin aynı frekansa sahip olması, sistemin düzgün çalışması için önemlidir.

Senkron makineler, rotoru küçük güçlerde sabit mıknatıslı veya elektromıknatıslı, statoru ise üç veya bir fazlı alternatif akım sargılardan oluşan genelleştirilmiş makine türüdür. Bu makineler, motor ve jeneratör olarak çalıştırılabilirler. Jeneratör olarak çalıştırıldıklarında, makinenin rotoru, tahrik edilmesi senkron devir sayısı ile olur, bu da stator çevresinde sabit bir hız olan senkron hız (n_s) ile belirtilir.

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

Eşitlik 3.1’ de p , makinenin kutup sayısını, f ise stator akımlarının frekansını gösterir.

Senkron makineler, sabit dönüş hızları nedeniyle motor çalışma alanları açısından sınırlıdır ve genellikle elektrik enerjisi elde edilmesinde kullanılır. Güçleri birkaç VA ile 1700 MVA arasında değişir ve yaygın gerilim değerleri 6 kV, 15 kV, 20 kV ve 27 kV’dir. Güç arttıkça maliyetler düşer ve verimler artar. Büyük güçlü bir makinenin kontrolü ve bakımı genellikle kolay olduğundan, bu durum sistem işletim güvenilirliğini artırır. Senkron jeneratörler genellikle çıkık ve yuvarlak kutuplu olmak üzere iki türdedir.

Çıkık kutuplu senkron jeneratörler:

Senkron hızları düşüktür ve kutup sayıları yüksektir. Eksenel boyutları küçük, rotor çapları ise geniştir. Bu, senkron hızların düşük olmasından kaynaklanır. Genellikle su

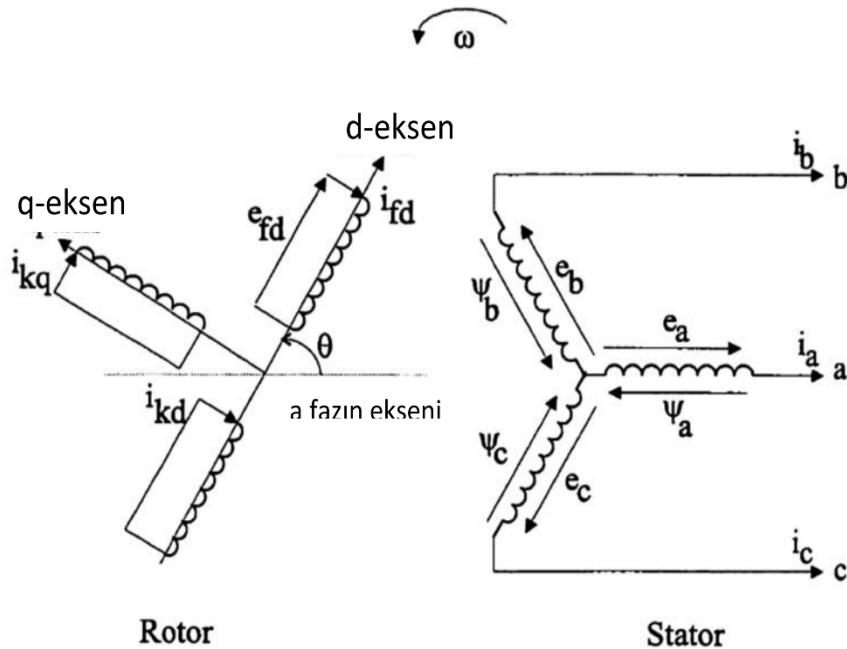
türbinleriyle döndürülürler ve hidroelektrik santrallerinde kullanılırlar. (Nalbantoğlu, 2010) (Pal ve Chaudhuri, 2003)

Yuvarlak kutuplu jeneratörler (turbojeneratörler):

Rotor ve stator sargılarından oluşan yuvarlak kutuplu jeneratörlerde, rotor dönerken stator sabit kalır. Senkron dönme hızları yüksek olup, güçleri çıkık kutuplu jeneratörlere göre daha fazladır. Rotorlar küçük çaplı ve uzun boyludur, bu nedenle yüksek hızlara ulaşabilirler. Turbojeneratörlerde rotor sargıları genellikle gümüşlü bakır alaşımdan yapılır, stator çekirdeği ise düşük kayıplı özel silisyumlu saçlardan oluşur. Bu jeneratörler, buhar türbinleri veya gazla çalışan turbojeneratörlerde kullanılır ve içlerinde dolaşan gaz veya basınçlı hava ile soğutulurlar. (Pal ve Chaudhuri, 2003) (Yazıcı, 2008)

3.1.Senkron Makinenin Dinamik Modellenmesi

Senkron makinelerin modellemesinde, rotor uyarma sargısına ilave bir veya iki sönüm sargısı içeren d_q ksenlerinde senkron makinenin ideal yapısı tercih edilir. (Machowski vd., 1997) (Yazıcı, 2008) (Krause vd., 1995)



Şekil 3.1. Senkron makine rotor ve stator devreleri

Rotor ve stator sargılarının gerilim eşitlikleri belirli kabuller yapıldıktan sonra ifade edilir. (Nalbantoğlu, 2010) (Krause vd., 1995) (Machowski vd., 1997) (Padiyar, 2004) (Kyriakides ve Heydt, 2004) Tüm sargı kapasiteleri ihmal edilebilir, üç faz sargıları simetriktir, dağıtılmış sargılar yoğunlaştırılmış bir sargı ile temsil edilebilir, histerisiz kayıplar ihmal edilir, Ancak, girdap akımı kayıpları damper sargılarının modeline dahil edilebilir; rotorun konumundan dolayı stator endüktansındaki değişim sinüzoidal olup yüksek harmonikler içermez; geçici hal ve öncesi durumlarında rotor hızı senkron hıza yakındır; manyetik devreler doğrusaldır ve endüktans değerleri akımdan bağımsızdır. Bu koşullar altında, rotor ve stator sargılarının gerilim eşitlikleri aşağıdaki Eşitlik 3.2’ de gösterilmiştir.

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

Eşitlikte yer alan büyüklüklerin açılımları aşağıda ifade edilmiştir.

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

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

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

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

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

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

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

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

Rotor ve stator sargılarının akı bileşenlerinin denklemleri aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\Lambda_s = L_{ss} i_s + L_{sr} i_r \quad (3.11)$$

$$\Lambda_r = [L_{sr}]^t i_s + L_{rr} i_r \quad \text{Wb.sarım} \quad (3.12)$$

L_{ss} , L_{rr} , L_{sr} endüktansları matris formu şeklinde ele alınırsa,

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\theta_r & -1/2 L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \pi/3) & -1/2 L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \pi/3) \\ -1/2 L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \pi/3) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - 2\pi/3) & -1/2 L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \pi) \\ -1/2 L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \pi/3) & -1/2 L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lf} + L_{mf} & L_{fkd} & 0 & 0 \\ L_{kdf} & L_{lkd} + L_{mkd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lg} + L_{mg} & L_{gkd} \\ 0 & 0 & L_{kdg} & L_{lkq} + L_{mkq} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{sf} \sin \theta_r & L_{skd} \sin \theta_r & L_{sq} \cos \theta_r & L_{skq} \cos \theta_r \\ L_{sf} \sin(\theta_r - 2\pi/3) & L_{skd} \sin(\theta_r - 2\pi/3) & L_{sq} \cos(\theta_r - 2\pi/3) & L_{skq} \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ L_{sf} \sin(\theta_r + 2\pi/3) & L_{skd} \sin(\theta_r + 2\pi/3) & L_{sq} \cos(\theta_r + 2\pi/3) & L_{skq} \cos(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Matrisler elde edilir ve bu eşitliklerden L_{ss} ve L_{sr} endüktansları rotor açısının bir fonksiyonu olarak görülür. L_{ss} ve L_{sr} elemanlarının büyüklük değerleri rotor hız oranına bağlı olarak değişir. Zamana bağlı katsayıların hesaplanması zor olabilir. Fakat her bir faza ait büyüklüklerin çözümüyle bu zorluk aşılabılır. Zamanla değişen endüktans matrislerinin tersi, her bir zaman dilimi için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Bu hesaplama sürekli bir zaman kaybına yol açabilir ve sayısal çözümde problemlere sebep olabilir. (Machowski vd., 1997) (Yazıcı, 2008) (Krause vd., 1995) (Demiroren ve Zeynelgil, 2004) (Sauer ve Pai, 1998)

3.2. Senkron Makine Modelinin Basitleştirilmesi

Park dönüşüm matrisi, senkron makinenin matematiksel modellemesinde önemli bir rol oynar. Bu matris, makine değişkenlerini dönüştürerek analizi basitleştirir. Faz dengesizlikleri ve senkron hızda çalışma gibi performans özelliklerini hesaplamayı kolaylaştırır.

3.3. Park Dönüşüm Matrisi

Sürekli hal şartlarında, zamana bağlı olarak değişen stator niceliklerinden (akım, akı bağı ve gerilim), d-q eksen niceliklerine dönüştürülerek park dönüşüm matrisiyle senkron makine modeli oluşturulmuştur. (Eke, 2011)

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

d-q eksen büyüklüklerinin karşılıklı dönüşümü için dönüşüm matrisi kullanılarak faz büyüklükleri elde edilir.

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

$$\lambda_{0dq} = P \lambda_{abc} \quad (3.17)$$

Eşitlik 3.16' da ters dönüşümü var ise eşitlik dönüşümü şu şekilde yazılabilir:

$$i_{abc} = P^{-1} i_{0dq} \quad (3.18)$$

Dönüşüm matrisinin tersi, rotor çatı dq0 ekseninden abc referans çatı fazına dönüşümü sağlar.

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

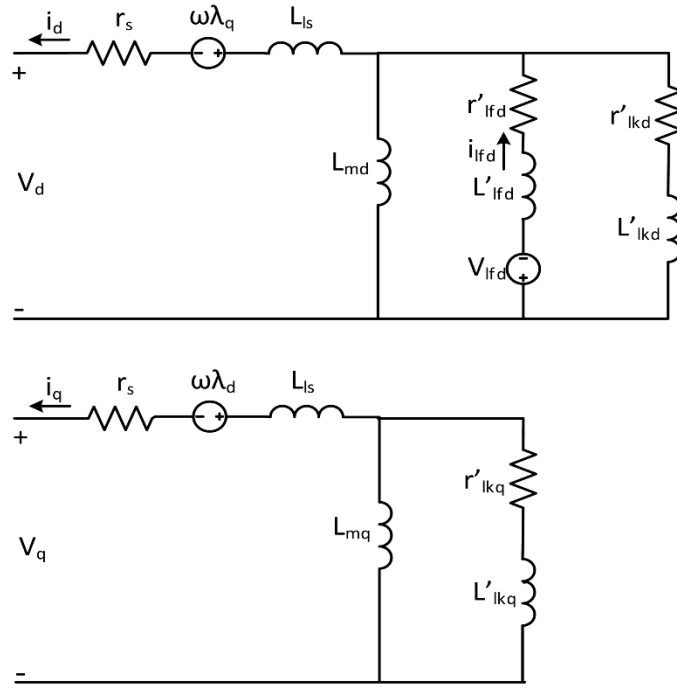
Gerçek faz değişkenleri cinsinden, senkron jeneratör için toplam anlık güç;

$$P_{abc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (3.20)$$

d – q bileşenleri cinsinden ele alırsak,

$$P_{dq0} = P_{abc} = \frac{3}{2} (v_q i_q + v_d i_d + 2v_0 i_0) \quad (3.21)$$

Eşitlik 3.22' de güç korunumu devam edebilmesi için dönüşüm sonrası 3/2 katsayısı için ilave edilmiştir.



Şekil 3.2. Senkron jeneratör d-q eksenli eşdeğer devreleri

3.4. Rotor Referans Çevre Dönüşümü

İdeal makine yapısında rotor sargıları Şekil 3.2' de gösterildiği gibi dq eksenleri üzerinde yer almaktadır.

Stator sargılarına denklemde verilen Park dönüşümünün uygulanması yeterli olup, dq dönüşümü stator gerilim, akım ve akı eşitlikleri ele alınırsa; (Krause vd., 1995) (Pal ve Chaudhuri, 2003) (Padiyar, 2004) (Kundur, 1994)

$$V_{qd0} = T_{qd0\theta(r)} V_s \quad (3.22)$$

$$V_{qd0} = [V_q \ V_d \ V_0]^t \quad (3.23)$$

$$i_{qd0} = T_{qd0\theta(r)} i_s \quad (3.24)$$

$$i_{qd0} = [i_q \ i_d \ i_0]^t \quad (3.25)$$

$$\Lambda_{qd0} = T_{qd0\theta(r)} \Lambda_s \quad (3.26)$$

$$\Lambda_{qd0} = [\lambda_q \ \lambda_d \ \lambda_0]^t \quad (3.27)$$

Stator sargı gerilimine Park dönüşümü denklemi uygulanırsa,

$$V_{qd0} = -T_{qd0}r_sT_{qd0}^{-1}i_{qd0} + T_{qd0}\left[\frac{d}{dt}T_{qd0}^{-1}i_{qd0}\right]\Lambda_{qd0} \quad (3.28)$$

Denklemi elde edilir ve stator sargı dirençleri eşit ise, $r_a = r_b = r_c = r_s$, denkleminin yeniden ilk terimi düzenlenir ve Eşitlik 3.29 uygulanırsa.

$$T_{qd0}r_sT_{qd0}^{-1}i_{qd0} = r_s i_{qd0} \quad (3.29)$$

Denklemin ikinci terimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

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

Trigonometrik ifadelerin eşitlikte düzenlenmesi ile

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

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

Eşitlikler 3.32 ve 3.33 elde edilir ve 3.29 gibi son terimi düzenlenirse,

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

Eşitliklerini rotor referans çevresine dönüşümü ile senkron jeneratör stator gerilimi;

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

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

Senkron makinenin rotor referans çevresine eşitliklerden sonra elde edilen indirgenmiş sargı eşitlikleri;

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

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

$$V_0 = -r_s i_0 + \frac{d\lambda_0}{dt} \quad (3.38)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

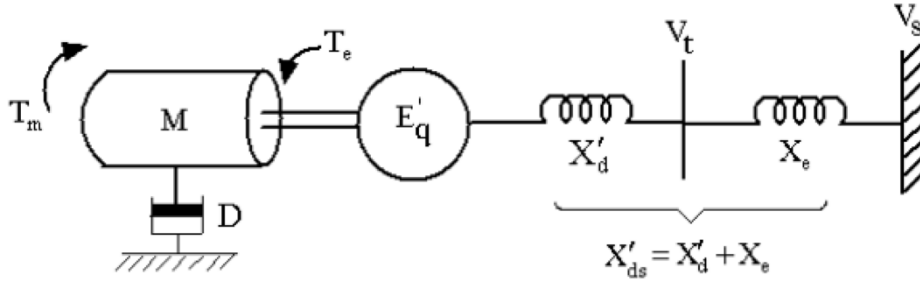
$$L_d = L_{md} + L_{ls}, L_q = L_{mq} + L_{ls} \quad (3.48)$$

3.5. Tek Makine Sonsuz Güçlü Bara Sistemi

Rotor açısının zamanla değişiminin incelenmesi ve salınım denklemlerinin çözülmesi için, bir senkron makinenin senkronizma durumunu belirlemek için önemlidir. Bu süreç, makinenin doğru frekansta ve fazda çalışıp çalışmadığını, yani şebekeyle senkronize olup olmadığını belirlemek için kullanılır.

3.5.1 Salınımların Klasik Model Aracılığı ile İncelenmesi

Şaft üzerindeki elektriksel ve mekanik momentler sonsuz baraya bağlı bir senkron makinede şu şekilde gösterilir: T_e (elektriksel moment) ve T_m (mekanik moment). Aşağıdaki Şekil 3.3’ de gösterilmiştir. Eşitlikler 3.50 ve 3.51 ele alınırsa,



Şekil 3.3. Senkron makine modeli

Şekil 3.3’ de X_e reaktansı üzerinden sonsuz baraya bağlı senkron jeneratör

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

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

δ_0 ’ın küçük değişimlerinde denklemindeki doğrusallaştırılmış hali aşağıda Eşitlik 3.51 ile gösterilmiştir. Denklemden gösterilen $\Delta \delta$ ’nın sabiti “senkronlama moment katsayısı” olarak tanımlanır. (Rogers, 2000) (Machowski vd., 1997) (Demiroren ve Zeynelgil, 2004) (Eke, 2011)

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

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

Eşitlik 2.29 kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edebiliriz: Güç, hız ve momentle ilgili terimler birim değer olarak Eşitlik 3.54 ve 3.55 ile tanımlanır.

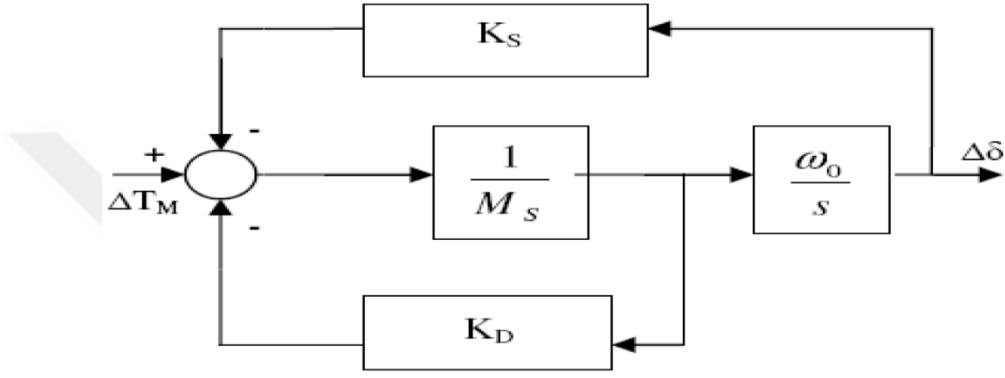
$$\frac{d \Delta \omega}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - K_s \Delta \delta - K_D \Delta \omega) \quad (3.53)$$

$$\frac{d \Delta \delta}{dt} = \omega_s \Delta \omega \quad (3.54)$$

K_S ve K_D sırasıyla senkronizasyon ve sönümlleme momenti katsayılarını ifade eder. Eşitlik 3.56 uzay matrisi formunda düzenlendiğinde:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_S}{2H} \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (3.55)$$

Sisteme bir bozucu etki uygulandığında ($\Delta T_m \neq 0$) mekanik moment değişimi (ΔT_m) ile açısal hız değişimi ($\Delta\omega K_D$) ve yük açısı değişimi ($\Delta\delta K_S$) arasında iki farklı zıt moment oluşur.



Şekil 3.4. Senkronizasyon ve sönümlleme momenti etkisi

Enerji dönüşümünde ters bir moment olan senkronlama momenti, yani mekanik girişi elektrik enerjisine dönüştüren bir bileşendir. Bu, makinenin senkronizasyonunu sürdürmek için önemlidir. Yeterli bir senkronlama momenti olmadığında, mekanik giriş şaftının hızlanmaya devam etmesi ve makinenin senkronizasyonunu kaybetmesi mümkündür. Bu nedenle, kararlılık için senkronlama momentinin önemi büyüktür. (Nalbantoğlu, 2010)

Sönümlleme momenti ise, enerji kaybı ve rotor salınımlarının zamanla azalması için gereklidir. Mekanik şaft sistemindeki sönümlleme momenti, aşağıdaki denklemde gösterilir. (Kundur, 1994) (Padiyar, 2004) (Pal ve Chaudhuri, 2003) (Demiroren ve Zeynelgil, 2004) (Sauer ve Pai, 1998)

$$\Delta T_D = K_D \Delta\omega \quad (3.56)$$

Şekil 3.4 blok diyagramı eşilik olarak ifade edilirse,

$$\Delta\delta = \frac{\omega_s}{s} \left[\frac{1}{2Hs} (-K_S \Delta\delta - K_D \Delta\omega + \Delta T_m) \right] \quad (3.57)$$

$$\Delta\delta = \frac{\omega_s}{s} \left[\frac{1}{2Hs} (-K_s\Delta\delta - K_D s \frac{\Delta\delta}{\omega_s} + \Delta T_m) \right] \quad (3.58)$$

Eşitlik düzenlenir ise,

$$s^2(\Delta\delta) + \frac{K_D}{2H} s(\Delta\delta) + \frac{K_s}{2H} \omega_s(\Delta\delta) = \frac{\omega_s}{2H} \Delta T_m \quad (3.59)$$

Böyle bir eşitlik karakteristik olarak aşağıdaki gibi bulunur:

$$s^2 + \frac{K_D s}{2H} + \frac{K_s \omega_s}{2H} = 0 \quad (3.60)$$

Genel forma sahip eşitlik $s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2 = 0$ şeklindedir. Sönümlenmemiş doğal frekans,

$$\omega_n = \sqrt{K_s \frac{\omega_0}{2H}} \quad (3.61)$$

Sönümlleme oranı ise,

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{K_D}{2H\omega_n} \quad (3.62)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{2HK_s\omega_s}} \quad (3.63)$$

Senkronlama momenti katsayısı (K_s) arttıkça doğal frekans artar, ancak sönümlleme oranı düşer. Sönümlleme momenti katsayısı (K_D) arttıkça sönümlleme oranı artar, ancak eylemsizlik sabitindeki bir artış ω_n ve ξ 'in her ikisinin de azalmasına neden olur.

Her iki momentin varlığı, bir senkron jeneratöründe sistem kararlılığını sağlar. Zayıf sönümlleme momenti, salınımda kararsızlığa yol açabilirken, zayıf senkronlama momenti rotor açısında periyodik olmayan kaymalara neden olabilir. (Yazıcı, 2008) (Nalbantoğlu, 2010) (Kundur, 1994) (Eke, 2011)

3.5.2 Senkron Jeneratörün Basitleştirilmiş Modeli

Senkron jeneratörlerin matematiksel modellerinin basitleştirilmesi, çeşitli çalışmalarla araştırılmış ve farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. En sık kullanılan modellerden biri, üçüncü derece model olarak tanımlanan rotorun mekanik dinamiklerine uyarma dinamiklerinin eklenmesiyle oluşturulmuştur.

Basitleştirmenin seviyesini belirleyen kabul ve ihmaller genellikle şu şekilde sıralanır: Sönümlleme (Damper) sargılarının ihmal edilmesi; Hız değişiminin stator gerilimi üzerindeki etkisinin ihmal edilmesi ve jeneratörün açısal hızının değişmediğinin kabul edilmesi; Stator akı değişiminin ihmal edilmesi; Bozucu durumda akının sabit kaldığının kabul edilmesi ve sabit akı bağı modelinin kullanılması; Subtransient devrelerin etkilerinin ihmal edilmesi ve sabit akı bağı modelinin kullanılmasıdır. (Padiyar, 2004) (Kundur, 1994) (Demiroren ve Zeynelgil, 2004) (Eke, 2011)

Stator EMK' ların birim değere sahip olduğu kabul edilerek, rotor büyüklükleriyle ilişkilendirilen gerilim ve akı eşitlikleri kullanılarak üçüncü derece modelin elektriksel dinamik eşitliği elde edilir. (Nalbantoğlu, 2010) (Yazıcı, 2008)

$$T'_{d0}\dot{E}_q = E_{fd} - E_q \quad (3.64)$$

$$E_q = E'_q + (x_d - x'_d)I_d \quad (3.65)$$

$$I_q = \frac{V_\infty \sin \delta}{X_e + X_q} \quad (3.66)$$

$$I_d = \frac{E_q - V_\infty \cos \delta}{X_e + X_d} \quad (3.67)$$

$$T_e = E_q I_q + (X_q - X_d) I_d I_q \quad (3.68)$$

$$V_t = \sqrt{(E_q - x_d I_d)^2 + (x_q I_q)^2} \quad (3.69)$$

Uyarma devresinin dinamikleri, uyarma tipi ve kabullerle birlikte değişir. Mekanik dinamikler, senkron jeneratör için tanımlanan denklemle ifade edilir.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - D \cdot \Delta\omega) \quad (3.70)$$

$$\dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega \quad (3.71)$$

V_∞ olarak tanımlanan sonsuz güçlü bara gerilimi, iletim hattı direncinin ($r_e \approx 0$) rotor referans çevresinde ihmal ettiğimizde;

$$V_{q\infty} = E'_q - (x'_d + x_e) \dot{I}_d \quad (3.72)$$

$$V_{d\infty} = (x_d + x_e) \dot{I}_d \quad (3.73)$$

Olarak yazıldığında, Eşitlik 3.73 ve 3.74 V_∞ ve yük açısı δ cinsinden aşağıdaki gibi ele alınırsa,

$$V_{q\infty} - jV_{d\infty} = V_\infty e^{-j\delta} = V_\infty (\cos \delta - j \sin \delta) \quad (3.74)$$

Eşitlik 3.73 ve 3.74 iq ve id için çözümü ile,

$$i_q = \frac{V_\infty \sin \delta}{X_e + X_q} \quad (3.75)$$

$$i_d = \frac{E_q' - V_\infty \cos \delta}{X_e + X_d'} \quad (3.76)$$

Sonsuz bara gerilimi V_∞ sabit olarak kabul edilirse, küçük değişimler için çalışma noktasındaki Eşitlik 3.76 ve 3.77 düzenlenirse,

$$\Delta i_q = \frac{V_\infty \cos \delta_0 \Delta \delta}{X_e + X_q} \quad (3.77)$$

$$\Delta i_d = \frac{\Delta E_q'}{X_e + X_d'} - \frac{V_\infty \sin \delta_0 \Delta \delta}{X_e + X_d'} \quad (3.78)$$

Eşitliği küçük değişimlere göre düzenlenirse,

$$\Delta T_e = E_{q0} \Delta i_q + i_{q0} \{ \Delta E_q' + (x_q - x_d') \Delta i_d \} \quad (3.79)$$

Yukarıda belirtilen eşitlik 3.78 ve 3.79, bu denklemde yerine yazılıp $\Delta \delta$ ve $\Delta E_q'$ için iki ayrı gruba ayrılırsa

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E_q' \quad (3.80)$$

$$K_1 = \frac{E_{q0} V_\infty \cos \delta_0}{X_e + X_q} + \frac{x_q - x_d'}{X_e + X_d'} i_{q0} V_\infty \sin \delta \quad (3.81)$$

$$K_2 = \frac{V_\infty \sin \delta_0}{X_e + X_d'} \quad (3.82)$$

Eşitlikte küçük değişimler için düzenleme yapılırsa,

$$T'_{d0} \frac{d\Delta E_q'}{dt} = \Delta E_{fd} - \Delta E_q' - (x_d - x_d') \Delta i_d \quad (3.83)$$

Eşitlik 3.79 Δi_d ifadesine göre düzenlenirse,

$$T'_{d0} \frac{d\Delta E_q'}{dt} + \frac{\Delta E_q'}{K_3} = \Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta \quad (3.84)$$

$$K_3 = \frac{X_e + X_d'}{X_e + X_d} \quad (3.85)$$

$$K_4 = \frac{x_d - x_d'}{x_e + x_d'} V_\infty \sin \delta_0 \quad (3.86)$$

Stator eşitliklerini ele aldığımızda,

$$v_q = w_r \lambda_d = w_r (L_{md} i_f' - L_d i_d) \quad (3.87)$$

$$v_q = E_q' - x_d' i_d \quad (3.88)$$

$$v_d = -w_r \lambda_q = -w_r (L_q i_q) \quad (3.89)$$

$$v_d = x_q i_q \quad (3.90)$$

$$V_t^2 = v_q^2 + v_d^2 \quad (3.91)$$

Eşitlik 3.92 küçük değişimlerle birlikte eşitliği,

$$2V_t \Delta V_t = 2V_{q0} \Delta V_q + 2V_{d0} \Delta V_d \quad (3.92)$$

Şeklinde yazıldığında, Eşitlik 3.88-3.93 $E_q' = v_q + x_d' i_d$ ve $v_d = x_q i_q$ eşitlikleri düzenlendiğinde,

$$\Delta V_t = \frac{V_{q0}}{V_t} (\Delta E_q' - x_d' \Delta i_d) + \frac{V_{d0}}{V_t} x_q \Delta i_q \quad (3.93)$$

Eşitlik 3.78 ve 3.79 verilen ifadeleri Eşitlik 3.80' de Δi_q ve Δi_d yerine yazıldığındaki ifade $\Delta \delta$ ve $\Delta E_q'$ için düzenlendiği takdirde jeneratör uç gerilimi,

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E_q' \quad (3.94)$$

İfadesi elde edilmiş olur. Eşitlik 3.95, aşağıdaki 3.96 ve 3.97 olarak tanımlanır.

$$K_5 = \frac{x_q}{x_e + x_q} \frac{V_{d0}}{V_t} V_\infty \cos \delta_0 - \frac{x_d'}{x_e + x_d'} \frac{V_{q0}}{V_t} V_\infty \sin \delta_0 \quad (3.95)$$

$$K_6 = \frac{x_q}{x_e + x_d'} \frac{V_{q0}}{V_t} \quad (3.96)$$

Heffron-Phillips modeline göre oluşturulan doğrusallaştırılmış senkron jeneratör denklemleri, sistem kararlılığı üzerindeki etkiyi incelemek için kullanılan K1 - K6 sabitlerini içerir. Bu sabitler, güç sistem değişkenlerine bağlı olarak belirlenir. (Padiyar, 2004) (Demiroren ve Zeynelgil, 2004) (Mello ve Charles, 1969) (Sherbiny ve Mehta, 1973)

K1: Senkronlama moment katsayısı, denklemde gösterilir. Belirli bir çalışma durumuna bağlı olarak, relüktans (manyetik direnç) moment bileşeni de özel durumda mevcut olabilir. Bu tork açısı, elektrik torkunu etkiler.

K2: Elektriksel moment değişimi ile alan akımı değişimi arasındaki ilişkiyi belirten sabit, denklemde gösterilmiştir. Bu sabit, belirli bir çalışma durumuna bağlı olarak değişir ve dahili gerilimin elektrik torku üzerindeki etkisini temsil eder.

K3: Empedans faktörü parametresi, yüklü durumlarındaki alan akı değişimi, bozucu etki ve alan zaman sabiti arasındaki ilişkiyi belirler. Bu parametreler, alan akı değişiminin hızını belirlediği için çalışma durumundan bağımsızdır ancak senkron makineler için önemli değişkenlerdir. Bu sabitler, alan sargısının etkisini temsil eder.

K4: Alan akı değişimi ve yük açısı değişimi arasındaki bağlantıyı sağlayan önemli bir katsayıdır. Armatür reaksiyonunun demanyetizasyon etkisini senkron makinelerde ifade eder. Ayrıca, tork açısının alan voltajı üzerindeki etkisini temsil eder.

K5: Terminal geriliminin yük açısındaki değişimine karşılık veren katsayıdır. Tork açısının terminal voltajı üzerindeki etkisini temsil eder.

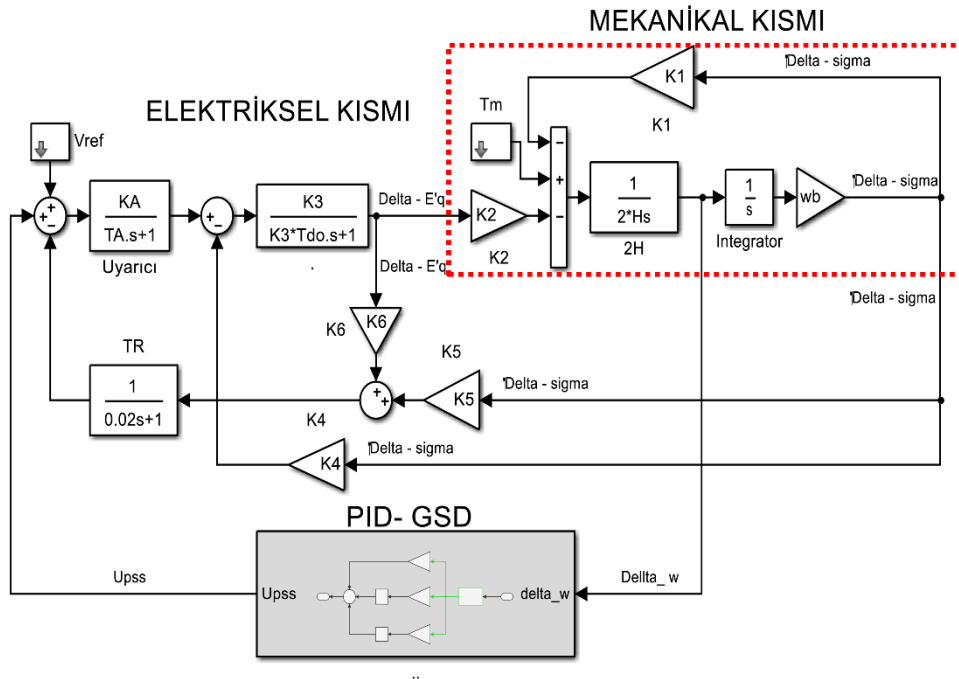
K6: Sabit rotor açısı içindeki değişkenliğe karşılık terminal gerilimindeki değişimini veren katsayı parametresidir. Dahili voltajın birinci terminal üzerindeki etkisini temsil eder.

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_b \Delta \omega \quad (3.97)$$

$$\Delta \dot{\omega} = -\frac{K_1}{M} \Delta \delta - \frac{D}{M} \Delta \omega - \frac{K_2}{M} \Delta e'_q \quad (3.98)$$

$$\Delta \dot{e}'_q = -\frac{K_4}{T_{do'}} \Delta \delta - \frac{1}{T_{do'}} \Delta e'_q + \frac{1}{T_{do'}} \Delta E_{FD} \quad (3.99)$$

$$\Delta \dot{E}_{FD} = -\frac{K_A K_5}{T_A} \Delta \delta - \frac{K_A K_6}{T_A} \Delta e'_q - \frac{1}{T_A} \Delta E_{FD} + \frac{K}{T_A} U_{PSS} \quad (3.100)$$



Şekil 3.5. GSD içeren TMSGB modeli

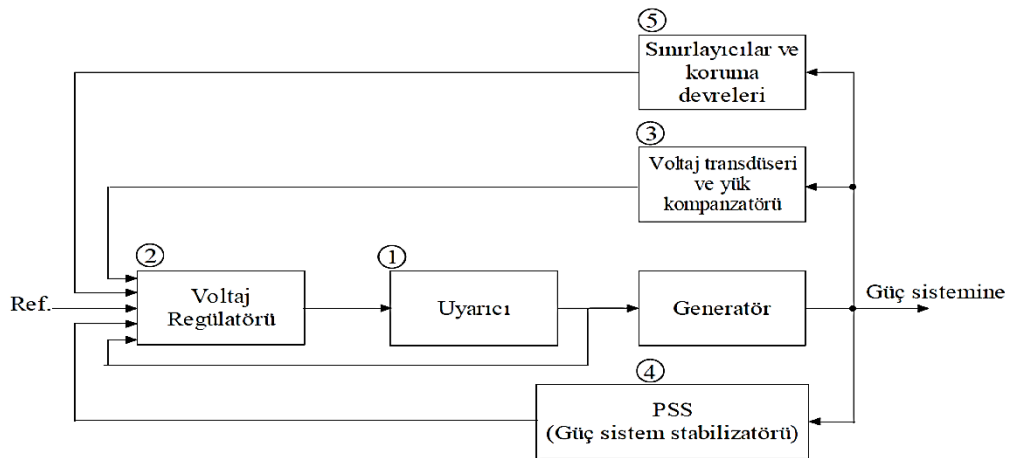
Şekil 3.5’ deki TMSBG sisteminin durum uzay matrisinin uyarım sistemi ve GSD ilave edilmiş hali Eşitlik 3.102’ deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{e}'_q \\ \Delta\dot{E}_{FD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ K_1/M & D/M & K_2/M & 0 \\ -K_4/T_{d0}' & 0 & -K_3/T_{d0}' & 1/T_{d0}' \\ -K_A K_5/T_A & 0 & -K_A K_6/T_A & -1/T_A \end{bmatrix} \quad (3.102)$$

3.6. Senkron Jeneratör Uyarım Sistemleri

Uyarım sistemlerinin güç sistemlerinin kararlılığını sağlamadaki rolü büyüktür. Ancak otomatik gerilim regülatörlü sistemlerin etkisi sınırlıdır ve bazı durumlarda güç sisteminin kararlılığını etkileyebilir. (Rogers, 2000) (Padiyar, 2004) Uyarım sistemlerinin tam anlamıyla işlevselliğini sağlamak için aşağıdaki performans kriterlerinin sağlanması önemlidir. (Kundur, 1994) (Machowski vd., 1997) (Demiroren ve Zeynelgil, 2004)

- Sistem tepkisi, güç sisteminin kararlılığı için yeterli olmalıdır.
- Koruma ve sınırlama fonksiyonları, jeneratör ve başka cihazların zarar görmesini önlemek için etkili olmalıdır.
- Esneklik sağlamak için istenilen özelliklere sahip olmalıdır.
- Hata bulma ve yalıtım kapasitesi, gerekli güvenilirlik ve dayanıklılık özelliklerine sahip olmalıdır.



Şekil 3.6. Uyarım kontrol sisteminin fonksiyonel blok diyagramı

IEEE, uyarım sistemlerini DA tipi, ST tipi ve AC tipi olmak üzere üç sınıfa ayırır. Çizelge 3.1’ de sürekli ve geçici hal kararlılık çalışmalarında kullanılmak üzere 19 farklı uyarım modeli geliştirilmiştir. (IEEE 421.5, 2006)

Çizelge 3.1. IEEE uyarıcı modelleri

DA Tip Uyarıcı	<i>DC1A, DC2A, DC3A, DC4B</i>
AA Tip Uyarıcı	<i>AC1A, AC2A, AC3A, AC4A, AC5A, AC6A, AC7B, AC8B</i>
ST Tip Uyarıcı	<i>ST4B, ST5A, ST6B, ST7B, ST1A, ST2A, ST3A</i>

3.6.1 AA Tipi Uyarım Sistem Modelleri

Günümüzde, komütatörlü DA jeneratörlerinin yerini AA ve statik sistemler almıştır. Jeneratör alanları ve AA alternatörleri için gerekli doğru akımı üretmek için döner veya sabit doğrultucular bu sistemlerde kullanılır. Bu sistemler, yüklenme etkileri ve jeneratör uyarım akımının etkilerini tam olarak gözlemlemeye olanak sağlar. Bazıları negatif alan akımı sağlayamazken, bazıları (AA4A tipi) negatif alan kuvveti sağlayabilir. (Rogers, 2000) (Krause vd., 1995) (IEEE 421.5, 2006)

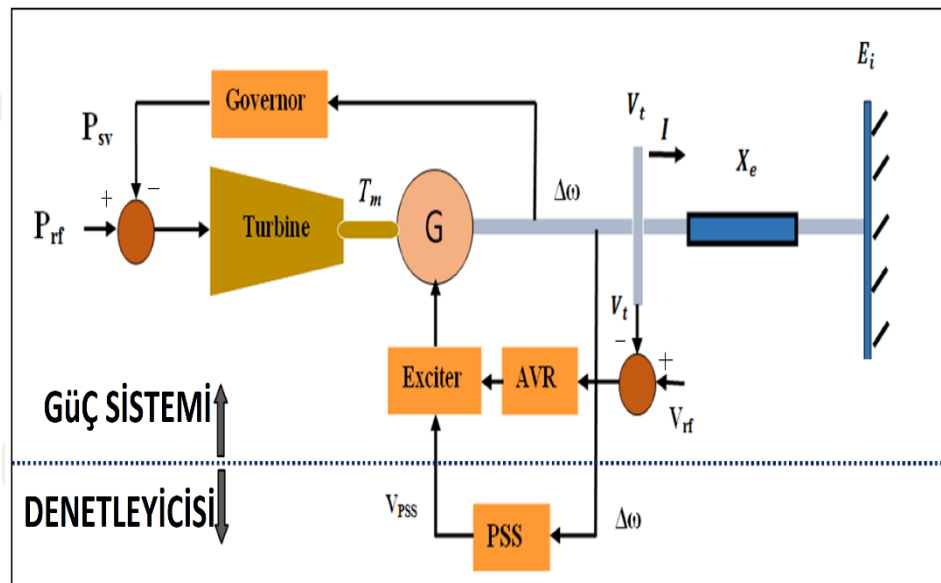
3.6.2 ST Tipi Uyarım Sistem Modelleri

Tristörlü AA/DA dönüştürücüsü ve bir uyarım trafosu üzerinden uyarım için gerekli güç senkron makineye sağlanır. Transformatör, gerilimi ve bileşik sistemlerde akımı uygun bir değere dönüştürmek için kullanılır. Kontrollü veya kontrolsüz jeneratör alanı için gerekli doğru akımı sağlamak için doğrultucular kullanılır. Negatif alan akımı elde edilemese de, çoğu sistemden negatif alan gerilimi elde edilebilir. Uyarım gerilimi genellikle yüksek değerlere çıkabilir ve bu durum jeneratör rotor sargıları için bir risk oluşturabilir. Bu sebeple, jeneratör rotor sargılarını ve uyarım sistemini korumak için ek alan akımı sınırlama devreleri kullanılarak, jeneratörün aşırı akımlardan zarar görmesini önlemek için tasarlanmıştır. (Rogers, 2000) (Krause vd., 1995) (IEEE 421.5, 2006)

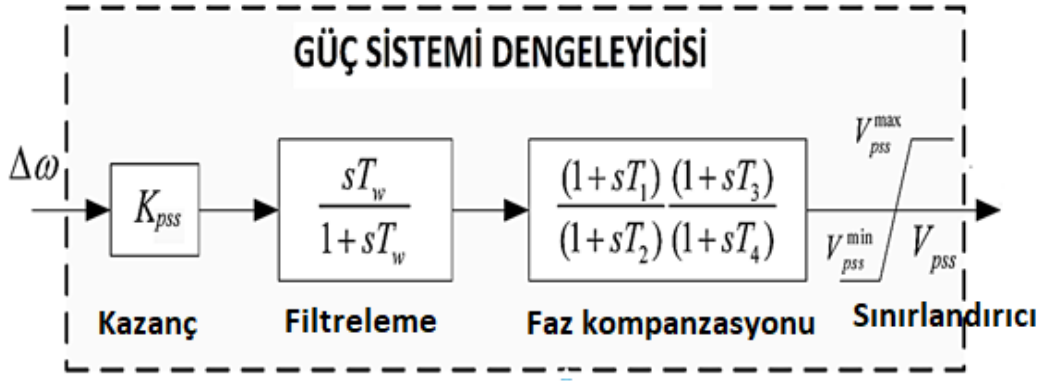
3.7. Güç Sistemi Dengeleyicisi

Güç sistemlerinde Senkron jeneratör uyarım kontrolü önemli bir rol oynar ve güç sistem kararlılığı açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu kontrol genellikle yüksek

Güç sistemlerinde oluşabilecek bozucu etkiler, sistemin açısız kararlılığını korumak için yeterli senkronizasyon momentinin üretilmesini ve mekanik ile elektriksel güç dengesinin korunmasını gerektirir. Otomatik gerilim regülatörleri, jeneratörlerin uyarıtma sistemi için kullanılarak senkronizasyon momentini güçlendirmeye yardımcı olur. Ancak, sadece senkronizasyon momenti yeterli değildir; referans değerine göre rotor açısının değişimini dengeleyen senkronizasyon momentinin oluşması da gereklidir. Güç Sistemi Dengeleyicisi, jeneratörde oluşan elektromekanik salınımları sönmülemeye yardımcı olan bir elemandır. Bu sistem, jeneratörün uyarıtma sistemine ek sinyaller üreterek geleneksel çözüm yaklaşımını destekler. (Anderson ve Fouad, 2003) (Kundur, 1994) (Nalbantoğlu, 2010) (Yazıcı, 2008) (Sauer ve Pai, 1998) (IEEE 421.5, 2006) (Eke, 2011) (Ghahremani vd., 2008) (Machowski vd., 2008)



Şekil 3.8’ de tanımlandığı gibi sırasıyla kazanç, filtreleme, faz kompanzasyonu ve işaret sınırlayıcı bloklarından geleneksel güç sistemi dengeleyicisi oluşturmaktadır. (Eke, 2011)



Şekil 3.8. GSD parametre blok diyagramı

Kazanç:

Güç sistem dengeleyicisinin kazancı, rotor salınımlarını sönümlemede kritik bir rol oynar. Kazanç değeri, geniş bir etki aralığını dikkate alarak belirlenir. Ancak, dengeleyici kazancı çok yüksek seviyelere çıkarıldığında sönümleme etkisinin azalabileceği unutulmamalıdır.

Filtreleme:

Filtreleme bloğunun görevi, sürekli değişen durumlarda jeneratör uç gerilimindeki değişimleri engelleyerek yüksek geçiren bir filtre gibi davranmaktır. Bu bloğun büyük olması, T_w zaman sabitiyle kaynaklanan salınımları geçirmeden filtrelemesini sağlar. Örneğin, 1,5 s'lik bir zaman sabiti, 0,8-2 Hz aralığındaki yerel mod salınımları için yeterli görülürken, düşük frekanslı bölgesel salınımlarda 10 s'nin üzerinde olması istenir çünkü küçük zaman sabitleri düşük frekanslarda büyük faz kaymalarına neden olabilir.

Faz kompanzasyonu:

Güç sistemi dengeleyicisi, rotor açısı salınımlarını sönümlemek için sağladığı elektriksel momentun, rotor hızı değişimiyle aynı fazda olması gerekmektedir. Güç sistemi dengeleyicileri, elektriksel moment ile uyarma girişi arasındaki kapasitif faz farkını dengelemek için genellikle bir faz kompanzasyon filtresi kullanırlar. Bu filtreler, jeneratörün uyarım sistemi ile mekanik moment arasındaki faz farkını düzeltmeye yardımcı olur ve böylece jeneratörün doğru frekansta ve fazda çalışmasını sağlar.

Sınırlandırıcı:

Büyük salınımların yüksek oranda önlenmesi için dengeleyici pozitif çıkış sınırı, genellikle 0.1- 0.2 p.u. aralığında güç sistem dengeleyicisi sınırlandırıcısı ile ayarlanır. Negatif yönde ise dinamik cevap için -0.05 / -0.1 p.u. sınırları yeterli kontrol aralığını sağlar.

3.7.1 Güç Sistemi Dengeleyicisi Çeşitleri

Güç sistemi dengeleyicisinin giriş sinyaline göre kullanılan temel dengeleyici çeşitleri şunlardır: (Eke, 2011)

$\Delta\omega$ Güç sistemi dengeleyicisi:

Hidrolik santrallerde $\Delta\omega$ güç sistemi dengeleyicileri, 1960'lardan beri kullanılmaktadır. Ancak, milin kaçması gibi faktörlerden oluşan gürültüyü en aza indirme sorunu bulunmaktadır. Gürültü seviyesi %0,2'nin altında olmalıdır ve frekansa bağlı olarak değişebilir. Düşük frekanslı değişimler, terminal geriliminde büyük değişikliklere neden olabilir, bu nedenle önemlidir. Mil kaçması ve dönme hızı gibi faktörler belirgin gürültü kaynaklarıdır. Geleneksel elektrik filtreleri bu düşük frekanslı gürültüleri gideremez. Mil hızını doğrudan ölçen dengeleyiciler genellikle kullanılır, ancak bazı sınırlamalara sahiptirler. Bu sınırlamalar, dengeleyici işaretlerin burulma bileşenlerini azaltmak için kullanılan bir filtre tarafından aşılmaya çalışılır. Ancak, bu filtre genellikle dengeleyicinin sistem salınımlarını sınırlar. Bu sınırlamalar, $\Delta P_e - \omega$ dengeleyicilerle giderilir.

$\Delta P_e - \omega$ Güç sistemi dengeleyicisi:

Eşitlik 3.101' de, rotor hız sapmalarıyla orantılı işareti ivmelendirme gücünden türetilir. M , atalet sabitini; P_m , mekanik giriş gücündeki değişimi; P_e elektriksel çıkış gücündeki değişimi ve ω_{eq} , eşdeğer hız sapmasını ile tanımlanır.

$$\Delta\omega_{eq} = \frac{1}{2\tau_a} \int (\Delta P_m - \Delta P_e) dt \quad \text{rad/sn} \quad (3.101)$$

Güç sistemi dengeleyicileri, rotor hız sapmalarına bağlı bir işaret kullanarak tahrik gücünü belirler. Bu işaret, burulma modlarını içermez. Ancak, mekanik gücün temsili için kullanılan sinyalin entegrasyonu, mekanik güç değişiminin göreceli olarak yavaş olması nedeniyle düşük frekanslı bileşenlerin filtrelenmesini gerektirir.

Frekans tabanlı güç sistemi dengeleyicisi:

Bölgeler arası büyük salınımların sönümlenmesinde, frekans işareti yerel salınımlar için mil hızı giriş işaretinden daha etkilidir, çünkü bölgeler arası salınımlara daha duyarlıdır. Buhar türbinli ünitelerde bu dengeleyicilerin kullanılması durumunda, burulma modlarının filtreleneceği hız tabanlı dengeleyicilerde olduğu gibi ele alınmalıdır.

Dijital güç sistemi dengeleyicisi:

Yukarıda bahsedilen dengeleyicilerin bilgisayar yazılımına dönüştürülmesi, özellikle uyarma sistemlerinin dijital olarak kontrol edilmesiyle gerçekleşmiştir.



4. ÇOK MAKİNALI GÜÇ SİSTEM ANALİZİ

Güç sistemlerinin araştırılmasında genellikle büyük sistemlerde salınımların kritik modlarını inceleyerek yapılır. Bu modlar, özellikle sistemler arasındaki etkileşimleri anlamak ve sistemin kararlılığını değerlendirmek için önemlidir. (Padiyar, 2008)

4.1. Basitleştirilmiş Bir Sistem Modeli

Elektromekanik modlar, genellikle klasik jeneratör modelleriyle güç sistemlerinde tanımlanır. Analiz, iletim kayıplarının ihmal edildiği, tüm baralardaki gerilim genliklerinin sabit olduğu ve tüm yüklerin statik olduğu varsayımları altında yapılır. Bu varsayımlar, sistemin elektromekanik davranışını basitleştirir ve analizleri kolaylaştırır. Sadece aktif güç akışı denklemleri dikkate alınmasının nedeni tüm bara gerilimleri sabit varsayılmasıdır. Enjekte edilen gücün herhangi bir j barasındaki P_j değeri, Eşitlik 4.1' de verilmiştir. (Padiyar, 2008)

$$P_j = -P_{lj} = \sum_{i \in n_j} \frac{V_j V_i}{X_{ij}} \sin(\delta_j - \delta_i) + \sum_{k \in m_j} \frac{V_j E_k}{X'_{dk}} \sin(\delta_j - \delta_k) \quad (4.1)$$

n_j ve m_j , jeneratörlerin ve yüklerin belirli baralara bağlı olduğunu gösterir. P_{ij} , j barasına bağlı yükün i barasından tükettiği gücü ifade eder. Hat reaktansı X_{ij} ve jeneratörün geçici reaktansı X'_{dk} olarak tanımlanır. Çıkık kutuplu özelliği ihmal edilmiştir.

$$P_{ek} = \frac{E_{ek} V_j \sin(\delta_k - \delta_j)}{X'_{dk}} \quad (4.2)$$

$$\Delta P_{ij} = g_{ij} \Delta \delta_{ij} \quad (4.3)$$

$$g_{ij} = \frac{V_i V_j \cos \delta_{ij}}{X_{ij}} \quad (4.4)$$

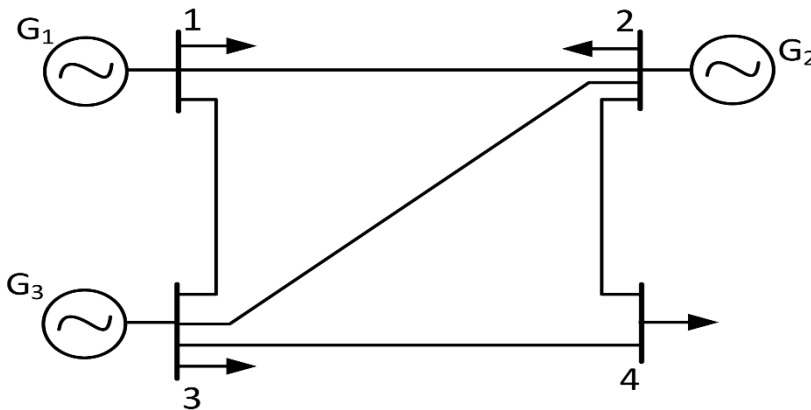
Bir doğrusal dirençli ağını temsil edilmesi için ΔP ile mevcut akım ve $\Delta \delta$ ile gerilim düşümü karşılaştırılması ele alınırsa,

$$[G] \begin{bmatrix} \Delta \delta_g \\ \Delta \delta_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

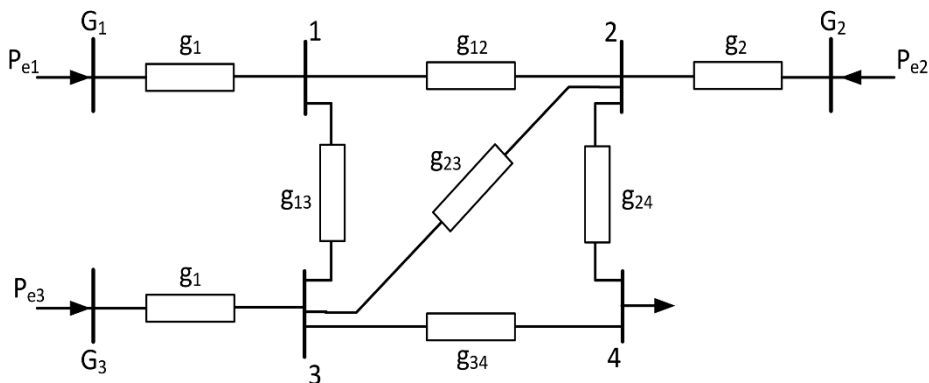
Belirsiz iletkenlik ile toprağa bağlantısı olmayan bir ağın $[G]$ matrisi, Şekil 4.1' de gösterildiği gibi 3 jeneratörlü 4 bara sistemi için verilebilir. Şekil 4.2' de gösterilen direnç, doğrusallaştırılmış güç akış denklemlerinde bir 4-baralı iletim sistemi için temsil edilir.

Bu durumda, jeneratör $[G]$ matrisi şu denklemlerle ifade edilir.

$$[G] = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 & -g_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & 0 & 0 & -g_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_3 & 0 & 0 & -g_3 & 0 \\ -g_1 & 0 & 0 & (g_1 + g_{12} + g_{13}) & -g_{12} & -g_{13} & 0 \\ 0 & -g_2 & 0 & -g_{12} & (g_{12} + g_{23} + g_{24} + g_2) & -g_{23} & -g_{24} \\ 0 & 0 & -g_3 & -g_{13} & -g_{23} & (g_3 + g_{13} + g_{23} + g_{34}) & -g_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{24} & -g_{34} & (g_{24} + g_{34}) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$



Şekil 4.1. Çok makinalı güç sistemi diyagramı



Şekil 4.2. Eşitliği temsil eden bir direnç ağı

[G] matrisinin her satır ya da sütuna sıfır eklediğimizde süperpozisyon teoreminden, ΔP_{ek} için Eşitlik 4.7' deki gibi tanımlanırsa,

$$\Delta P_{ek} = \sum_{j=1}^m G_{kj}^R \Delta \delta_{ij} \quad (4.7)$$

G_{kj}^R jeneratörün j ve k baralar arasındaki kısa devre transfer admitansı ile Eşitlik 4.7' de ifade edilir. Tüm açılı sapmaları eşit kabul edilirse $\Delta \delta_j = \Delta \delta, j = 1, 2, \dots, m$, buradaki $\Delta P_{ek} = 0$ iken eşitliğini aşağıdaki Eşitlik 4.8' deki gibi ele alabiliriz.

$$\sum_{j=1}^m G_{kj}^R = 0 \quad (4.8)$$

[GR] matrisinin azaltılmış iletkenliği G_{kj}^R unsuru olup jeneratörün tüm baraları (iç hariç) giderildikten sonra [G]'den elde edebileceğini eşitlikten izlenebilecektir.

4.1.1. Jeneratör Denklemleri Ve Atalet Merkezi Referans

Klasik jeneratörler modeli ile salınım denklemleri k jeneratörü için Eşitlik 4.9 gibi tanımlanır. (Farhad, 2015)

$$M_k = \frac{d^2 \delta_k}{dt^2} + D'_k \frac{d\delta_k}{dt} = P_{mk} - P_{ek}, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.9)$$

Bu eşitlikte, $M_k = \frac{2H_k}{\omega_B}$, $D'_k = \frac{D_k}{\omega_B}$, Eşitlik 4.10' da yer alan D_k birim sönümlemedir.

$$\frac{D'_k}{M_k} = \frac{D_k}{2H_k} = \alpha \quad (4.10)$$

Sabit olduğu varsayılırsa sönümlemenin homojen olduğu gösterilmiş olur. Atalet merkezi (COI) tanımlaması ise δ_0 aşağıdaki Eşitlik 4.11 gibi gösterilmiştir.

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} (\sum_{k=1}^m M_k \delta_k) \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.10 toplam ataleti $M_T = \sum_{k=1}^m M_k$ COI için denklemi Eşitlik 4.12 gösterilmiştir.

$$M_T(\rho + \alpha) \widetilde{\omega}_0 = \sum_{k=1}^m P_{mk} - \sum_{k=1}^m P_{ek} = P_{COI} \quad (4.12)$$

Burada $\widetilde{\omega}_0 = \frac{d\delta_0}{dt}$ ve $\rho = \frac{d}{dt}$ olarak verildiğinde elektriksel ağda,

$$\sum_{k=1}^m P_{ek} = \sum_{j=1}^n P_{lj} + P_{loss} \quad (4.13)$$

Mekanik güçler sabit olduğunda, P_{COI} de sabit kalır çünkü aktif yük ve kayıpsız ağ da sabittir. Eşitlik 4.12' yi 4.14 şeklinde düzenlenirse,

$$M_T(\rho^2 + \rho \propto) \delta_0 = P_{COI} \quad (4.14)$$

Eşitlik 4.14, 4.6' da yerine koyduğumuzda,

$$M_k(\rho^2 + \rho \alpha) \theta_k = P_{mk} - P_{ek} - \frac{M_k}{M_T} P_{COI} , \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.15)$$

Eşitlik 4.15' de yer alan θ_k , COI' ye bağlı rotor açısıdır ve aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\theta_k = \delta_k - \delta_0 \quad (4.16)$$

COI ile bağımsız tüm açılar ve Eşitlik 4.18 anlaşıldığı üzere: θ_k 'nin yukarıdaki tanımını dikkate alındığında,

$$\sum_{k=1}^m M_k \theta_k = 0 \quad (4.17)$$

$$\theta_i - \theta_j = \delta_i - \delta_j \quad (4.18)$$

P_{COI} yi sabit varsayıldığında Eşitlik 4.15 doğrusallaştırılırsa,

$$M_k \rho^2 \Delta \theta_k + \propto M_k \rho \Delta \theta_k = -\Delta P_{ek}, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.19)$$

Eşitlik 4.8 ve 4.9 tekrar ele aldığımızda,

$$\Delta P_{ek} = \sum_{j=1, j \neq k}^m -G_{kj}^R (\Delta \delta_k - \Delta \delta_j) = \sum_{j=1, j \neq k}^m -G_{kj}^R (\Delta \theta_k - \Delta \theta_j) \quad (4.20)$$

Eşitlikteki 4.20' deki $\propto = 0$ varsayılırsa doğrusallaştırılmış sistem denklemleri aşağıdaki matris formunda yazılabilir.

$$[M] \rho^2 \Delta \theta = -[G]^R \Delta \theta \quad (4.21)$$

$$M_T \rho^2 \Delta \delta_0 = 0 \quad (4.22)$$

Eşitlik 4.21 gösterilen $[G]^R$ azaltılmış matrisinin seviyesi $(m - 1)$ 'den az veya ona eşit olarak kabul edilir ve $G^R(j, k) = G_{kj}^R = G_{jk}^R$ unsurları olan simetrik matristir.

Açıklamalar

1. $\Delta P_{COI} = 0$ kayıpsız ağ ve sabit aktif güç yükleri için geçerlidir. Sıfır sönümleme durumunda ise $[M]p2\Delta\delta = -[G]R\Delta\delta$ değere sahip olması beklenir.
2. Eşitlik 4.16, COI referans çerçevesi üzerindeki bağımsız açı değişkenlerinin her biri, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m-1}$ ve δ_0 sayısı m'ye kadar azaltılır.
3. İkinci dereceden diferansiyel denklemleri n sayıslı sistemi ile açıklanır. Burada 2n sistem öz değerleri dışında sıfır sönümleme için iki tanesi sıfırdır. Bu kabuller ile aşağıdaki denklem gösterilir.

$$p\Delta\delta_0 = \Delta\tilde{\omega}_0 \quad (4.23)$$

$$p\Delta\tilde{\omega}_0 = -\alpha \Delta\tilde{\omega}_0 + \frac{\Delta P_{COI}}{M_T} \quad (4.24)$$

Eğer $\alpha \neq 0$, o zaman öz değerlerinden biri, $-\alpha$ olur.

4. $\Delta P_{COI} \neq 0$ ise,

$$\Delta P_{COI} = \sum_{k=1}^{m-1} \gamma_k \Delta\theta_k \quad (4.25)$$

Sistemin denklemleri yeniden düzenlenirse:

$$\Delta\dot{y} = [G]\Delta y \quad (4.26)$$

Burada, $y^t = [\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2, \dots, \theta_{m-1}, \dot{\theta}_{m-1}, \tilde{\omega}_0, \delta_0]$

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{12} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$[A]$ matrisinin öz değerleri $[A_{11}]$ ve $[A_{22}]$ matrisleri kullanılarak oluşturulmaktadır.

$$A_{22} = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Sistemin yapısını ortaya çıkarmak için COI referans tabanlı sistem denklemleri kullanılmaktadır.

5. İki set halinde sistem denklemlerinin ayrıştırılması uniform sönümleme varsayımı için olması gerekir.

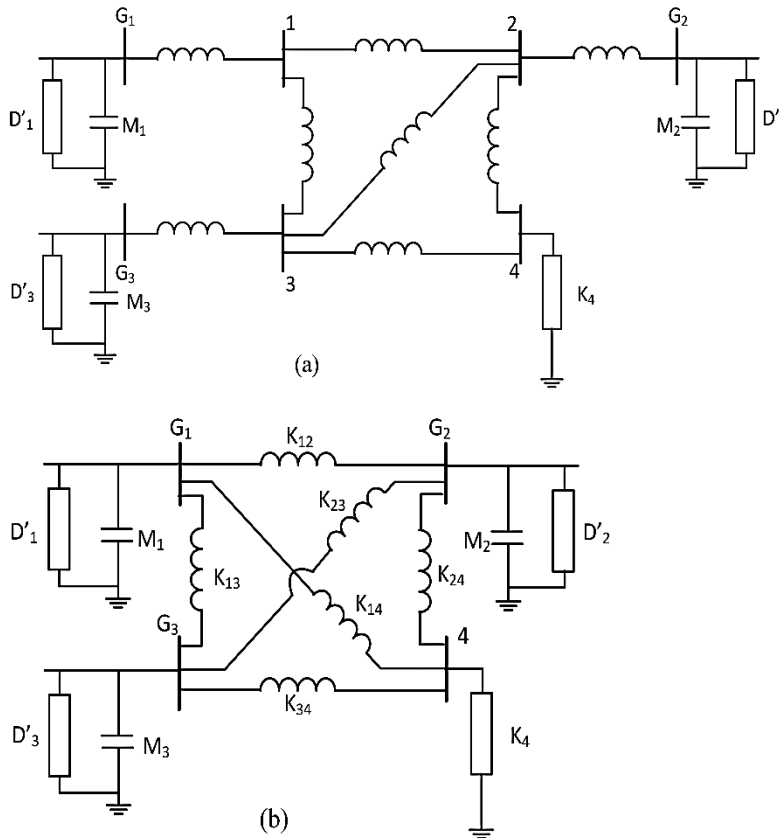
4.1.2. Doğrusal Durum Uzayı Denklemleri

Doğrusallaştırılmış durum uzayı denklemlerini, güç sisteminde benzer yapılarından dolayı $\Delta\omega$ ($p\Delta\delta$) ve ΔP ile elde edilebilir. C (kondansatör) yerine atalet (M), G (iletkenlik) yerine sönümlenme (ya da frekansa bağımlı yükler) ve L (indüksiyon) yerine karşılıklı G_{ij} , GLC elemanlarından oluşmaktadır. Şekil 4.3 benzer yapıda oldukları gösterilmiştir. (Farhad, 2015) (Padiyar, 2008)

Şekildeki şebekeden 1, 2 ve 3'üncü baraları çıkarılmıştır. $K_{12}, K_{13}, K_{14}, K_{23}, K_{24}$ ve K_{34} indüktansların karşılıklı elemanları olarak kabul edilip, $\Delta\delta$ değişkeni bağlantısı akıya benzerdir. Şekil 4.3' deki sistem için denklemleri ifade edilirse,

$$M_1 \frac{d}{dt} \Delta\omega_1 + D'_1 \Delta\omega_1 = -\Delta P_{e1} \quad (4.29)$$

$$M_2 \frac{d}{dt} \Delta\omega_2 + D'_2 \Delta\omega_2 = -\Delta P_{e2} \quad (4.30)$$



Şekil 4.3. (a) Küçük sinyal analizi için bir azaltılmamış elektrik şebekesi, (b). küçük sinyal analizi için bir azaltılmış elektrik şebekesi

$$M_3 \frac{d}{dt} \Delta\omega_3 + D'_3 \Delta\omega_3 = -\Delta P_{e3} \quad (4.31)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta\delta_{12} = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_2 \quad (4.32)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta\delta_{13} = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_3 \quad (4.33)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta\delta_{14} = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_4 \quad (4.34)$$

$$\Delta P_{e1} = K_{12} \Delta\delta_{12} + K_{13} \Delta\delta_{13} + K_{14} \Delta\delta_{14} \quad (4.35)$$

$$\Delta P_{e2} = -K_{12} \Delta\delta_{12} + K_{23} (\Delta\delta_{13} - \Delta\delta_{12}) + K_{24} (\Delta\delta_{14} - \Delta\delta_{12}) \quad (4.36)$$

$$\Delta P_{e3} = -K_{13} \Delta\delta_{13} + K_{24} (\Delta\delta_{14} - \Delta\delta_{12}) + K_{34} (\Delta\delta_{14} - \Delta\delta_{13}) \quad (4.37)$$

$$K_4 \Delta\delta_4 = -K_{14} \Delta\delta_{14} + K_{24} (\Delta\delta_{14} - \Delta\delta_{12}) + K_{34} (\Delta\delta_{14} - \Delta\delta_{13}) \quad (4.38)$$

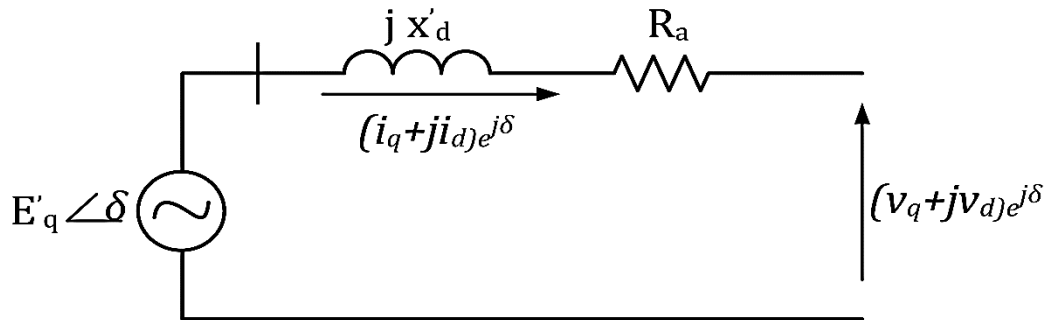
Durum-dışı değişkenleri ($\Delta P_{e1}, \Delta P_{e2}, \Delta P_{e3}$ ve $\Delta\omega_4$) cebirsel denklemler yoluyla ortadan kaldırmak amacıyla durum denklemlerinde kullanılır.

$$\dot{x} = [A]x \quad (4.39)$$

$$X^T = [\Delta\omega_1 \ \Delta\omega_2 \ \Delta\omega_3 \ \Delta\omega_4 \ \Delta\delta_{12} \ \Delta\delta_{13} \ \Delta\delta_{14}] \quad (4.40)$$

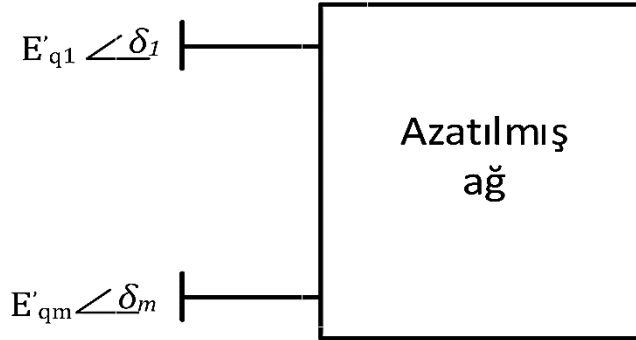
4.2.Ayrıntılı Model: Durum – 1

Bu bölümde, senkron makineler için 1. model varsayılarak amortisör sargıları ihmal edilir. Belirtilen varsayımlarla model basitleştirilir: Yükler sabit empedansla tanımlanır; Geçici çıkıntı $x_q = x'_d$ ' ile aynı kabul edilmesi ile ihmal edilirse; Mekanik güç sabit bir değer ile tanımlanır. (Farhad, 2015) (Padiyar, 2008)



Şekil 4.4. Stator eşdeğer devresi

Şekil 4.4'teki eşdeğer devre ile senkronize makinenin statoru gösterilir. Senkron makinenin statoru, uyarma sistemiyle etkilenen durum değişkeni E'_q için, klasik modelden tek fark olarak, belirtilen varsayımlarla gösterilir.



Şekil 4.5. Azaltılmış şebeke sistemi (jeneratörün iç baralar ile)

Birinci varsayıma göre, şebeke sadece jeneratörün iç baralarına indirgenip yük baraları ihmal edilirse, Şekil 4.5' de k jeneratörün elektrik güç çıkışı şu şekilde ifade edilir:

$$P_{ek} = \sum_{j=1}^m E'_{qk} [G_{jk} \cos \delta_{kj} + B_{jk} \sin \delta_{kj}] E'_{qj} \quad (4.41)$$

ile gösterilir. $\delta_{kj} = \delta_k - \delta_j$, $(G_{jk} + jB_{jk})$ şebekenin indirgenmiş admitans matrisin bir elemanı olarak tanımlanır. Jeneratör denklemlerini, k' ıncı makine için denklemleri

$$pE'_{qk} = \frac{1}{T'_{d0}} [-E'_{qk} + (x_{dk} - x'_{dk})i_{dk} + E_{fdk}] \quad (4.42)$$

$$p\delta_k = \omega_b (S_{mk} - S_{mk0}) \quad (4.43)$$

$$pS_{mk} = \frac{1}{2H_k} [-D_k (S_{mk} - S_{mk0}) + P_{mk} - P_{ek}] \quad (4.44)$$

T_{mk} ve T_{ek} yerine P_{mk} ve P_{ek} 'yi kolaylaştırmak için kullanılmaktadır.

P_{ek} ve T_{ek} 'in arasında fark olmadığı için şebeke sisteminin hesaplamasında frekans değişimleri ihmal edilir. Karmaşık güç jeneratör iç barasındaki,

$$P_{ek} + jQ_{ek} = E'_{qk} (i_{qk} - ji_{dk}) \quad (4.45)$$

$$P_{ek} + jQ_{ek} = E'_{qk} i_{qk} - jE'_{qk} i_{dk} \quad (4.46)$$

ile gösterilir. Böylece i_{dk} ,

$$i_{dk} = -\frac{Q_{ek}}{E'_{qk}} \quad (4.47)$$

İfade edilen Q_{ek} Eşitliği 4.48,

$$Q_{ek} = \sum_{j=1}^m E'_{qk} [G_{jk} \sin \delta_{kj} + B_{jk} \cos \delta_{kj}] E'_{qj} \quad (4.48)$$

Eşitlik 4.48 doğrusallaştırıldığında,

$$\Delta i_{dk} = \frac{Q_{ek0}}{(E'_{qk})^2} \Delta E'_{qk} - \frac{\Delta Q_{ek}}{E'_{qk0}} \quad (4.49)$$

Eşitlik 4.43 ve 4.45 doğrusallaştırılır ve denklemler tüm jeneratörler için birleştirilirse,

$$\dot{X}_g = [A_g] X_g + [B_g] \Delta S_e + [E_g] \Delta E_{fd} \quad (4.50)$$

Eşitlik 4.50' de ifade edilen,

$$X_g^t = [\Delta E'_{q1} \Delta \delta_1 \Delta S_{m1} \dots \Delta E'_{qk} \Delta \delta_k \Delta S_{mk} \dots \Delta E'_{qm} \Delta \delta_m \Delta S_{mm}] \quad (4.51)$$

$$[A_g] = \text{diag}[A_{g1} \ A_{g2} \dots A_{gm}] \quad (4.52)$$

$$[B_g] = \text{diag}[B_{g1} \ B_{g2} \dots B_{gm}] \quad (4.53)$$

$$[E_g] = \text{diag}[E_{g1} \ E_{g2} \dots E_{gm}] \quad (4.54)$$

$$\Delta S_e^T = [\Delta P_{e1} \Delta Q_{e1} \dots \Delta P_{ek} \Delta Q_{ek} \dots \Delta P_{em} \Delta Q_{em}] \quad (4.55)$$

$$[A_{gk}] = \begin{bmatrix} \alpha_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_k \\ 0 & 0 & -\frac{D_k}{2H_k} \end{bmatrix}, [B_{gk}] = \begin{bmatrix} 0 & b_k \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{2H_k} & 0 \end{bmatrix}, [E_{gk}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{T'_{d0k}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

$$\alpha_k = \frac{1}{T'_{d0}} \left[-1 + \frac{(x_{dk} - x'_{dk})}{(E'_{qk0})^2} Q_{ek0} \right], \quad b_k = -\frac{(x_{dk} - x'_{dk})}{T'_{d0} E'_{qk0}} \quad (4.57)$$

Eşitlik 4.49 ve 4.55 ifadeler doğrusallaştırılırsa,

$$\Delta S_e = [F_1] \Delta E'_q + [F_2] \Delta \delta \quad (4.58)$$

$[F1]$ ve $[F2]$, $(2m \times m)$ boyutunda matrislerdir. $[F2]$ ' nin tüm sütunları sıfıra kadar eklenebildiği için tekil bir matristir. P_{ek} ve Q_{ek} ifadeleri sadece rotor açılarındaki değişimlere bağlıdır. Durum uzay açıklaması durum vektörü yoluyla aşağıda gösterilmiştir.

$$X_G^t = [\Delta E'_{q1} \Delta \delta_{1m} \Delta S_{m1} \dots \Delta E'_{qk} \Delta \delta_{km} \Delta S_{mk} \dots \Delta E'_{qm} \Delta \delta_{mm} \Delta S_{mm}] \quad (4.59)$$

$\Delta \delta_{km} = \Delta \delta_k - \Delta \delta_m$ ve açı değişkenleri ihmal edilerek denklem yeniden düzenlenirse,

$$\dot{X}_G = [A_G]X_G + [B_G]\Delta S_e + [E_g]\Delta E_{fd} \quad (4.60)$$

Burada, $[A_G]$ değişkeni $(3m - 1) \times (3m - 1)$ matris, $[E_g]$ değişkeni $(3m - 1) \times 2m$ matris ve $[B_G]$ değişkeni $(3m - 1) \times m$ matristir. Bu değişkenler $[A_g]$ $[B_g]$ ve $[E_g]$ 'den farklı olmakla birlikte,

a) $[A_{gm}]$ $[B_{gm}]$ ve $[E_{gm}]$ girişleri farklıdır.

b) $[A_G]$ matrisinin son sütunu $\Delta \delta_{mk}$ 'ye karşı gelen satırında $-\omega_B$ değerinde girişlere sahiptir.

$$[A_{gm}] = \begin{bmatrix} \alpha_m & 0 \\ 0 & -\frac{D_m}{2H_m} \end{bmatrix}, [B_{gm}] = \begin{bmatrix} 0 & b_m \\ -\frac{1}{2H_m} & 0 \end{bmatrix}, [E_{gm}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{T'_{dom}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

Göreceli açılar, mutlak açılar yerine kullanıldığında,

$$\Delta S_e = [F_1]\Delta E'_q + [F_2']\Delta \delta' \quad (4.62)$$

Eşitlik 4.62' de $[F_2']$ $(2m \times m - 1)$ boyutunda matristir olup, göreceli açılarının bir vektörü $\Delta \delta'$ 'nin $(\Delta \delta_k - \Delta \delta_m) = \Delta \delta_{km}$ k'inci unsurudur. Denklemlerde eşitlikler yerine konduğunda,

$$\dot{X}_G = \{[A_G] + [B_G][F]\}X_G + [E_G]\Delta E_{fd} \quad (4.63)$$

$$[F] = [F_1][C_1] + [F_2'] [C_2] \quad (4.64)$$

$$[C_1] = \text{diag}[C_{11} \dots C_{1k} \dots C_{1m}] \quad (4.65)$$

$$[C_2] = \text{diag}[C_{21} \dots C_{2k} \dots C_{2(m-1)}] \quad (4.66)$$

$$C_{1k} = [1 \ 0 \ 0], \quad C_{2k} = [0 \ 1 \ 0], \quad C_{1m} = [1 \ 0], \quad C_{2(m-1)} = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (4.67)$$

Sistem matrisine kontrol dinamiği kısmını uyarma kontrolörleri dikkate alındığı zaman eklenir. Çıktı değişkenlerinin bir vektörü ΔE_{fd} uyarma denetleyicileri olup, kontrolörlerin durum değişkenleri açısından tanımlanır.

4.3.Ayrıntılı Model: Durum – 2

Yükler sabit empedanslarla, genellikle güç sistemi üzerinde kısıtlayıcı etkiye sahiptirler. Ancak, güç sistemlerinde doğrusal olmayan yük karakteristikleri veya yük dinamikleri varsa, bu durum Yüksek Gerilim Doğru Akım(YGDA) veya Statik Var Kompansatör(SVC) gibi kontrol cihazlarının kullanılmasını gerektirebilir. Bu cihazlar, yük dinamiğinin bir parçası olarak ele alınmalı ve güç sistemlerinin stabilitesini, gerilim kontrolünü ve güç faktörünü iyileştirmeye yardımcı olur. Kontrolör dinamikleri özgün ve farklı olabilir, bu da jeneratör temsilinin değiştirilmesi gerektiği anlamına gelir ve aşağıdaki eşitliğe ulaşılır. (Farhad, 2015) (Padiyar, 2008)

$$\dot{X}_g = [A_g]X_g + [B_g]\Delta V_g + [E_g]u_c \quad (4.68)$$

Jeneratör kontrolörlerinin giriş referans değişkenlerindeki küçük değişkenler (ΔV_{ref} , ΔT_m veya $\Delta \bar{\omega}_{ref}$), Eşitlik 4.68' de gösterilen u_c vektörünü oluşturur. Verilen ifadelerle belirtilen V_g jeneratör uç geriliminin küçük sapmalarını belirtir.

$$\Delta V_g^p = \begin{bmatrix} V_{g0}\Delta\theta_g \\ \Delta|V_g| \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

$$\Delta V_g^r = \begin{bmatrix} \Delta V_{Qg} \\ \Delta V_{Dg} \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

$$\Delta V_g^p = \frac{1}{V_{g0}} \begin{bmatrix} -\Delta V_{Dg0} & \Delta V_{Qg} \\ \Delta V_{Qg} & \Delta V_{Dg0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{Qg} \\ \Delta V_{Dg} \end{bmatrix} \quad (4.71)$$

Güç çıkışı ya da akımları jeneratörün çıkış değişkenlerinde küçük sapmalar olabilir. Akımlar kullanıldığında Eşitlik 4.72 aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\Delta I_g = \begin{bmatrix} \Delta I_{Dg} \\ \Delta I_{Qg} \end{bmatrix} [C_g]X_g + [D_g]\Delta V_g \quad (4.72)$$

İlk adımda dinamikler ihmal edilir ve bir uyarıcının yalnızca zaman sabitli olan ele alınırsa, durum değişkeni şu şekilde gösterilir.

$$X_g^t = [\Delta\delta \quad \Delta S_m \quad \Delta E'_q \quad \Delta E'_d \quad \Delta E_{fd}] \quad (4.73)$$

Sıfırdan farklı $[A_g]$ matrisin elemanları aşağıda verilmiştir.

$$A_g(1,2) = \omega_B \quad (4.74)$$

$$A_g(2,1) = \frac{1}{2H} \left[\frac{E'_{q0}}{x'_d} V_{g0} \cos(\delta_0 - \theta_{g0}) - \frac{E'_{d0}}{x'_q} V_{g0} \sin(\delta_0 - \theta_{g0}) + (x'_d - x'_q) \frac{V_{g0}^2 \cos 2(\delta_0 - \theta_{g0})}{x'_d x'_q} \right] \quad (4.75)$$

$$A_g(2,2) = -\frac{D}{2H} \quad (4.76)$$

$$A_g(2,3) = \frac{-V_{g0} \sin(\delta_0 - \theta_{g0})}{2H x'_d} \quad (4.77)$$

$$A_g(2,4) = \frac{-V_{g0} \cos(\delta_0 - \theta_{g0})}{2H x'_d} \quad (4.78)$$

$$A_g(3,1) = -\frac{(x'_d - x'_q)}{T'_d x'_d} V_{g0} \sin(\delta_0 - \theta_{g0}) \quad (4.79)$$

$$A_g(3,3) = -\frac{1}{T'_{d0}} \left[1 + \frac{(x'_d - x'_q)}{x'_d} \right] \quad (4.80)$$

$$A_g(3,5) = \frac{1}{T'_{d0}} \quad (4.81)$$

$$A_g(4,1) = -\frac{(x'_q - x'_d) \cos(\delta_0 - \theta_{g0})}{T'_{d0} x'_q} V_{g0} \quad (4.82)$$

$$A_g(4,4) = -\frac{1}{T'_{d0}} \left[1 + \frac{(x'_q - x'_d)}{x'_q} \right] \quad (4.83)$$

$$A_g(5,5) = -\frac{1}{T_E} \quad (4.84)$$

Sıfırdan farklı elemanları olan $[B_g]$ ve $[E_g]$ matrisleri aşağıda gösterilmektedir:

$$B_g^p(2,1) = \frac{1}{2H} \left[\frac{E'_{q0} \cos(\delta_0 - \theta_{g0})}{x'_d} - \frac{E'_{d0} \sin(\delta_0 - \theta_{g0})}{x'_q} + \right]$$

$$V_{g0}(x_d' - x_q') \frac{\cos 2(\delta_0 - \theta_{g0})}{x_d' x_q'} \quad (4.85)$$

$$B_g^p(2,2) = \frac{1}{2H} \left[\frac{E_{q0}' \sin(\delta_0 - \theta_{g0})}{x_d'} - \frac{E_{d0}' \cos(\delta_0 - \theta_{g0})}{x_q'} \right] +$$

$$V_{g0}(x_d' - x_q') \frac{\sin 2(\delta_0 - \theta_{g0})}{x_d' x_q'} \quad (4.86)$$

$$B_g^p(3,1) = \frac{(x_d - x_d')}{x_d' T_{d0}'} \sin(\delta_0 - \theta_{g0}) \quad (4.87)$$

$$B_g^p(3,2) = \frac{(x_d - x_d')}{x_d' T_{d0}'} \cos(\delta_0 - \theta_{g0}) \quad (4.88)$$

$$B_g^p(4,1) = \frac{(x_q - x_q')}{x_q' T_{d0}'} \cos(\delta_0 - \theta_{g0}) \quad (4.89)$$

$$B_g^p(4,2) = \frac{(x_q - x_q')}{x_q' T_{d0}'} \sin(\delta_0 - \theta_{g0}) \quad (4.90)$$

$$B_g^p(5,2) = - \frac{K_E}{T_E} \quad (4.91)$$

$$E_g(5) = \frac{K_E}{T_E}, \quad E_g(2) = \frac{1}{2H} \quad (4.92)$$

Uç bir skaler olarak ΔV_{ref} , $[E_g]$ bir sütun vektörüne eşittir. Uyarma sisteminin kazanç ve zaman sabiti K_E ve T_E dir. Armatür direnci ihmal edilir ve indis p ile kutupsal koordinatlar gösterilir. $[C_g]$ ve $[D_g]$ matrislerin sıfırdan farklı elemanları aşağıda gösterilmektedir.

$$C_g(1,1) = I_{Qg0} + \frac{V_{g0} \sin \delta_0 \cos(\delta_0 - \theta_{g0})}{x_q'} - \frac{V_{g0} \cos \delta_0 \sin(\delta_0 - \theta_{g0})}{x_d'} \quad (4.93)$$

$$C_g(1,3) = - \frac{\cos \delta_0}{x_d'} \quad (4.94)$$

$$C_g(1,4) = - \frac{\sin \delta_0}{x_q'} \quad (4.95)$$

$$C_g(2,1) = V_{g0} \left[\frac{\sin \delta_0 \sin(\delta_0 - \theta_{g0})}{x_d'} - \frac{\cos \delta_0 \sin(\delta_0 - \theta_{g0})}{x_q'} \right] - I_{Dg0} \quad (4.96)$$

$$C_g(2,3) = \frac{\sin \delta_0}{x_d'} \quad (4.97)$$

$$C_g(2,4) = \frac{\cos \delta_0}{X'_q} \quad (4.98)$$

$$D_g^p(1,1) = \frac{\cos \delta_0 \sin(\delta_0 - \theta_{g0})}{X'_d} - \frac{\sin \delta_0 \cos(\delta_0 - \theta_{g0})}{X'_q} \quad (4.99)$$

$$D_g^p(1,2) = \frac{\cos \delta_0 \cos(\delta_0 - \theta_{g0})}{X'_d} - \frac{\sin \delta_0 \sin(\delta_0 - \theta_{g0})}{X'_q} \quad (4.100)$$

$$D_g^p(2,1) = \frac{\sin \delta_0 \sin(\delta_0 - \theta_{g0})}{X'_d} - \frac{\cos \delta_0 \cos(\delta_0 - \theta_{g0})}{X'_q} \quad (4.101)$$

$$D_g^p(2,2) = \frac{\sin \delta_0 \cos(\delta_0 - \theta_{g0})}{X'_d} - \frac{\cos \delta_0 \sin(\delta_0 - \theta_{g0})}{X'_q} \quad (4.102)$$

$X'_d = X'_q = X'$ ifadeleri basitleştirildiği takdirde,

$$D_g(1,1) = \frac{-\sin \theta_{g0}}{X'} \quad , \quad D_g(1,2) = \frac{\cos \theta_{g0}}{X'} \quad (4.103)$$

$$D_g(2,1) = \frac{-\cos \theta_{g0}}{X'} \quad , \quad D_g(2,2) = \frac{\sin \theta_{g0}}{X'} \quad (4.104)$$

$$C_g(1,1) = I_{Qg0} + \frac{V_{g0}}{X'} \sin \theta_{g0} \quad (4.105)$$

$$C_g(2,1) = -I_{Dg0} + \frac{V_{g0}}{X'} \cos \theta_{g0} \quad (4.106)$$

$$[B_g^r] = [B_g^p][P] \quad (4.107)$$

$$[D_g^r] = [D_g^p][P] \quad (4.108)$$

Üst simge r dikdörtgen koordinatları ifade etmektedir.

Ağ denklemleri:

Admitans matrisi DQ değişkenleri veya güç dengesi denklemlerinden elde edilen jakobiyen matrisi kullanılarak, doğrusal olan ağ denklemleri şu şekilde ifade edilir.

$$[Y_{DQ}]\Delta V_{DQ} = \Delta I_{DQ} \quad (4.109)$$

Her bir elemanı 2×2 matris olarak $[Y_{DQ}]$ tanımlanmıştır.

$$Y_{DQ}(i,j) = \begin{bmatrix} B_{ij} & G_{ij} \\ G_{ij} & -B_{ij} \end{bmatrix} \quad (4.110)$$

$\Delta V_{QD}(i)$ ve $\Delta I_{DQ}(i)$ vektörleri aşağıda gösterilmiştir.

$$\Delta V_{QD}(i) = \begin{bmatrix} \Delta V_{Qi} \\ \Delta V_{Di} \end{bmatrix}, \quad \Delta I_{DQ}(i) = \begin{bmatrix} \Delta I_{Di} \\ \Delta I_{Qi} \end{bmatrix} \quad (4.111)$$

ΔV_{Qi} önce ve ΔV_{Di} sonra yazılarak gerilimler gösterilir. Bunun haricinde, ΔI_{Di} önce ΔI_{Qi} sonra yazılarak akımlar gösterilir. Bu şekilde faz kayma transformatörleri ihmal edilirse $[Y_{DQ}]$ gerçek bir simetrik matris haline gelir. Jakoben matrisi olan $[J]$ aşağıda gösterilmiştir.

$$[J]\Delta V^p = \Delta S \quad (4.112)$$

$$J(i,j) = \begin{bmatrix} \frac{1}{V_j} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_j} \\ \frac{1}{V_j} \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} \end{bmatrix} \quad (4.113)$$

$$\Delta V^p(i) = \begin{bmatrix} V_i \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix}, \quad \Delta S(i) = \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (4.114)$$

Bara i 'de güç enjeksiyonu olan P_i ve Q_i , θ_i ve V_i bara i 'de gerilimin büyüklüğü ve açısıdır. Dikdörtgen koordinatlarının kutupsal koordinatlarla değiştirilmesiyle Jakobiye matrisi farklı bir kullanım alır. Admitans matrisi sabit kalırken, Jakobiye matrisi çalışma noktasına bağlıdır. Yük dinamikleri ihmal edilirse, Jakobiye matrisinin diyagonal girişleri değişir. SVC etkisi yalnızca kararlı durum kontrol karakteristikleri dikkate alındığında geçerlidir.

Sistem denklemleri, jeneratörlerin sayısı (mg), yüklerin sayısı (ml) ve statik var kompensatörlerin sayısı (ms) ile gösterilir. Ağdaki baraların sayısı (n) ise bir denklemlerle yeniden yazılırsa,

$$[Y_{DQ}]\Delta V_{QD} = [P_G]\Delta I_G - [P_S]\Delta I_S - [P_L]\Delta I_L \quad (4.115)$$

Eşitlik 4.115' de ifade edilen P_G ($2n \times 2mg$) matristir ve elemanları j jeneratörü i baraya bağlı olacak şekilde ve olmadığı durumda ise aşağıda gösterilmiştir.

$$P_G(i,j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad P_G(i,j) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.116)$$

$[P_S]$ ve $[P_L]$ tanımlamak için SVC, i baraya j yük bağlı olursa $P_S(i, j)$ veya $P_L(i, j)$ birim matrisleri 2 boyutlu olup, diğer durumda $P_S(i, j)$ veya $P_L(i, j)$ boş bir matristir. ΔI_S ve ΔI_L ile ilgili işaret negatif olduğu için SVC ve yük akımlarının akışı bara tarafında kabul edilir.

Her iki ΔI_S ve ΔI_L aşağıdaki eşitlik 4.117 ve 4.118' de gösterilmiştir.

$$\Delta I_S = [Y_S] \Delta V_S \quad (4.117)$$

$$\Delta I_L = [Y_L] \Delta V_L \quad (4.118)$$

Yukarıdaki Eşitlik 4.117 ve 4.118 $[Y_S]$ ve $[Y_L]$ blok diagonal matrislerdir. ΔV_S ve ΔV_L aşağıda verilmiştir.

$$\Delta V_S = [P_S]^t \Delta V_{QD}, \quad \Delta V_L = [P_L]^t \Delta V_{QD} \quad (4.119)$$

$\Delta I_{g1}, \Delta I_{g2}, \dots, \Delta I_{gm}$ değerlerinden oluşan ΔI_G bir Jeneratör akım vektörü aşağıda gösterilmiştir.

$$\Delta I_G = [C_G] X_G - [Y_G] \Delta V_G \quad (4.120)$$

Buradaki değerleri sırasıyla aşağıda gösterilmiştir.

$$X_G^t = [x_{g1}^t \ x_{g2}^t \ \dots \ x_{gm_g}^t] \quad (4.121)$$

$$\Delta V_G^t = [\Delta V_{g1}^t \ \Delta V_{g2}^t \ \dots \ \Delta V_{gm_g}^t] \quad (4.122)$$

$$\Delta I_G^t = [\Delta I_{g1}^t \ \Delta I_{g2}^t \ \dots \ \Delta I_{gm_g}^t] \quad (4.123)$$

$$[C_G] = \text{diag} [C_{g1} \ C_{g2} \ \dots \ C_{gm_g}] \quad (4.124)$$

$$[Y_G] = \text{diag} [-D_{g1}^1 - D_{g2}^2 \ \dots \ -D_{gm_g}^r] \quad (4.125)$$

Eşitlik 4.122' de bazı değişiklikler yapıldıktan sonra, aşağıdaki Eşitlik 4.126 elde edilebilir.

$$[Y'_{DQ}] \Delta V_{QD} = [P_G] [C_G] X_L \quad (4.126)$$

$$[Y'_{DQ}] = [Y_{DQ}] + [P_G \ Y_G \ Y_G^t] + [P_S \ Y_S \ Y_S^t] + [P_L \ Y_L \ Y_L^t] \quad (4.127)$$

Admitans matrisi, yalnızca diyagonal elemanları olan jeneratör, yük veya SVC'ye bağlı baralardaki eşitliği şu şekilde ifade edebiliriz:

$$\Delta V_G = [P_G]^t \Delta V_{QD} \quad (4.128)$$

ΔV_{QD} , Eşitlik 4.126' da yerine konulduğu zaman,

$$\Delta V_G = [P_G]^t [Y'_{DQ}]^{-1} [P_G] [C_G] X_G \quad (4.129)$$

Tüm jeneratör denklemleri ise,

$$\dot{X}_G = [A_G] X_G + [B_G] \Delta V_G + [E_G] U_c \quad (4.130)$$

Buradaki ifadede yer alan eşitlikleri tanımlanırsa,

$$[A_G] = \text{Diag} [A_{g1} \ A_{g2} \ ... \ A_{gm_g}] \quad (4.131)$$

$$[B_G] = \text{Diag} [B^r_{g1} \ B^r_{g2} \ ... \ B^r_{gm_g}] \quad (4.132)$$

$$[E_G] = \text{Diag} [E_{g1} \ E_{g2} \ ... \ E_{gm_g}] \quad (4.133)$$

$$U_c^t = [u_{c1}^t \ u_{c2}^t \ ... \ u_{cm_g}^t] \quad (4.134)$$

Eşitlik 4.129 ve 4.130 kullanılırsa jeneratör denkleminde yerine koyduğumuzda ise,

$$\dot{X}_G = [A_T] X_G + [E_G] U_c \quad (4.135)$$

$$[A_T] = [A_G] + [B_G] [P_G]^t [Y'_{DQ}]^{-1} [P_G] [C_G] \quad (4.136)$$

5. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

Optimizasyon, verilen bir problemde en iyi sonucu elde etmek için bir süreçtir. Optimizasyon, $f(x)$ fonksiyonunun belirli koşulları sağlayarak en iyi değerini bulma sürecidir. Bu tür problemlere optimizasyon problemleri denir ve genellikle sürekli optimizasyon ve ayrık optimizasyon olmak üzere iki gruba ayrılır.

Sürekli optimizasyon yönteminde karar değişkenleri serbestçe herhangi bir gerçek sayı alabilirken, ayrık optimizasyonda ise bu değişkenler belirli bir kümeden seçilen değerleri alırlar. Doğrusal olmayan fonksiyonların optimizasyonunda klasik matematiksel yöntemler genellikle türev ifadelerini içerir. Ancak, türev ifadelerinin hesaplanması zaman alıcı ve zorlayıcı olabilir, bu nedenle, bazı optimizasyon problemlerinde türev ifadelerinden kaçınılarak daha hızlı sonuçlar elde etmek için alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, doğal seçim süreçlerinden esinlenen ve iterasyona dayalı olarak çalışan algoritmaları içerir. (Cura, 2008)

Optimizasyon yöntemleri, evrimsel operatörler içeren mutasyon, çaprazlama ve yeniden üreme gibi tekniklerle başladı, ancak devamında ise canlıların besin bulma davranışlarına dayalı olarak popülasyon tabanlı ve sürü zekasına odaklanan optimizasyon algoritmaları geliştirildi. Bu sürülerin işlevleri, klasik yapay zeka kavramına yeni bir perspektif sundu. (Nabiyeve, 2010)

Sürü zekası, genellikle basit yapıya sahip ve özerk olarak hareket eden dağılmış ajanların karmaşık problemleri başarıyla çözebildiğini göstermiştir. Bu yaklaşım, merkezi kontrol mekanizması olmaksızın, ajanların yerel bilgiye dayanarak etkileşimde bulunduğu ve adaptif davrandığı sistemler üzerine kuruludur. Klasik yapay zeka ise daha merkezi ve planlı bir yaklaşıma sahiptir, karmaşık problemleri genellikle önceden belirlenmiş stratejilerle çözmeyi amaçlar. Sürü zekasının kolektif davranışlarından ilham alınarak yeni yapay zeka algoritmaları ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, farksal gelişim algoritması, yapay arı kolonisi algoritması ve önerilen elektrik balığı optimizasyonu gibi yapay zeka tekniklerinin güç sistem kararlığı problemlerinde kullanım yöntemleri incelenmiştir. Erken yakınsama, yüksek hesaplama karmaşıklığı ve yerel en küçüklere takılma gibi dezavantajları olan klasik teknikler, bu çalışmada ele alınan sezgisel yaklaşımların tercih edilmesine yol açmıştır.

5.1.Farksal Gelişim Algoritması

FGA, 1995'te Price ve Storn' un geliştirdiği popülasyon tabanlı bir optimizasyon tekniğidir. Sürekli verilerde etkin sonuçlar verir ve genetik algoritmaya dayanır. Genetik algoritmanın temel prensiplerine dayanmasına rağmen, FGA' de değişkenler gerçek değerlerle temsil edilir ve genetik operatörler (çaprazlama, mutasyon, seçim) kullanılır. Operatörler tüm popülasyona sırasıyla uygulanmazken; bunun yerine kromozomlar tek tek ele alınır ve yeni bireyler bu şekilde elde edilir. FGA'nin kodlaması kolaydır ve diğer optimizasyon tekniklerine göre daha az kod gerektirir. Çözümlerin kalitesi, amaç fonksiyonuna göre ölçülür. (Storn ve Price, 1997) (Karaboğa, 2004)

5.1.1. Farksal Gelişim Algoritması Terimleri

FGA' de kullanılan değişkenler sırasıyla ele alınırsa; N_p : Popülasyon büyüklüğü veya amaç vektör sayısı, D : Değişken sayısı veya amaç vektör sayısı, Cr : Çaprazlama Oranı $[0,1,1.0]$, G : Nesil $(1, 2, 3, \dots, Gmax)$, F : Ölçekleme faktörü, $x_{j,i,G}$: G neslindeki, i vektörünün j parametresi, $n_{j,i,G+1}$: Mutasyon ve çaprazlamaya tabi tutulmuş ara vektör, $u_{j,i,G+1}$: $x_{j,i,G}$ den bir sonraki nesil için üretilen vektör, $r_{1,2,3}$:Yeni vektörün üretilmesinde kullanılan rastgele seçilen değerler, $r_{1,2,3} \in \{1,2,3 \dots, N_p\}$ $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$, $x_{j,i}^{(l)}$, $x_{j,i}^{(u)}$: Değişkenlere ait alt ve üst sınır değerleri

5.1.2. Popülasyon Yapısı ve Parametre Sınırları

FGA, popülasyon büyüklüğünü gösteren sabit; NP ve D , bir amaç vektöründeki parametrelerin sayısını ifade eder. FGA paralel uygulandığında, mevcut ebeveyn popülasyonunu içeren bir dizi ve yeni vektörleri içeren gelecek nesli içeren başka bir dizi oluşturulur. Başlangıç amaç vektörleri, araştırma uzayından rastgele seçilir ve parametre sınırları geniş bir bölgeyi kapsar. Eğer başlangıçta başarılı bir çözüm belirlenmişse, algoritma bu sonuç etrafındaki dağılımı göz önünde bulundurarak amaç vektörlerini araştırmaya başlar. Başlangıç popülasyonu hesaplanırken uygun olmayan bir amaç vektörü reddedilmesi sonucu yeniden üretilir. Eğer bir parametre sınır değerlerini aşarsa, çeşitli yöntemlerle bu değer sınırlı bir değerle değiştirilebilir. (Karaboğa, 2004) (Storn ve Price, 1997) (Eke, 2011)

Başlangıç popülasyonu:

Her bir kromozoma ait gen sayısını probleme ait değişken sayısı D ile belirler. N_p , kromozom sayısını kullanıcı tarafından belirlendiğini ifade eder ve her zaman üçten fazla olmalıdır. Bu gereklilik, farksal gelişim algoritmasında mevcut kromozom dışında üç adet kromozoma ihtiyaç duyulması nedeniyle yeni kromozomların üretilir(r_1, r_2, r_3). Başlangıçta, N_p adet D boyutlu kromozomdan oluşan başlangıç popülasyonu (P_0), aşağıdaki Eşitlik 5.1 gibi üretilir: ($r_1, r_2, r_3, \dots, r_{NP}$), burada r_1, r_2 ve r_3 farklı kromozomları temsil eder. Bu başlangıç popülasyonu, FGA algoritmasının başlangıç aşamasında kullanılan temel popülasyonu oluşturur.

$$\forall i \leq N_p \wedge \forall i \leq D : x_{j,i,G=0} = x_j^{(1)} + rand_j[0,1] (x_j^{(u)} - x_j^{(l)}) \quad (5.1)$$

Başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra, belirtilen operatörler G_{max} sayısında algoritma uygulanarak tamamlanır. En iyi çözüm vektörü son jenerasyon için en yüksek uygunluk değerine sahip bireyi ifade eder. Algoritmanın tamamlanması, belirli bir iterasyon sayısına (G_{max}) ulaşıldığında veya belirli bir durum gerçekleştiğinde olur. (Aksoy, 2007) (Karaboğa, 2004)

5.1.3. Mutasyon

Mutasyon süreci, popülasyon içinden rastgele seçilen bir bireyin genetik bilgisine, rastgele seçilen iki vektör arasındaki ölçeklendirilmiş farkın eklenmesiyle gerçekleştirilir. Bu sürecin matematiksel ifadesi Eşitlik 5.2' de gösterilmiştir.

$$v_{i,G} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (5.2)$$

Bu durumda, r_1, r_2, r_3 $[1, NP]$ aralığında farklı tamsayı değerlerini temsil ederken, F ise 0' dan büyük ve $[0, 2]$ aralığında değişken bir ölçek faktörü kullanılır. Bu sebeple, her hedef vektör $x_{i,G}$ için yeni bir $v_{i,G+1}$ mutant vektörünün oluşturulmasıdır. Bu işlem için rastgele seçilen iki popülasyon bireyi $x_{r2,G}$ ve $x_{r3,G}$ nin farkı, yine rastgele seçilen üçüncü bir $x_{r1,G}$ vektörüne F ile ağırlıklandırılarak ilave edilerek mutant vektör oluşturulur. Yeni bir adayın oluşturulmasında mutasyona uğramış vektör kullanılır. Bir parametre, belirtilen aralığın dışına çıkarsa düzenlenir.

$$v_{i,G} < v_{i,G}^l \text{ ise } v_{i,G} = v_{i,G}^l \quad (5.3)$$

$$v_{i,G} > v_{i,G}^u \text{ ise } v_{i,G} = v_{i,G}^u \quad (5.4)$$

Mutasyon işlemi, ağırlıklı farklar kullanarak gerçekleştirilir ve temel vektörün ve farkı oluşturan vektörlerin seçimi önemlidir. Bu seçimde tekrarlanma ($r_1 = r_2$), algoritmanın performansını olumsuz etkileyebilir. Mutasyon şeması, çaprazlama ile birlikte algoritmanın temel unsuru olup, stratejiyi belirler. FGA için çeşitli mutasyon şemaları bulunmaktadır. (Aksoy, 2007) (Storn ve Price, 1997)

Klasik FGA:

$$v_{i,G} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (5.5)$$

Eşitlik 5.5, klasik FGA algoritması için kullanılan bir mutasyon şemasını temsil eder. Bu şema genellikle çaprazlama işlemi için binom dağılımını kullanır.

FGA\target-to-best\1\bin:

$$v_{i,G} = x_{i,G} + F \cdot (x_{opt,G} - x_{i,G}) + F \cdot (x_{r1,G} - x_{r2,G}) \quad (5.6)$$

Eşitlik 5.6, "FGA target-to-best/bin" notasyonu ile bilinen ve birçok araştırmacı tarafından tercih edilen bir mutasyon şemasını ifade eder. Bu mutasyon şemasında, baz vektör genellikle en iyi birey ile hedef vektör ($x_{i,G}$) arasında bir çizgi üzerinde yer alır. Bu süreçte genellikle binom dağılımlı çaprazlama işlemi kullanılır.

FGA\best\1\bin:

$$v_{i,G} = x_{opt,G} + F \cdot (x_{r1,G} - x_{r2,G}) \quad (5.7)$$

"FGA best/1/bin" şeması, en iyi bireyi baz vektör olarak seçer ve binom dağılımlı çaprazlama işlemiyle birleştirilir. Yakınsaması genellikle klasik FGA şemasından daha hızlı olabilir, ancak büyük parametre sayılarıyla başa çıkmakta zorlanabilir.

FGA\best\1\bin, tek biçimli titreşimle:

$$v_{i,G} = x_{opt,G} + F \cdot (x_{r1,G} - x_{r2,G}), F_j = k \cdot \text{ran}(0,1) + F, \quad (5.8)$$

$$k \in \mathbb{R}^+, k < 1$$

Eşitlik 5.8 şeması, "FGA best/1/bin" şemasına göre daha hızlı yakınsama sağlar ve "FGA best/1/bin, tek biçimli titreşimle" olarak adlandırılır. Bu şemada, sabit mutasyon

faktörü yerine dinamik bir mutasyon faktörü uygulanır. Dinamik mutasyon faktörü, $[0,1)$ aralığında rastgele elde edilen bir gerçel sayı ile birden çok küçük pozitif gerçel sayının çarpılmasıyla elde edilir. " FGA best/1/bin, tek biçimli titreşimle" için binom dağılımlı çaprazlama tercih edilir ve bu şema, parametre sayısı büyük olan problemler için uygun olmayabilir.

FGA \rand\1\bin, vektör başına titreme ile:

Aşağıdaki Eşitlik 5.9 gösterildiği üzere, mutasyon faktörü " FGA\best\1\bin", vektör başına titreme taklidi ile şemasında olduğu gibi dinamiktir.

$$v_{i,G} = x_{r0,G} + F_d \cdot (x_{r1,G} - x_{r2,G}), F_d = F + \text{ran}(0,1)(1 - F) \quad (5.9)$$

FGA \rand\1\bin, nesil başına titreme ile:

$$v_{i,G} = x_{r0,G} + F_d \cdot (x_{r1,G} - x_{r2,G}), F_d = F + \text{ran}(0,1)(1 - F) \quad (5.10)$$

Eşitlik 5.10 şema, "FGA\rand\1\bin", nesil başına titreme ile olarak adlandırılır. Bu şema, "FGA\rand\1\bin", nesil başına titreme ile şemasından farklı olarak, Dinamik mutasyon faktörü her nesil için, her bir vektör için değil, ayrı ayrı oluşturulur.

FGA\rand\1\bin: veya algoritması:

$$v_{i,G} = \left\{ \begin{array}{l} x_{r0,g} + F(x_{r1,g} - x_{r2,g}), \gamma < P_{mu} \\ x_{r0,g} + K(x_{r1,g} + x_{r2,g} - 2x_{r0,g}), \gamma > P_{mu}, K = P_{mu}(F + 1) \end{array} \right\} \quad (5.11)$$

Eşitlik 5.11 ifadeyi kullanan bir FGA algoritması, "FGA\rand\1\bin" veya "FGA\rand\1\bin" olarak adlandırılır. Burada P_{mu} mutasyon olasılığını, γ ise $[0,1)$ aralığında rastgele bir gerçel sayıyı ifade eder. Elde edilen sayı mutasyondan küçükse, klasik FGA mutasyonu uygulanır. Eğer elde edilen sayı mutasyondan büyük veya eşitse, FGA' deki klasik mutasyon faktörü yerine $K = P_{mu}(F + 1)$ olarak ifade edilen mutasyon faktörü kullanılır.

5.1.4. Çaprazlama

Çaprazlama aşamasında, mutasyon sonucu oluşturulan hedef vektör $x_{i,G}$ ve mutant vektörü $v_{i,G}$ kullanılması ile yeni bir deneme vektörü $u_{i,G+1}$ üretilir. Her bir parametre, C_r olasılığına göre mutant vektöründen seçilebilir ya da $(1-C_r)$ olasılığına göre mevcut hedef vektöründen seçilebilir. Rastgele bir sayı, C_r 'den büyükse, hedef vektörden

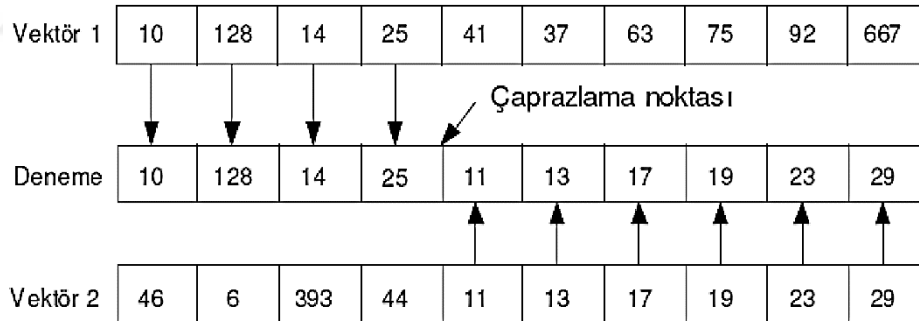
alınır; aksi halde gen mutant vektöründen alınır. En az bir gen mutant vektöründen seçilir. Sonrasında $[1, n]$ aralığında rastgele bir parametre indisi seçilir. Eğer bu indeks, işleme uğrayan parametre indisi ile aynıysa, bu gen veya parametre mutant vektöründen seçilir. Deneme vektörü $u_{i,G+1}$, Eşitlik 5.12 açıklanan hesaplama yöntemine göre bulunur. (Aksoy, 2007)

$$u_{i,j,G+1} = \begin{cases} v_{i,j,G} & \text{rand}(0,1) \leq C_r \text{ ya da } j = j_{rand} \\ x_{i,j} & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (5.12)$$

Çaprazlama işlemi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir; tek-nokta, N-nokta, üstel ve düzgün dağılımlı çaprazlama, bu yöntemler ele alınabilir.

Tek-nokta çaprazlama:

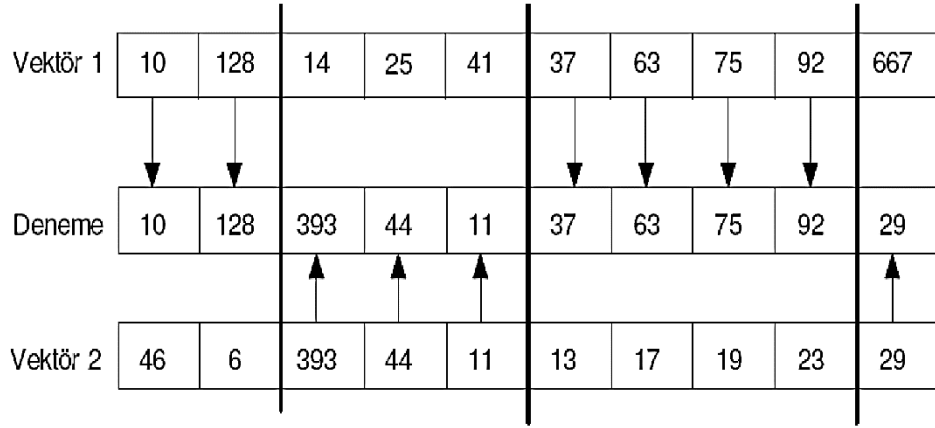
Çaprazlama noktasının solundaki parametreler birinci vektörden, sağındakiler ise ikinci vektörden alınır. Bu işlemle oluşturulan deneme vektörü, solundaki parametreleri içeren ilk vektörden ve sağındakileri içeren ikinci vektörden alır. Genellikle iki deneme vektörü oluşturulur. Çaprazlama noktasının sağındaki parametreler için bu durum tam tersidir.



Şekil 5.1. Deneme vektörü sürecini gösteren tek-nokta çaprazlama

N-nokta çaprazlama:

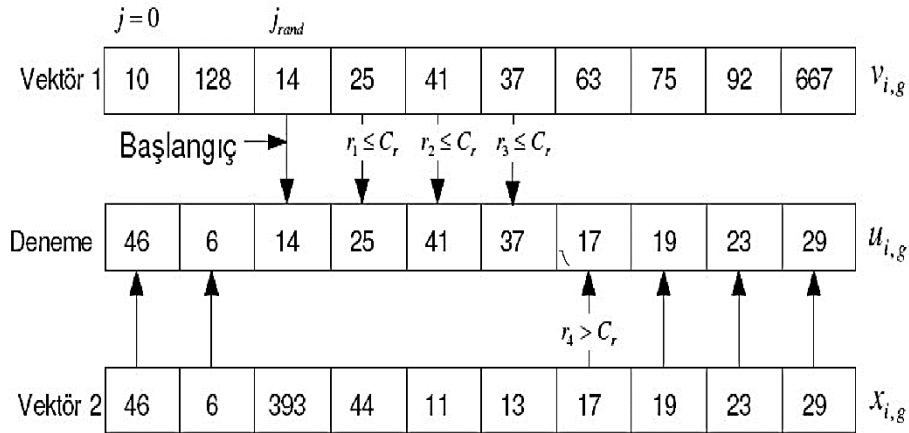
İki vektör, rastgele $n+1$ parçaya bölünür. Ardından, her parça sırasıyla farklı bir vektörden gelerek deneme vektörü oluşturulur. Şekil 5.2' de, 3-nokta çaprazlama yöntemi kullanılarak bu süreç gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Nokta çaprazlama ile deneme vektörünün oluşturulması

Üstel çaprazlama:

Parametreler rastgele seçilen birinci vektörden deneme vektörüne kopyalanır. Belirlenen çaprazlama olasılığı ile rastgele bir sayı karşılaştırılır. Eğer bu sayı çaprazlama olasılığından küçükse, parametreler 1. vektörden gelir, aksi halde 2. vektörden kopyalanır. Bu Şekil 5.3' de, üstel çaprazlama işlemiyle deneme vektörü oluşturulur.



Şekil 5.3. Üstel çaprazlama ile deneme vektörünün oluşturulması

Düzgün dağılımlı (binom) çaprazlama:

Rastgele seçilen bir parametre 1. vektörden deneme vektörüne kopyalanır. Belirlenen çaprazlama olasılığı ile [0,1] arasında rastgele bir sayı karşılaştırılır. Eğer bu sayı çaprazlama olasılığından büyükse, parametreler ikinci vektörden kopyalanır; aksi halde bütün parametreler birinci vektörden kopyalanır. Şekil 5.3, FGA için deneme vektörünün nasıl oluşturulduğunu üstel çaprazlama işlemiyle gösterir.

5.1.5. Uygunluk Fonksiyonu

Mutasyon ve çaprazlama operatörleriyle üç farklı kromozomdan deneme kromozomu oluşturuldu. Yeni jenerasyona ($G=G+1$) geçecek kromozom, uygunluk değerlerine göre belirlendi. Bilinen hedef kromozomun uygunluk değeri ile hesaplanacak olan $u_{i,G+1}$ 'e ait uygunluk değeri, problemin çözüm fonksiyonuna $u_{i,G+1}$ 'e ait tüm u_j değerleri verilerek kromozomun değeri hesaplanmasıyla elde edilir.

5.1.6. Seçim

Popülasyon tabanlı evrimsel algoritmaların başarılı sonuca yakınsaması için her nesilde popülasyonun güncellenmesi önemlidir. Seçim operatörü, mevcut ve yeni vektörleri değerlendirir ve yeni nesli oluşturur. Turnuva seçimi, rastgele seçilen vektör çiftleri arasında yarışma yaparak yeni neslin üyelerini belirler. Diğer bir yöntem olan evrim stratejisi, en iyi performans gösteren üyelerin gelişimine izin verir. DE seçiminde, yeni vektör ebeveyninden daha gelişmiş değilse, ebeveyn bir nesil daha popülasyonda kalır. Başka bir yöntem ise yaş ve amaç fonksiyonu değeri tabanlı seçimdir. İyi bir amaç fonksiyon değerine sahip bir deneme vektörü, bir sonraki popülasyon için seçilir. Klasik FGA' de, bu işlem şu şekilde gerçekleşir: Deneme vektörü oluşturulduktan sonra $u_{i,G}$ ve $x_{i,G}$ vektörleri arasından amaç fonksiyonu değeri daha iyi olan vektör, sonraki neslin bireyi olarak seçilir. Seçilen $u_{i,G}$ kendisiyle kıyaslanan $x_{i,G}$ vektörünü yenmişse, kendisi onun yerini alır; aksi durumda $x_{i,G}$ vektörü popülasyonun bireyi olarak en az bir nesil daha kalır. Eşitlik 5.13' de bu işlem gösterilmiştir.

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G} , & f(u_{i,G}) \leq f(x_{i,G}) \\ x_{i,G} , & f(u_{i,G}) > f(x_{i,G}) \end{cases} \quad (5.13)$$

Elitist bir seçim kriteri, genel en iyi çözüme ulaşabilme yeteneği olan bir kriterdir. Yaş ve amaç fonksiyonu değeri seçimi, elitist bir kriter olarak kabul edilir. Bu, kazanmış bir vektörün, kaybeden bir başka vektörden kötü olmasına rağmen, popülasyonun yerel en iyi çözümünü korumasını sağlar. Bu tür bir seçime ayrıca "birebir seçim" denir. (Karaboğa, 2004) (Storn ve Price, 1997)

5.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Doğadaki arılar, yiyecek kaynaklarından nektar toplama, bilgi ileten danslar yapma ve diğer arıların bilgilerini kullanarak daha verimli yiyecek kaynaklarına ulaşma işlemlerini doğal olarak gerçekleştirirler. Bu tür etkileşimlerden ilham alınarak geliştirilen YAK, 2005 yılında Derviş Karaboğa tarafından önerilmiş bir popülasyon tabanlı meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, bal arılarının yiyecek arama davranışını taklit ederek çalışır ve doğal bir seçim süreci izler.

5.2.1. Gerçek Arıların Yiyecek Arama Davranışları

İş bölümüne dayalı görevler arasında belirli bir uzmanlık bulunur. Bu, arıların merkezi bir otorite olmaksızın kendi aralarında iş dağılımını organize edebilme yeteneğine dayanır. İş bölümü ve sürü zekası, bu organizasyonun temel öğeleridir. Tereshko'nun reaktif difüzyon denklemlerine dayalı kolektif zeka modeli, yiyecek arama işleminin temel bileşenlerini üç ana kısımda tanımlar: Yiyecek kaynakları, belirli görevlerde uzmanlaşmış işçi arılar ve görevi belirsiz işçi arılar bu basit modelde yer alır. Bu bileşenler, bir yiyecek kaynağını terk etme ve kaynağa yönelme durumlarını içerir. (Akay, 2009) (Tereshko, 2000)

i) Yiyecek Kaynakları: Arıların polen, nektar ve bal elde etmek için ziyaret ettikleri yerlerdir. Bir kaynağın değeri, çeşitli faktörlere bağlı olarak belirlenir. Ancak genellikle kaynağın zenginliği sadece tek kriter olarak ele alınır.

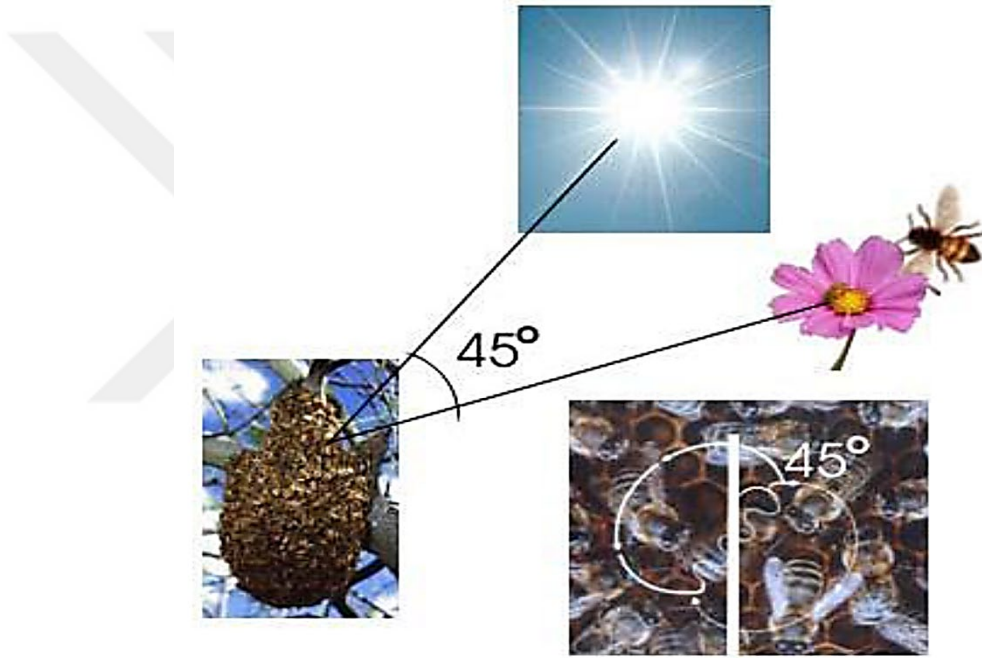
ii) Görevi Belirli İşçi Arılar: Önceden keşfedilen belirli kaynaklarda, işçi arılar nektarı kovana taşır ve ziyaret ettikleri kaynak hakkında bilgi paylaşırlar.

iii) Görevi Belirsiz Arılar: Nektar toplamak için arama yapan arılardır. İki tür görevi belirsiz arı vardır: kaşif arılar, rastgele kaynak arayışında olanlar ve gözcü arılar, diğer arılar tarafından paylaşılan bilgiyi kullanarak yeni kaynaklara yönelenler. Kaşif arıların oranı genellikle %5-10 arasındadır.

Arılar arasında bilgi paylaşımı, dans alanı adı verilen bir alanda gerçekleşir. Dans eden arı, diğer arıların antenleriyle dokunarak kaynağın tat ve kokusu hakkında bilgi alır. Bu dans, daha fazla arının ziyaret etmesi için kovandaki farklı alanlarda gerçekleştirilir. Dansın belirleyicisi genellikle nektarın tatlılığıdır ve dans eşiği olarak bilinir. Ancak, nektarın kolay çıkarılabilirliği de önemlidir. Kovandan uzaklık, çiçek nektarının kıvamı, hava koşulları ve günün zamanı gibi faktörler de dansı etkiler.

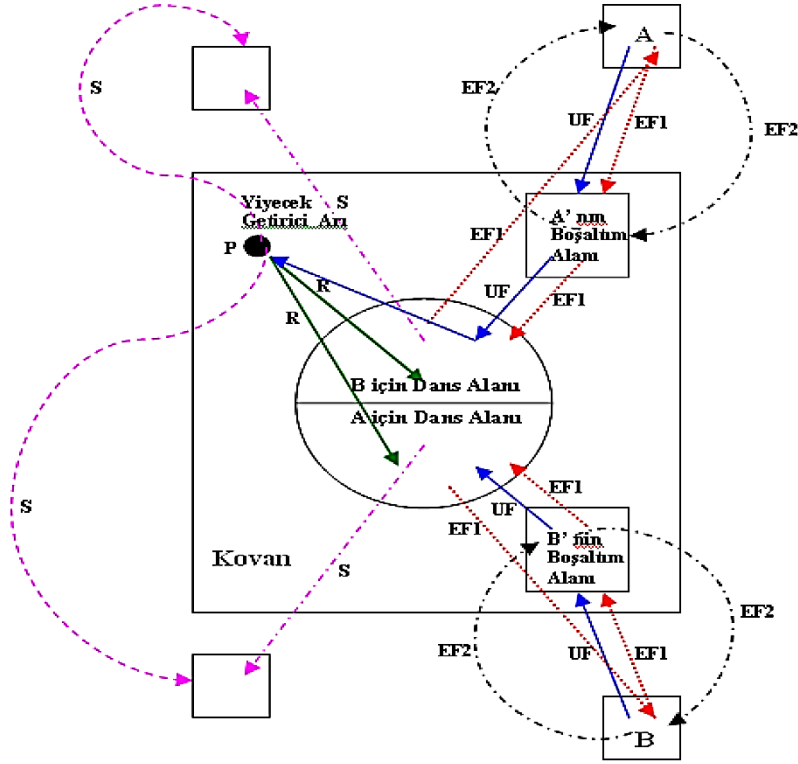
Yiyecek toplayıcılar, uzak bir kaynağa yönlendirilirken yön bilgisini paylaşırlar. Yön bilgisi aldıktan sonra genellikle güneşin konumu kullanılır. Arılar, bileşik gözleri sayesinde güneşin konumunu algılayabilirler ve enerji tüketimlerini düzenlemek için farklı uçuş yüksekliklerini ayarlayabilirler.

Arılar, kovanlarından uzak yiyecek kaynakları bulmak için farklı dans türleri kullanırlar. Daire dansı, belirli bir yiyecek kaynağının mesafesini ve yönünü gösterirken, kuyruk dansı kaynağın uzaklığına göre yönlendirme sağlar. Titreme dansı, zengin bir nektar kaynağının bulunduğunu ve fazla nektarın geldiğini bildirir. Nektar kaynağının uzaklığı hakkında bilgiyi kuyruk dansının tekrarlanma sayısı verir ve geniş bir alandaki kaynaklarla ilgili bilgi aktarımında kullanılır. (Akay, 2009)



Şekil 5.4. Arılarda dans

Dans alanında tüm zengin kaynaklarla ilgili bilgiler gözcü arılara iletilir. Gözcü arılar, farklı dansları izledikten sonra tercihlerini belirlerler. Daha fazla bilgi aktarımı olan zengin kaynakların seçilme olasılığı artar. Yiyecek arayıcıların davranışlarını anlamak için, Şekil 5.5'te verilen modelin incelenmesi önemlidir. Arılar için A ve B gibi keşfedilmemiş iki olası seçenek vardır. Bu durumda arılar, potansiyel bir yiyecek arayıcısı olarak görevi belirsiz işçi arı olarak hareket eder ve kovanın etrafındaki kaynakların konumlarından habersiz şekilde hareket eder. (Akay, 2009) (Winston, 1988)



Şekil 5.5. Yiyecek arama çevrimi

Bu arı, ya bir kaşif arısı olarak yiyecek aramaya başlayabilir (S ile gösterilir), ya da kuyruk danslarını izleyen bir gözcü arı olarak dansla anlatılan kaynağa yönelebilir (R olarak gösterilir).

Arı, gittiği kaynağı bırakarak bağımsız izleyici olur (UF ile gösterilir), gittiği nektara dönmeden önce dans eder ve kovandaki arkadaşlarını da aynı nektara yönlendirebilir (EF1 ile gösterilir), veya diğer arıları yönlendirmeden kaynağına gider (EF2 ile gösterilir).

Arıların kaynak arama sürecinde eşzamanlı olmadığına dair belirtmek önemlidir. Yeni arıların yiyecek aramaya katılma olasılıkları, o anda yiyecek arama sürecinde olan arıların sayısından çıkarılarak hesaplanır. Bu, arıların kendi kendine örgütlenme yeteneğini açıklar: (Holland ve Melhuish, 1999)

-Salınımlar: Kaynak bulmak için kaşif arılar tarafından rastgele arama yapılır.

-Pozitif geri bildirim: Nektar miktarı arttıkça, o kaynağı tercih eden gözcü arıların rakamı da artar.

-Çoklu etkileşimler: Yiyecek kaynaklarıyla hakkındaki bilgiyi arılar tarafından kuyruk dansı ile paylaşırlar.

-Negatif geri bildirim: Tüketilen kaynaklar terk edilir.

Bu YAK algoritmasının temel aldığı modeldeki süreç adımları şu şekildedir:

- i) Kaynak arama sürecinin başlangıç kısmında, kaşif arılar rastgele olarak nektar kaynaklarını keşfetmek için araştırmalara başlarlar.
- ii) Kaynaklar keşfedildikten sonra, kaşif arıları görevli arılara dönüşürerek buldukları yiyeceklerden kovana nektar taşırlar. Kovana döndüklerinde her bir görevli arı, nektarı boşaltırlar. Sonrasında, buldukları kaynağa geri dönerler ya da kaynakla ilgili dans aracılığıyla bilgiyi kovanda bekleyen gözcü arılara aktarırlar. Kaynakları tükenirse, görevli arılar tekrar kaşif arıları haline döner ve yeni yiyecek arayışına başlarlar.
- iii) Gözcü arılar kovanda beklediklerinde ise kuyruk danslarını izlemeleri sonucu zengin kaynakları belirler ve dansın sıklığına göre bir kaynağı tercih ederler. (Karaboğa, 2005)

5.2.2. Başlangıç Yiyecek Kaynağı Bölgelerinin Üretilmesi

Algoritma, çalışmaya başlamak için arama uzayındaki sonuçlara göre rastgele kaynak yerlerini belirlerler. Bu süreçte, parametrelerin tamamı için belirlenen alt ve üst sınırlar değerleri arasında rastgele üretilmesi Eşitlik 5.14' de gösterilmiştir.

$$x_{ij} = x_j^{min} + rand(0,1)(x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (5.14)$$

Burada, $i = 1 \dots SN$, $j = 1 \dots D$, D ise optimize edilecek parametre sayısı ve SN yiyecek kaynağıdır. x_j^{min} , j. parametrenin alt sınırını, x_j^{max} ise j. parametrede üst sınırını ifade eder. Aynı zamanda, başlangıçta her bir kaynağın geliştirilememe sayısını gösteren *failure* i ile sayaçları da sıfırlanır.

YAK algoritması, başlangıç sürecinden sonra yiyecek kaynaklarını kaşif arı, gözcü arı ve görevli arı süreçlerinden geçirerek iyi bir çözüm bulmaya çalışır. Algoritmanın durdurma faktörü ise, hedeflenen maksimum çevrim sayısı ile birlikte kabul edilen bir hata değeri veya farklı optimizasyon algoritmalarında standart durdurma kriteri olarak belirlenebilir.

5.2.3. İşçi Arıların Yiyecek Kaynağı Bölgelerine Gönderilmesi

Kaynakların bir görevli arısı olduğundan, görevli arıların sayısı kaynaklarının sayısına eşittir. İşçi arılar, çalıştıkları kaynakların komşuluğunda yeni kaynak keşfeder ve bu

kaynağın kalitesini hesaplarlar. Eğer bulunan kaynak daha iyiye, bu kaynağı işçi arı hafızasına alır. Yeni bulunan kaynağın mevcut kaynak komşuluğunun belirlenmesi aşağıdaki Eşitlik 5.15 ile tanımlanır: (Karaboga ve Basturk, 2007)

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (5.15)$$

Her x_i kaynağı için, çözümün tek bir parametresi olan kaynağın x_i komşuluğunda v_i kaynağı bulunabilir. Denklemden, $[1,D]$ aralığında rastgele üretilen j bir tam sayıdır. Rastgele üretilen j parametresi değiştirilirken, yine rastgele üretilen x_k komşu sonucunun ($k \in \{1,2 \dots SN\}$) j . parametresi ile mevcut kaynağın j . parametresinin farkları alındığında $[-1,1]$ arasında rastgele üretilen ϕ_{ij} sayısı ile tanımlandıktan sonra, elde edilen değer mevcut kaynağın j . parametresine ilave edilmektedir. Eşitlik 5.15' den anlaşıldığı gibi x_{ij} ve x_{kj} çözümler arasındaki fark azaldıkça, yani benzerleştikçe, x_{ij} parametredeki değişim değeri de azalacaktır. Bu sayede değişim miktarı adaptif olarak azalması sonucu bölgesel optimal çözüme yaklaşılmaktadır. Buradaki işlem sonucunda üretilen v_{ij} , daha önce belirlenmiş parametre sınırlarını aşarsa, j . parametrenin alt veya üst sınır değerlerine ulaşmaktadır.

$$v_{ij} = \begin{cases} x_j^{min}, & v_{ij} < x_j^{min} \\ v_{ij}, & x_j^{min} \leq v_{ij} \leq x_j^{max} \\ x_j^{max}, & v_{ij} > x_j^{max} \end{cases} \quad (5.16)$$

Sınırlar dahilinde elde edilen v_i parametre vektörü yeni bir yiyecek kaynağını temsil ederek bu vektörün kalitesi hesaplanması ile bir uygunluk değeri atanır.

$$fitness_i = \begin{cases} \frac{1}{1+fitness_i}, & fitness_i \geq 0 \\ 1 + abs(fitness_i), & fitness_i < 0 \end{cases} \quad (5.17)$$

Bu kısımda $fitness_i$, v_i çözümün maliyet değeri ile nektar miktarı arasında bir bağlantı kurulmaktadır. Greedy (açgözlü) bir seçim işlemi x_i ve v_i arasında nektar miktarını dikkate alarak çözümün uygunluk değerlerine dayanarak uygulanır. Eğer yeni kaynağı bulunan v_i çözümü daha iyi ise, görevli arı eski yiyecek kaynağının yerini alır ve hafızasını günceller. Aksi halde, görevli arı çözümü geliştiremediği sürece x_i kaynağına devam eder ve bu durumda bir geliştirememeye sayacı ($failure_i$) artar; başarılı bir geliştirme durumunda ise sayacı sıfırlanır. (Akay, 2009) (Karaboga ve Basturk, 2007)

5.2.4. Gözcü Arıların Olasılık Değerlerinin Hesaplanması

Görevli arılar, yeni kaynakların yiyecek miktarıyla ilgili bilgiyi dans aracılığıyla gözcü arılara aktarıldığında, bu bilgileri kullanarak yiyecek kaynaklarının durumunu değerlendirir. Bu yöntem, YAK' nin çoklu etkileşim gösteren bir örneğini sunar. Olasılıksal seçim, uygunluk değerlerine dayanır ve rulet tekerleği gibi yöntemlerle gerçekleştirilir. Bu tekerlekte her dilim, bir kaynağın diğerlerine göre seçilme olasılığını temsil eder.

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_i^{SN} fitness} \quad (5.18)$$

Bu durumda $fitness_i$, "i" kaynağının kalitesini ifade eden "SN" görevli arı sayısını temsil etmektedir. YAK' deki bu pozitif geri besleme özelliği, kaynağın nektar miktarının artmasıyla (uygunluk değerinin artmasıyla) daha fazla gözcü arının bu kaynağı seçme olasılığının artmasıyla ortaya çıkar. (Karaboga ve Basturk, 2007)

5.2.5. Gözcü Arıların Yiyecek Kaynağı Bölgesi Seçmeleri

Eğer üretilen rastgele sayı p_i , belirlenen olasılık değerinden büyükse, bu kaynak bölgelerinde gözcü arılar yeni bir sonuç üretir. Yeni çözüm değerlendirilerek eski çözümle karşılaştırılır. Eski çözüme göre yenisi daha iyi ise, yeni kaynak yerine alınır ve geliştirememeye sayacı sıfırlanır. Aksi takdirde, eski kaynak korunarak $failure_i$ bir artırılır. Bu yapılan işlem, yiyecek kaynağı bölgelerine yönelik tüm gözcü arılar dağılana kadar sürecektir.

5.2.6. Kaynağı Bırakma Kriteri: Limit ve Kaşif Arı Üretimi

Arıların her birisi için bir yiyecek kaynağından faydalanıp faydalanamadığı, yani gittiği yiyeceğin nektarı tükendiğinde, $failure_i$ belirli bir eşik değerinin üzerindeyse, görevli arı başka bir çözüm aramalıdır. Bu durumda, yeni bir çözüm arama süreci başlayarak görevli arı kaşif arı haline gelir. Bu eşik değeri, YAK algoritmasının belirleyici bir parametresi olan limit ile adlandırılır. YAK algoritmasında, her devirde yalnızca bir kaşif arının ortaya çıkmasına uygun görülür. (Akay, 2009)

5.2.7. Seleksiyon Mekanizmaları

Dört farklı seleksiyon YAK algoritmasında kullanılır:

i) Global olasılık temelli seleksiyon: Potansiyel iyi kaynakların belirlenmesi için kullanılır.

ii) Bölgesel olasılık temelli seleksiyon: Gözcü arılar, bilgileri kullanarak bir bölgede kaynağın bulunmasına yardımcı olur.

iii) Açgözlü seleksiyon: Daha iyi olan kaynağı belirlenmesi için işçi ve gözcü arıların kullandığı bir seçme yöntemidir.

iv) Rastgele seleksiyon: Kaşif arılar tarafından kullanılan ve denklemler ile uygulanan rastgele seçim işlemidir.

Dört seçim yönteminin bir arada kullanılması, YAK algoritmasının hem geniş global araştırma yapabilmesini hem de bölgesel araştırmalarda etkili olmasını sağlar.

5.3.Elektrik Balığı Optimizasyon Algoritması

Elektrik balıkları, zayıf görme yeteneklerine sahip olmalarına rağmen, elektrolokasyon yeteneklerini kullanarak çevrelerini algılamak için elektrik alanlarını kullanırlar. Bu yetenekleri, hem yakın çevrelerindeki avları veya engelleri algılamak hem de daha geniş bir alanda avlanmak veya yönlerini belirlemek için kullanırlar. Bu yeteneklerin modellenmesi, elektrik balıklarının çevrelerini algılama ve avlanma stratejilerini anlamamıza yardımcı olabilir.

EFO, Şen ve Yılmaz tarafından 2020'de geliştirilen sürü tabanlı bir optimizasyon tekniğidir. Bu teknik, doğal bir sürü içindeki bireyler arasındaki etkileşimleri ve adaptasyonu temel alır. Bu özellikleri ile algoritma olarak kullanılması sonucu karmaşık optimizasyon problemlerini çözmeye çalışır. EFO'nun, elektrolokasyon yeteneklerini modelleme veya günümüzdeki karmaşık problemleri çözme bağlamında kullanılıp kullanılamayacağını belirlemek için daha fazla araştırma yapılması gerekebilir. (Yılmaz, 2020)

5.3.1. Elektrik Balıkları

Elektrik balıkları, 30.000'den fazla balık türünden sadece %1,2'sini oluşturur ve genellikle gece aktiftirler. Görme duyuları sınırlıdır, bu nedenle elektrolokasyon yeteneklerine güvenirler. Elektrolokasyon, av ve engellerin yerini tespit etmelerine yardımcı olan özel bir duyu yeteneğidir.

Bu balıkların elektrik alanı üretmek için özel elektrik organları vardır. Elektrosit adı verilen bu hücreler, beyinden gelen komutlarla eş zamanlı olarak elektrik alanı oluşturur. Elektro-Otomatik Deşarj (EOD) adı verilen bir uyarılma ile karakterizedir. EOD'nin frekansı, ardışık iki elektrik sinyali arasındaki aralıkla ters orantılıdır.

Güçlü elektrik balıkları avlanmak için elektrolokasyon yeteneğini kullanırken, zayıf olanlar çevrelerini algılamak ve avlarını bulmak için kullanır. Güçlü olanların elektrik alanları 10 ile 600 V arasında değişirken, zayıf elektrik balıklarının ürettikleri elektrik alanları birkaç yüz milivolt ve birkaç volt arasındadır.

Elektrik balıkları, elektrik üretebilme (elektrojenik) ve elektrik algılama (elektro-alıcı) özelliklerine sahiptir. Bu özellikleri kullanarak, kendi türlerinin organlarından veya diğer organizmalardan yayılan elektrik akımlarını algırlar. Aynı zamanda elektrik alanı oluşturarak elektrokomünikasyon adı verilen bir iletişim yöntemi kullanırlar. Bu şekilde, elektrik balıkları kimliklerini, cinsiyetlerini, hiyerarşideki durumlarını, çevrelerini ve yiyeceklerin varlığını diğerleriyle iletişim kurarak paylaşırlar. Elektrolokasyon, EOD (Elektro-Otomatik Deşarj) aktivitesine bağlı olarak aktif ve pasif olmak üzere iki kategoride incelenir. (Yılmaz, 2020)

5.3.2. Elektrik Balıklarında Sürü Zekası

Elektrik balıklarında sürü zekası, dört ana bileşenle sağlanır:

- i) Olumlu Geri Bildirim: Uygun davranışları teşvik eder. Örneğin, bir elektrik balığı av kaynağına yaklaştığında daha yüksek EOD frekansı üreterek aktif avlanır ve diğer balıkları bölgeye çeker.
- ii) Olumsuz Geri Bildirim: Dengeleyici bir rol oynar ve doyumluktan, bitkinlikten ve rekabetten kaçınmaya yönlendirir. Örneğin, bir balık uzak bir av kaynağına ulaştığında sessizleşir ve kendi türdeşini çekmez.
- iii) Dalgalanmalar: Yeni çözümlerin keşfedilmesini sağlar ve yaratıcılığı teşvik eder. Örneğin, bir karınca sürüsündeki toplayıcılar yeni besin kaynakları keşfetmek için yeni yollar bulabilirler.
- iv) Çoklu Etkileşimler: Bilgi alışverişini sağlar. Elektrik balıkları, birbirleriyle iletişim kurarlar ve diğer organizmalardan gelen elektrikselsel uyarıları algırlar. Elektrokomünikasyon, bu tür etkileşimlerin bir örneğidir.

5.3.3. EFO Algoritması

EFO'nun temelinde, elektrik balıkları davranışlarından ilham alınarak tasarlanmış bir çerçeve bulunur. Bu çerçeve, basit arama operatörlerini kullanır ve algoritmanın işleyişini belirler.

İlk olarak, algoritma, elektrik balıkları davranışlarını modellemek için varsayımları kullanır. Arama uzayında sonsuz bir besin kaynağı olduğu ve en iyi besin kaynağının tek bir nokta olarak kabul edildiği bir model benimsenir. Her bir birey, elektrik balıklarına karşılık gelir ve bir konum bilgisini taşır. Bireylerin kalitesi, en iyi besin kaynağına olan uzaklıklarına göre belirlenir ve en iyi kaynağı bulma problemine dönüştürülür.

Diğer bir doğal evrimden esinlenen varsayım ise, uzun süre boyunca yüksek kaliteli kaynaklara sahip olan bireylerin daha hızlı büyüyebileceği ve dolayısıyla daha yüksek oranda üreyebileceğidir. Bu, elektrik balıklarının akıllı davranışlarını modellemek için kullanılır. Örneğin, en iyi besin kaynağına yaklaşmak için aktif elektrolokasyon sırasında daha sık elektrik sinyalleri üretme davranışı sergilerler. Bu davranışın amacı, daha iyi uygunluk değerlerine sahip bireyler üzerinden yerel arama yaparak çevrelerini daha iyi arayabilmektir.

Elektrik balığının akıllı davranışları aşağıdaki şekilde modellenmiştir:

Aktif Elektrolokasyon: Elektrik balıkları, en iyi besin kaynağına yaklaşırken sık elektrik sinyalleri üretir. Bu, aktif elektrolokasyonun kısıtlı menzilini dengeleyerek daha iyi uygunluk değerlerine sahip bireyler üzerinden yerel arama yapmayı sağlar. Bu sayede, çevre daha etkili bir şekilde araştırılabilir.

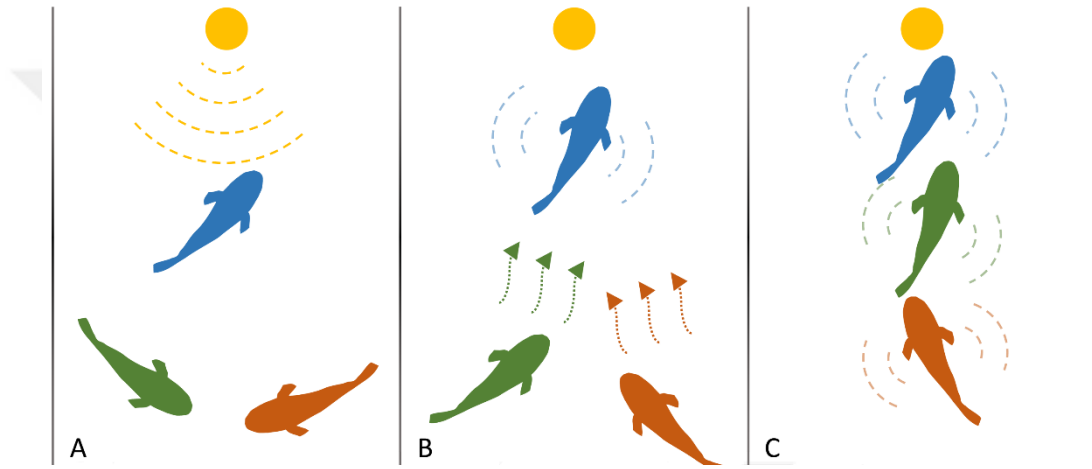
Pasif Elektrolokasyon: Diğer balıklar, elektrik alanı oluşturmazlar; bunun yerine, türdeşlerinin veya çevredeki canlıların yaydığı elektrik sinyallerine güvenirlir. Pasif elektrolokasyon, aktif elektrolokasyona göre daha geniş bir aralığa sahiptir ve bireylerin uzak bölgeleri keşfetmelerine ve boşlukları doldurmalarına olanak tanır.

EOD Frekansı: Elektrik alanının frekansı, kaynağa yakınlıkla ilişkilidir. En iyi kaynağa yakın olan balıkların EOD frekansı diğerlerinden daha yüksektir. Bu, her bireyin rolünü belirlemede kritik bir role sahiptir. Daha yüksek frekans, aktif elektrolokasyonu tercih eden bireyleri işaret ederken, diğerleri pasif elektrolokasyonu tercih eder.

EOD Genliği: Elektrik alanının genliği, balığın boyutuyla doğrudan ilişkilidir. EOD genliği, EFO algoritmasında elektrik alanlarının baskınlığını belirleme yeteneğinden dolayı kullanılmıştır. Ayrıca, bireylerin küresel aramada algılanma olasılığını belirlemek ve etkili menzili belirlemek için de kullanılmıştır. (Yılmaz, 2020)

5.3.4. Başlangıç Popülasyonu

Elektrik balıkları popülasyonu (N) veya bireyler, arama alanı içinde rastgele dağıtılır. Bu dağılım, belirli sınırlar içinde yer alan bireylerin, elektrik balıklarının yaşadığı çevreyi temsil ettiği bir modeli oluşturur. Bu yerleşim, elektrik balıklarının doğal davranışlarını taklit etmeyi ve arama stratejilerini simüle etmeyi amaçlar.



Şekil 5.6. Balık sürüsünde av tespiti ve iletişim

A) Mavi balıklar sinyalleri algılar. B) Yüksek frekansta sinyallere geçerek aktif moda geçer ve yayımlar. C) Yeşil ve kahverengi balıklar, türdeşlerinin sinyallerini pasif modda algılar ve kaynağa doğru hareket eder.

$$x_{ij} = x_{minj} + \emptyset(x_{maxj} - x_{minj}) \quad (5.19)$$

Buradaki x_{ij} , $|N|$ büyüklüğündeki popülasyondaki i 'inci bireyin d boyutlu arama uzayındaki konumunu temsil eder ($i = 1, 2, \dots, |N|$). j boyutu için sınırlar x_{minj} ve x_{maxj} olarak belirlenmiştir. Burada $j \in 1, 2, \dots, d$ olup, $\emptyset \in [0, 1]$ ise düzgün bir dağılımdan çekilmiş rastgele bir değeri temsil eder.

Popülasyondaki bireyler, aktif veya pasif davranışlar sergileyerek arama uzayında hareket ederler. Elektrolokasyon yetenekleri, başlatma aşamasından hemen sonra devreye girer ve EFO algoritması tarafından keşif ve kullanım dengesini sağlamak için yönetilir.

EFO algoritması, doğadaki gibi, yüksek frekansa sahip bireylerin aktif elektrolokasyon kullanmasını öngörürken, diğer bireylerin pasif elektrolokasyon kullanmasını bekler. Bir bireyin frekans değeri, minimum f_{min} ' den maksimum f_{max} 'e kadar değişir. Bu frekans değeri (f_i^t), elektrik balığının t zamanındaki durumu ile ilişkilidir ve besin kaynağına yakınlığına bağlı olarak bireyin uygunluk değeri türetilir.

$$f_i^t = f_{min} + \left(\frac{fit_{worst}^t - fit_i^t}{fit_{worst}^t - fit_{best}^t} \right) (f_{max} - f_{min}) \quad (5.20)$$

" fit_{worst}^t " ve " fit_{best}^t " ifadeleri, genellikle bir optimizasyon algoritmasının performansını değerlendirmek için "en kötüsü" ve "en iyi" uygunluk değerleri, mevcut popülasyondaki bireylerin t yinelemesinde elde edilen uygunluk değerlerini temsil eder. fit_i^t , t yinelemesindeki i' inci bireyin uygunluk değeridir. Ayrıca, frekans değerleri f_{min} ve f_{max} , bu çalışmada bir olasılık için kullanıldığı hesaplamada f_{min} ve f_{max} sırasıyla 0 ve 1 olarak ayarlanır.

Elektrik balıklarında, frekansın yanı sıra genlik bilgisi de önemlidir. Aktif elektrolokasyon yapan balıkların algılanma olasılığı, elektrik alanının gücünün mesafenin küpü ile ters orantılı olduğu için genlik bilgisi hayati öneme sahiptir. Bireyin genliği, önceki genliklerin ağırlığına bağlı olarak hesaplanır ve genellikle keskin bir şekilde değişmediği için i' inci genlik değeri A_i , bireysel bir Eşitlik 5.21 kullanılarak hesaplanır.

$$A_i^t = \alpha A_i^{t-1} + (1-\alpha) f_i^t \quad (5.21)$$

α , [0,1] aralığında bir sabit değer olup, önceki genlik değerinin büyüklüğünü belirleyen bir katsayıdır. EFO'da, i'inci bireyin başlangıç genlik değeri kendi başlangıç değerine ayarlanır.

Balıkların frekans ve genlik değerleri, en iyi av kaynağına olan yakınlığına bağlıdır. Her yinelemede, popülasyon, her bireyin frekans değerine göre iki gruba ayrılır: aktif elektrolokasyon (N_A) yapan bireyler ve pasif elektrolokasyon yapanlar (N_P) (yani $N_A \cup N_P = N$). Bu ayırım, bireylerin frekanslarının düzgün dağılmış rastgele değerlerle karşılaştırılmasıyla yapılır. Yani, bireyin frekans değeri ne kadar yüksekse, o bireyin muhtemelen aktif elektrolokasyon gerçekleştireceği düşünülür. Arama işlemi N_A ve N_P bireyleri tarafından paralel bir şekilde gerçekleştirilir. (Yılmaz ve Sen, 2020)

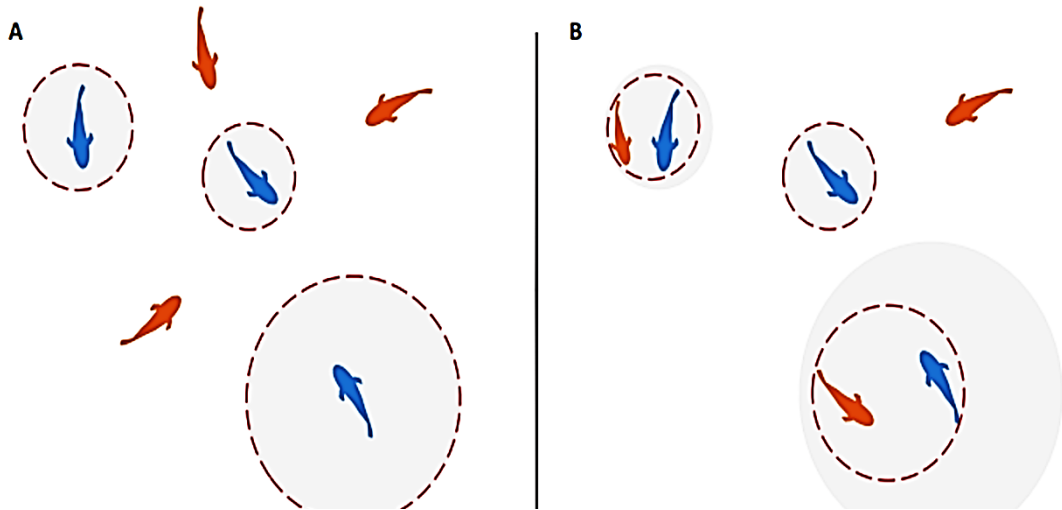
5.3.5. Aktif Elektrolokasyon

Balıkların etkin elektrolokasyon aralığı, genellikle yarıya kadar sınırlıdır, bu da dışarıdaki avı algılayamayacakları anlamına gelir. Bu yetenek, potansiyel besin kaynaklarını bulmalarına yardımcı olur. EFO'nun yerel arama yeteneği, aktif elektrolokasyon özelliklerine dayanır.

İsteğe bağlı arama, 'keşfet ve ardından kullan' ilkesine katkıda bulunur ve EFO'nun daha sonraki yaklaşımını şekillendirir. Bireyler başlangıçta birbirlerinden uzak olduğundan, aktif menzilde olma olasılıkları düşüktür. Bu nedenle, başlangıçta kendi mahallelerinde rastgele aramalar yaparlar ve iterasyonlar ilerledikçe en yakın komşularını bulmaya başlarlar. İkinci bir bireyin (r_i) aktif aralığı, kendi genlik değeri (A_i) tarafından belirlenir ve EFO'daki aktif aralık hesaplaması Eşitlik 5.22' de verilmiştir. Bu hesaplama, doğadaki etkileşimlerin bir yansıması olarak EFO' nun aktif aralığını tanımlar.

$$r_i = (x_{maxj} - x_{minj}) A_i \quad (5.22)$$

Algılayıcı/aktif aralıktaki komşu bireyleri ($S \mid S \subset N$) bulmak için, i'inci birey ile popülasyonun geri kalanı (yani $N \setminus \{i\}$) arasındaki mesafenin ölçülmesi gereklidir. i ve k bireyleri arasındaki mesafe, Kartezyen mesafe hesaplaması kullanılarak belirlenir.



Şekil 5.7. EFO' nun yerel arama gösterimi

Aktif modda olan bir birey, ya bir yere hareket eder (A) veya çevresindeki aktif menzilde (A) veya arama bölgesi (B) içindeki komşuların varlığına bağlı olarak hareket eder.

$$d_{ik} = \|x_i - x_k\| = \sqrt{\sum_{j=1}^d (x_{ij} - x_{kj})^2} \quad (5.23)$$

Aktif algılama alanında en az bir komşunun bulunması durumunda EFO eşitliği kullanılır; aksi takdirde (yani $S = \emptyset$), eşitliği kullanılır.

$$x_{ij}^{cand} = x_{ij} + \varphi (x_{kj} - x_{ij}) \quad (5.24)$$

Burada k , i 'inci bireyin komşu kümesinden rastgele seçilen bir bireyi temsil eder (yani $k \in S$ ve $d_{ik} \leq r_i$).

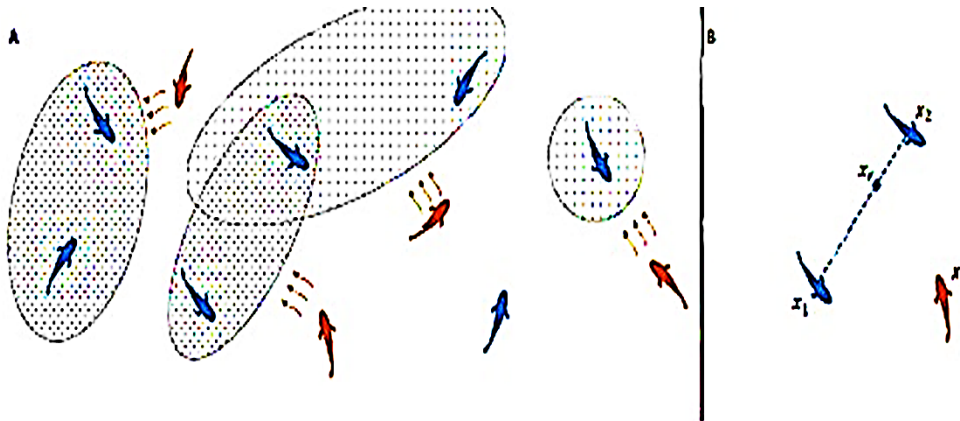
$$x_{ij}^{cand} = x_{ij} + \varphi r_i \quad (5.25)$$

Eşitlik 5.25, $\varphi \in [-1, 1]$, düzgün bir dağılımdan üretilen rastgele bir sayıdır ve x_{ij} , i 'inci bireyin aday konumunu temsil eder. (Yılmaz ve Sen, 2020)

5.3.6. Pasif Elektrolokasyon

Pasif elektrolokasyonda, algılama mesafesi bireye bağlı değildir ve aktif elektrolokasyonun ötesine geçebilir. Bu yetenek, EFO algoritmasının küresel arama veya keşif gereksinimlerini karşılamak için kullanılır.

Algılama olasılığı, sinyalin genlik değeri ve hedef bireye olan mesafesiyle doğru orantılıdır. Pasif moddaki bireyler, aktif moddaki diğer bireylerin sinyallerini seçer ve konumlarını değiştirirler. Bu, pasif elektrolokasyonun, bireyler arasında etkileşime dayalı bir keşif ve hareket mekanizması olduğunu gösterir.



Şekil 5.8. EFO' nin küresel arama gösterimi

Aktif moddaki k ' inci bireyin (yani $k \in N_A$) i 'inci tarafından algılanma olasılığı, pasif moddaki birey (yani $i \in N_P$) tarafından Eşitlik 5.26 kullanılarak hesaplanır.

$$p_k = \frac{A_k/d_{ik}}{\sum_{j \in N_A} A_j/d_{ij}} \quad (5.26)$$

Eşitlik 5.26' dan görüldüğü gibi, Pasif elektrolokasyon, genlik ve mesafeye dayalı seçim mekanizmaları kullanır, benzer şekilde Yerçekimi Arama ve Ateşböceği Algoritmaları gibi. Başlangıçta, bireyler keşif yapmak için komşuları seçer, bu yeni bölgelerin keşfedilmesine katkıda bulunur. Yineleme ilerledikçe, genlik daha baskın hale gelir ve en iyi bireyler yerel arama için seçilir. Rulet çarkı gibi stratejiler kullanılarak, bireyler seçilir ve yeni konumlar belirlenir. K bireylerin eşitliğine göre N_A ' dan seçilmesini sağlar ve ardından bir referans konumu (x_{rj}) temel alınarak eşitliğe göre belirlenir. Daha sonra, yeni bir konum eşitliği aracılığıyla oluşturulur.

$$x_{rj} = \frac{\sum_{k=1}^K A_k x_{kj}}{\sum_{k=1}^K A_k} \quad (5.27)$$

$$x_{ij}^{new} = x_{ij} + \varphi(x_{rj} - x_{ij}) \quad (5.28)$$

EFO, aktif elektrolokasyon gibi birden fazla parametreyi değiştirme özelliğine sahiptir, bu da arama alanının daha hızlı keşfedilmesini sağlar. Ancak, nadiren yüksek frekanslı bir bireyin pasif elektrolokasyon yapması gibi istenmeyen durumlar olabilir, bu da bireyin konum bilgisinin kaybolmasına neden olabilir. Bu tür durumları önlemek için, EFO denklemi bireylerin hangi parametrelerinin değiştirileceğini belirler. Bu denklem, bir bireyin tüm özelliklerini değiştirmesinin olasılığını azaltarak istenmeyen durumlara düşme riskini önler ve EFO'nun daha etkili çalışmasını sağlar.

$$x_{ij}^{cand} = \begin{cases} x_{ij}^{new} & rand_j(0,1) > f_i \\ x_{ij} & else \end{cases} \quad (5.29)$$

Burada $rand_j(0,1)$, j'inci parametre için üretilen tekdüze bir rastgele sayıdır. Pasif elektrolokasyonun son adımı, i' inci bireyin bir parametresini kullanarak değiştirmektir. Bir özelliğin değişme olasılığını artırmak için Eşitlik 5.30 kullanılır.

$$x_{ij}^{cand} = x_{minj} + \varphi(x_{maxj} - x_{minj}) \quad rand(0,1) \leq rand(0,1) \quad (5.30)$$

Burada $rand(0,1)$, düzgün bir dağılımdan üretilen rastgele bir sayıdır. Eğer i' inci bireyin j' inci parametre değeri arama uzayının sınırlarını aşarsa, aştığı alanın sınırına taşınır. (Yılmaz ve Sen, 2020)

$$x_{ij}^{cand} = \left\{ \begin{array}{ll} x_{minj} & x_{ij}^{cand} < x_{minj} \\ x_{ij}^{cand} & x_{maxj} > x_{ij}^{cand} > x_{minj} \\ x_{maxj} & x_{ij}^{cand} > x_{minj} \end{array} \right\} \quad (5.31)$$

5.3.7. Arama Stratejisi

İyi bir denge, keşif ve kullanım özellikleri arasında, bir algoritmanın genel verimliliği ve performansı için kritik bir faktördür. Çünkü çok fazla keşif yapmak, optimal çözüme yaklaşmak için gereksiz yere zaman harcanmasına ve performansın düşmesine neden olabilir. Ancak, keşif ve sömürü arasında uygun bir denge sağlamak, algoritmanın hedeflenen sonuca daha etkili bir şekilde ulaşmasını sağlar.

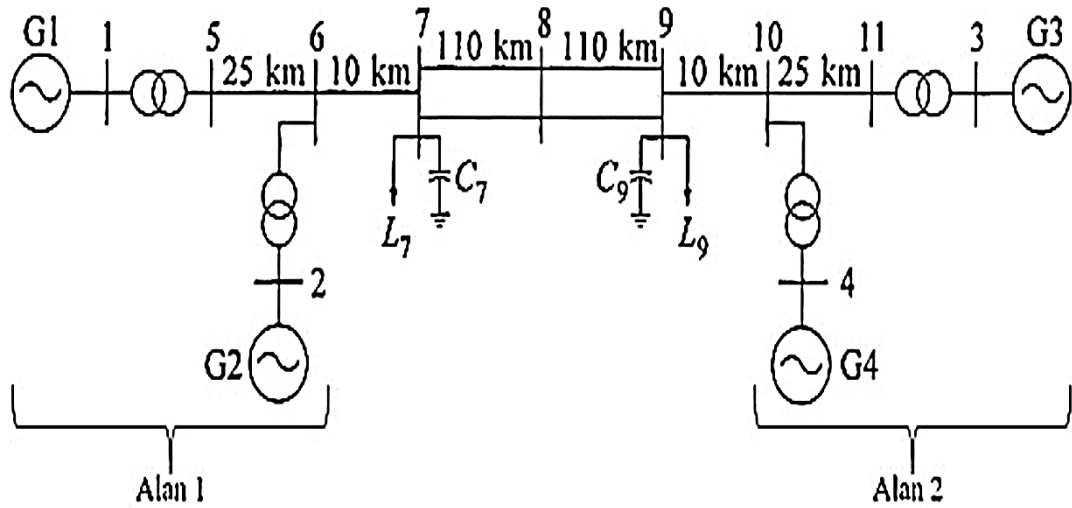
EFO'da, bireyler arasında frekansa dayalı mod belirleme, daha iyi bireylerin sömürü yapmasını sağlarken diğer bireylerin keşif yapmasına olanak tanır. Aktif moddaki bireyler, gelecek vadeden bölgelere (yerel ve global optimum) daha yakın konumda bulunurken, pasif moddaki bireyler, başlangıçta daha uzak olan elit olmayan bireyleri seçer. Bu, EFO'nun hem görünmeyen bölgeleri keşfetmesine hem de optimal çözüme daha hızlı yaklaşmasına yardımcı olur. Arama ilerledikçe, aralarındaki mesafeler nedeniyle elit bireylerin seçilme olasılığı artar. Bu durum, genlik değerinin belirlenmesinde baskın olmalarını sağlar ve EFO'nun sömürü yeteneğini artırır. Bu strateji, algoritmanın daha iyi bir denge sağlamasına ve hem keşif hem de sömürüyü etkili bir şekilde birleştirmesine yardımcı olur. (Yılmaz, 2020)

6. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Matlab simülasyon çalışmalarıyla güç sistemlerinin rotor açısal kararlılığı, yapay zeka alt kategorisi olan sezgisel yöntemlere dayalı optimizasyon algoritmalarıyla incelenmiştir. Geçici kararlılığın sağlanabilmesi için güç sistemine eklenen GSD'lerin KPSS, T_w , T_1 ve T_2 parametreleri, FGA, YAK ve önerilen EFO tabanlı algoritmalar kullanılarak belirlenmiştir. Genellikle amaç fonksiyonu belirli bir kritere ulaştığında veya maksimum iterasyona ulaştığında bu algoritmalar sona erer. Amaç fonksiyonları, çeşitli şekillerde belirlenir ve algoritmaların temel unsurlarından biridir. Uygun olmayan bir amaç fonksiyonu kullanmak, çözümü oldukça basit problemleri dahi algoritmanın yakınsamasını engelleyebilir.

6.1.İki Bölgeİ Dört Jeneratörlü Güç Sistemi Parametreleri

Şekil 6.1' de gösterilen iki bölgeİ dört jeneratörlü güç sistemi, büyük güçlerin düşük frekanslı elektromekanik salınımlarını detaylı bir şekilde incelemek üzere özel olarak tasarlanmıştır. Bu çift bölgeİ test sistemi, güç sistemi kararlılığı üzerine yapılan çalışmalarda kullanılmaktadır. (Kundur, 1994)



Şekil 6.1. İki bölgeİ dört jeneratörlü kundur modeli

Güç sistemi, birbirine bağlı iki bölgeden oluşmaktadır. Her bir bölgede, 900 MVA güce ve 20 kV gerilime sahip 2 adet jeneratör bulunmaktadır. Aşağıdaki Çizelge 6.1' de, bu jeneratörlerin nominal gerilim ve güç bazında p.u. cinsinden parametre değerleri verilmiştir:

Çizelge 6.1. Jeneratör parametreleri

$X_d = 1.8$	$X_q = 1.7$	$X_l = 0.2$	$X'_d = 0.3$	$X'_q = 0.55$
$X''_d = 0.25$	$X'_q = 0.25$	$R_a = 0.0025$	$T'_{d0} = 8.0 \text{ s}$	$T'_{q0} = 0.4 \text{ s}$
$T''_{d0} = 0.03 \text{ s}$	$T''_{q0} = 0.03 \text{ s}$	$A_{sat} = 0.015$	$B_{sat} = 9.6$	$\psi_{T1} = 0.9$
$H = 6.5 (G1 \text{ ve } G2 \text{ için})$		$H = 6.175 (G3 \text{ ve } G4 \text{ için})$		$K_D = 0$

1-5, 2-6, 3-11 ve 4-10 numaralı baralar arasında yükseltici transformatörler bulunmaktadır. Her bir transformatörün 20/230 kV ve 900 MVA güç gerilim bazında empedansı $0+j0.15$ p.u. 'dur. İletim hatlarının nominal gerilimi 230 kV'dir. Bu hatların 230 kV gerilim ve 100 MVA güç bazında parametreleri Çizelge 6.2' de gösterilmiştir:

Çizelge 6.2. İletim hattı parametreleri

$$r = 0.0001 \text{ pu/km} \quad x_L = 0.001 \text{ pu/km} \quad b_c = 0.00175 \text{ pu/km}$$

Güç sistemi, iki alan arasında 400 MW aktif güç ileten jeneratörler içermektedir. Bu jeneratörlerin yüklenme değerleri aşağıdaki Çizelge 6.3' de gösterilmiştir:

Çizelge 6.3. Jeneratör değerleri

G1	$P = 700 \text{ MW}$	$Q = 185 \text{ MVar}$	$E_t = 1.03 \angle 20.2^\circ$
G2	$P = 700 \text{ MW}$	$Q = 235 \text{ MVar}$	$E_t = 1.01 \angle 10.5^\circ$
G3	$P = 719 \text{ MW}$	$Q = 176 \text{ MVar}$	$E_t = 1.03 \angle -6.8^\circ$
G4	$P = 700 \text{ MW}$	$Q = 202 \text{ MVar}$	$E_t = 1.01 \angle -17.0^\circ$

7 ve 9 numaralı baralardaki yükler ile şönt kapasitörlerin sağladığı reaktif güç değerleri aşağıdaki Çizelge 6.4' de sunulmuştur:

Çizelge 6.4. Şönt kapasitör değerleri

Bara 7	$P_L = 967 \text{ MW}$	$Q_L = 100 \text{ MVar}$	$Q_C = 200 \text{ MVar}$
Bara 9	$P_L = 1,767 \text{ MW}$	$Q_L = 100 \text{ MVar}$	$Q_C = 350 \text{ MVar}$

Bu araştırmada, güç sistemi üzerinde rotor açısı kararlılığının incelenmesinde, Kundur'un iki alanlı dört jeneratörlü parametreleri kullanılarak sezgisel algoritmalar yöntemi ile analiz edilmiştir. Bu alışma, güç sistemi kararlılığı üzerine yapılan araştırmalara katkı sağlamayı hedeflemektedir.

6.2.Güç Sistemi Dengeleyicisi Parametreleri

Düşük-frekanslı salınımlarda sönümleme sağlayarak sistemi kararlı hale getirmek için bir G Sistemi Dengeleyicisi geliştirilmiştir. Bu dengeleyici, giriş sinyalinin değişikliklerine göre dört farklı grupta incelenir. Bu alışma, güç sistemlerinin kararlılığını artırmaya yönelik bir adım olarak değerlendirilebilir. Bu çalışmada kullanılan $\Delta\omega$ (Hız Değişimi) temelli G Sistemi Dengeleyicisinde; birim başına kazanç K_{PSS} , temizleyici filtre zaman sabiti T_w , faz kompanzasyonu ilerleme/gecikme türevi zaman sabitleri T_1 ve T_2 ' dir.

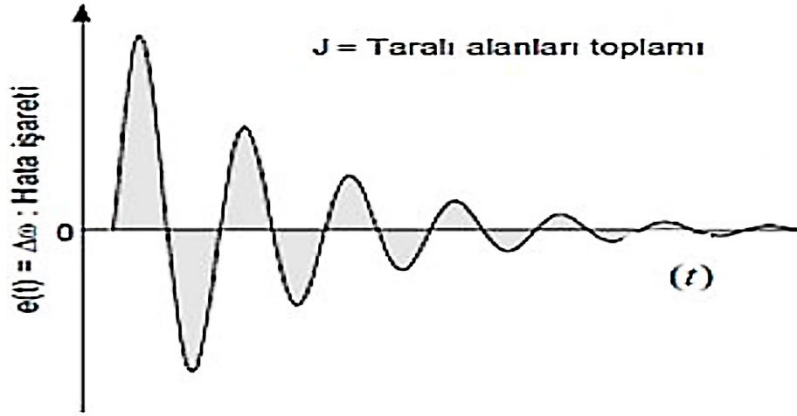
Çizelge 6.5. GSD parametreleri

GSD Parametreleri	K_{pss}	$T1$	$T2$	T_w
Alt Limit	1	0.001	1	1
st Limit	50	0.01	10	30

6.3. Amaç Fonksiyonu

Güç sistem dengeleyicisinin parametre değerleri, genellikle optimizasyon algoritmaları kullanılarak belirlenir. En iyi optimizasyon sonucuna ulaşılabilmesi için amaç fonksiyonunun doğru bir şekilde belirlenmesi gereklidir. Literatürde, amaç fonksiyonunun belirlenmesinde kullanılan çeşitli fonksiyonlar bulunmaktadır. Bunlar arasında hata karelerinin toplamı (ISE), mutlak hatanın toplamı (IAE), zamana bağlı mutlak hatanın toplamı (ITAE), zamana bağlı hata karelerinin toplamı (ITSE) gibi fonksiyonlar önerilmiştir. Ayrıca, zamana bağlı hata değerinin karesinin toplamı (ITS2E) gibi fonksiyonlar da önerilmiştir. Bu fonksiyonların denklemleri aşağdaki Eşitlik 6.1' de gösterilmiştir. (Cengiz ve Kaya, 2019)

$$\begin{aligned}
 IAE &= \int_0^{\infty} |e(t)| dt & ITAE &= \int_0^{\infty} t |e(t)| dt & ITSE &= \int_0^{\infty} te^2(t) dt \\
 ISE &= \int_0^{\infty} e^2(t) dt & ITS2E &= \int_0^{\infty} (te(t))^2 dt
 \end{aligned} \tag{6.1}$$



Şekil 6.2. Hata işaretinin zamana göre değeri

Bu amaç fonksiyonları, güç sistemi dengeleyicisinin parametrelerini optimize etmek için kullanılan algoritmalar tarafından kullanılır. Bu optimizasyon süreci, güç sistemlerinin daha verimli, kararlı ve güvenilir hale getirilmesine yardımcı olur.

FGA, YAK ve EFO gibi sezgisel algoritmaların kullanımında, amaç fonksiyonlarının çeşitli biçimlerde tanımlanması mümkündür ve en iyi sonuçları elde etmek için bu fonksiyonların doğru bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Bu algoritmaların amaç fonksiyonları genellikle aşağıdaki gibi tasarlanır:

$$\text{Minimize} \quad IAE_1 + IAE_2 + IAE_3 + IAE_4 \quad (6.2)$$

GSD Parametre Aralıkları,

$$K_{PSS}^{MIN} \ll K_{PSS} \ll K_{PSS}^{MAX}, \quad (6.3)$$

$$T_W^{MIN} \ll T_W \ll T_W^{MAX}, \quad (6.4)$$

$$T_1^{MIN} \ll T_1 \ll T_1^{MAX}, \quad (6.5)$$

$$T_2^{MIN} \ll T_2 \ll T_2^{MAX} \quad (6.6)$$

Verilen amaç fonksiyonu, güç sistem dengeleyicisi parametre ayarları için kullanıldığında, parametrelerin optimizasyonunu sağlamak için aşağıdaki gibi bir Eşitlik 6.7' de sunulmuştur:

$$\text{MINİMİZE} \quad J_{KPSS TW T_1 T_2} = \int_0^t \Delta\omega(t)dt \quad (6.7)$$

6.4.Güç Sisteminde Kısa Devre Durumları

Güç sistemlerindeki arızalar genellikle iki türe ayrılır: dengeli arızalar ve dengesiz arızalar. Dengeli arızalar genellikle üç hat arasında kısa devre veya üç faz arasında toprağa kısa devre olarak meydana gelir. Dengeli arızalar nadir olsa da iletim hatlarında meydana gelebilecek en ciddi arıza türlerindendir. L-G, L-L-G, L-L gibi simetrik olmayan arızalar veya dengesiz arızalar olarak adlandırılır. Oluşan arızaların sıklığına göre; L-G, L-L, L-L-G ve simetrik arızalar Şekil 6.3' te gösterilmiştir. İletim hatlarında en yaygın arıza türü hattın toprağa arızadır. (Machowski vd., 1997)

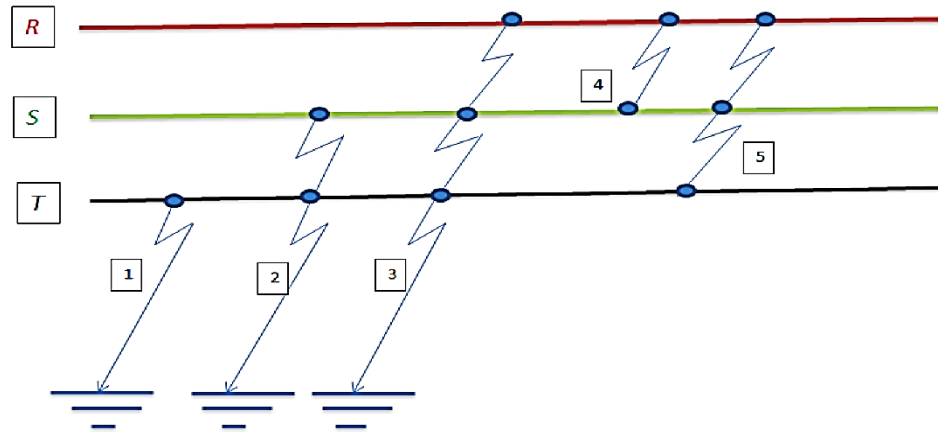
Durum 1=Faz Toprak Hatası(L-G)

Durum 2=İki Faz Toprak Hatası(L-L-G)

Durum 3=Üç Faz ve Toprak Hatası(L-L-L-G)

Durum 4=İki Faz Hatası(L-L)

Durum 5=Üç Faz Hatası(L-L-L)



Şekil 6.3. Kısa devre durumları

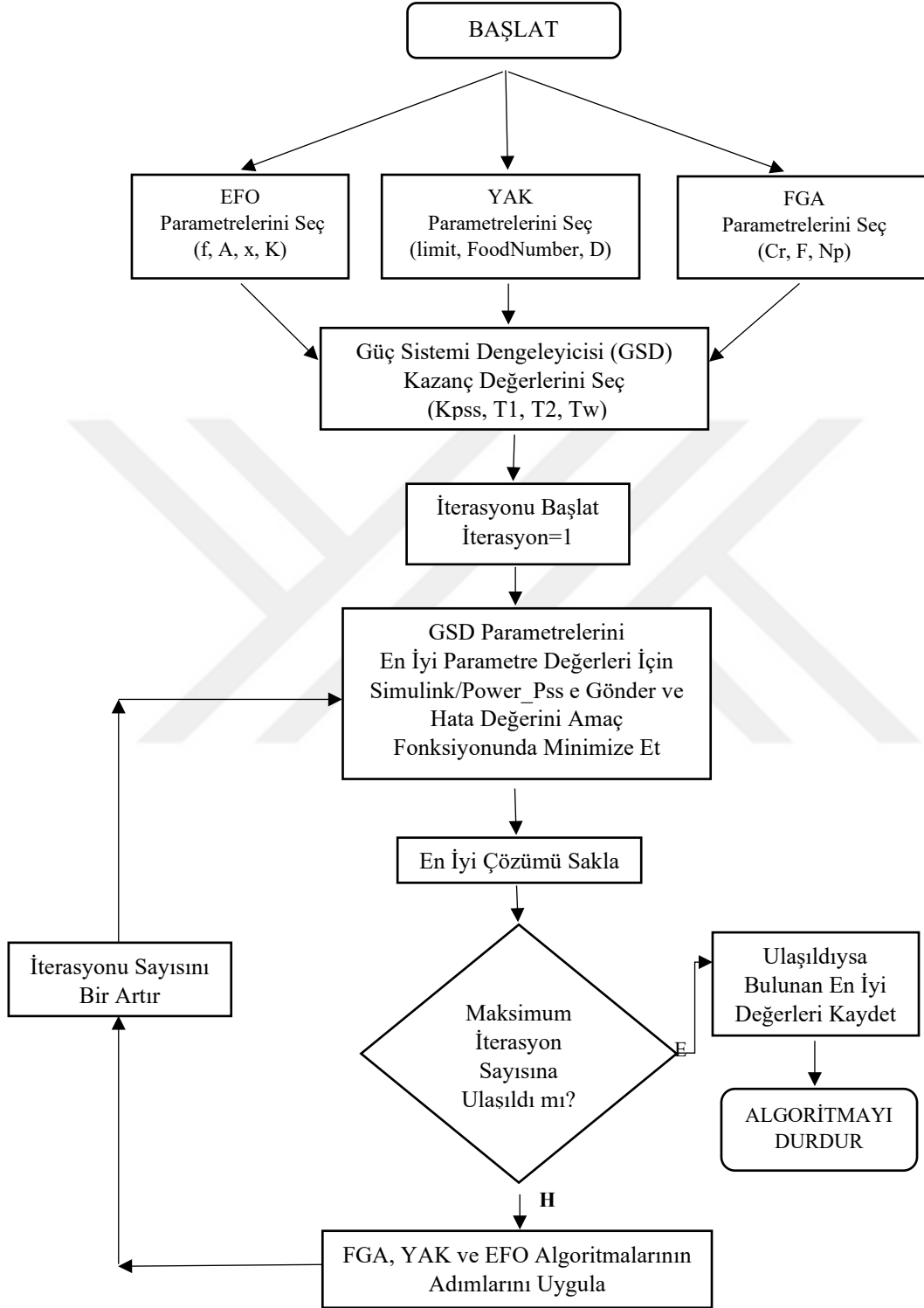
6.5.Güç Sisteminde Yük Değişim Durumları

Tüm çalışmalar için yük durumları Çizelge 6.6' da dikkate alınmıştır.

Çizelge 6.6. Yük değişim durumları

HAFİF YÜK	NOMİNAL YÜK	AGIR YÜK
Durum 6	Durum 7	Durum 8
Aktif gücünün toplamında %20 düşüş	Nominal aktif güç	Aktif gücünün toplamında %10 artış
Reaktif gücünün toplamında %15 düşüş	Nominal reaktif güç	Reaktif gücünde toplamında %5 artış

6.6. Sezgisel Yöntemler İle GSD Parametre Ayarı



Çizelge 6.7. Algoritmalarda (YAK, FGA ve EFO) kullanılan değişkenler

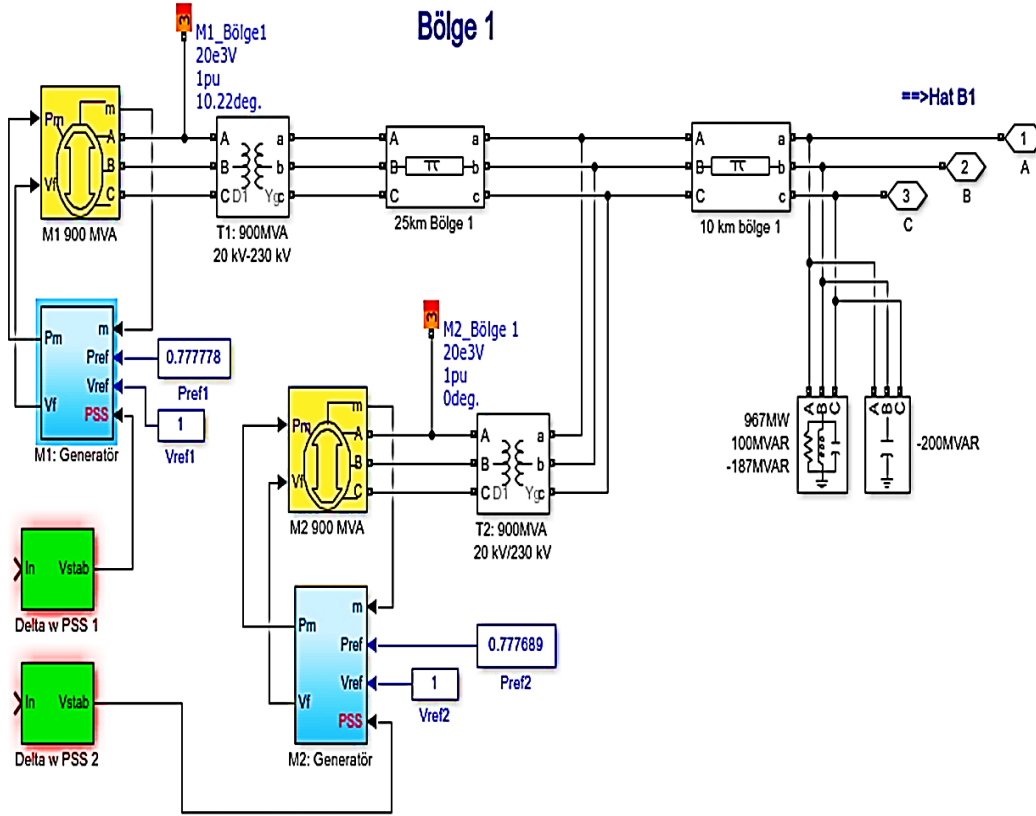
Popülasyon Sayısı	10
Boyut/Parametre Sayısı	16
EFO Maximum Frekans(x)	0.989
EFO Genlik Değeri (A)	0.00001
EFO Alt Popülasyon değeri (K)	10
YAK Limit	10
YAK Yiyecek Kaynak Sayısı	10
FGA Ölçeklendirme Faktörü(F)	0.85
FGA Çaprazlama Oranı(Cr)	0.8
İterasyon Sayısı	5

EFO, YAK ve FGA algoritmaları değişkenleri Çizelge 6.7’ de belirtilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan optimizasyon algoritmalarının MATLAB yazılım kodları, FGA algoritması için EK-1, YAK algoritması için EK-2 ve önerilen EFO algoritması için EK-3 'te sunulmuştur.

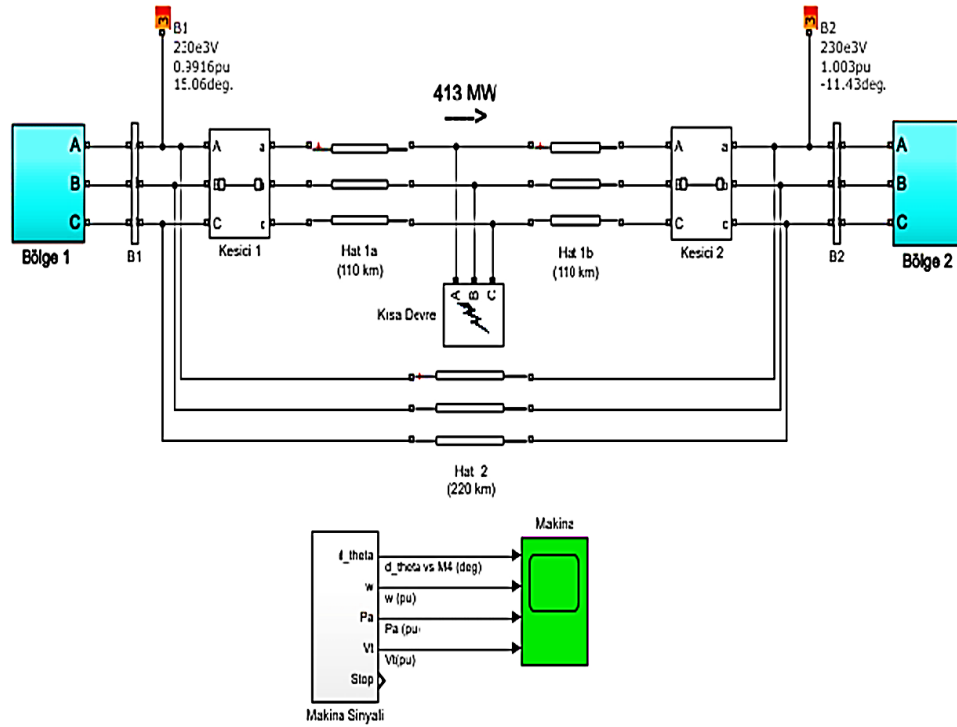
MATLAB Simulink, dinamik sistemler ve makinelerin özelliklerini incelemek ve hızlıca sistemler oluşturmak için kullanılan güçlü bir araçtır. Özellikle güç sistemleri alanındaki araştırmalarda Simulink yaygın olarak tercih edilir. MATLAB Simpower, güç sistemleri tasarımı ve kararlılık değerlendirmesi için özel olarak geliştirilmiş bir kütüphanedir. Bu çalışmada, iki bölge ve dört jeneratörlü bir iletim sistemi modeli kullanılmış ve MATLAB/Power_PSS ile geçici kararlılık analizi ve farklı türdeki arızaların modellenmesi gerçekleştirilmiştir.

GSD blok diyagramları, algoritmalar tarafından elde edilen en iyi değerlerle güncellenmiş ve jeneratörlere ek sinyaller gönderilerek kararlılık süreçleri gözlemlenmiştir. Her bir bölgede bulunan iki jeneratör ve bunların GSD diyagramları Şekil 6.4 ve 6.5' da verilmiştir. GSD blok diyagramındaki parametreler (K_{pss} , T_1 , T_2 , T_w) için en iyi değerler algoritma tarafından atanmıştır. Rotor hızı sinyali, algoritmanın temel amacı olan hata değerini minimize etmek için kullanılmaktadır.

Model, MATLAB'ın kendi modeli olmasına rağmen, en iyi sonuca ulaşmak için bu değişiklikler yapılmıştır. İki bölgede bulunan toplam dört GSD parametresi, her bir bölgede iki adet GSD diyagramı için ayrı ayrı ayarlanmıştır. Güç sistemi parametreleri, Kundur'un iki bölge ve güç sistemi değişkenleri kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 6.4. Matlab/PSS_Power tek bölgeli modeli



Şekil 6.5. Matlab/PSS_Power iki bölgeli modeli

7. UYGULANAN TEKNİKLERİNİN SONUÇLARI

7.1. Simülasyon Sonuçları

Sezgisel algoritmalarla gerçekleştirilen simülasyon ile kısa devre koşullarında ortaya çıkan hata sonuçları çizelgelerde gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. FGA uygulanan güç sistemi dengeleyicisi parametreleri kısa devre sonuçları

FGA GSD	GSD	KPSS	T1	T2	TW	IAE	ITAE	ISE	ITSE	ITS2E
DURUM 1 (L-G)	1	1,0000	0,0010	6,7313	1,0000	20,0441	200,3873	20,0884	200,7756	2676,5167
	2	12,6198	0,0100	1,0000	30,0000	20,0439	200,3880	20,0880	200,7769	2676,5411
	3	1,0000	0,0100	1,0000	17,9321	20,0425	200,3866	20,0851	200,7743	2676,5187
	4	6,1501	0,0100	5,3795	30,0000	20,0423	200,3872	20,0848	200,7756	2676,5337
DURUM 2 (L-L-G)	1	27,7137	0,0075	7,4513	25,6609	20,0356	200,3754	20,0712	200,7514	2676,7441
	2	12,0572	0,0076	1,0000	3,5098	20,0356	200,3735	20,0714	200,7478	2676,6999
	3	1,0000	0,0100	1,0000	3,1215	20,0338	200,3707	20,0678	200,7421	2676,6941
	4	41,8278	0,0095	1,0000	11,2267	20,0335	200,3712	20,0671	200,7432	2676,7417
DURUM 3 (L-L-L-G)	1	1,0000	0,0023	1,4937	30,0000	20,0215	200,2377	20,0430	200,4756	2673,2199
	2	50,0000	0,0100	5,8369	17,5310	20,0212	200,2385	20,0424	200,4772	2673,2552
	3	1,0000	0,0010	3,0758	30,0000	20,0200	200,2353	20,0401	200,4709	2673,1915
	4	50,0000	0,0094	1,0000	1,0000	20,0199	200,2356	20,0399	200,4714	2673,1993
DURUM 4 (L-L)	1	14,5860	0,0010	10,0000	2,9129	20,0236	200,2285	20,0473	200,4573	2672,6503
	2	46,6294	0,0010	1,0000	30,0000	20,0233	200,2284	20,0466	200,4571	2672,6795
	3	1,0000	0,0017	4,9434	17,3149	20,0222	200,2264	20,0444	200,4532	2672,6394
	4	47,7195	0,0014	1,0000	1,0000	20,0221	200,2268	20,0443	200,4538	2672,6436
DURUM 5 (L-L-L)	1	1,0000	0,0093	7,7050	1,0000	20,0551	200,5982	20,1104	201,1982	2682,6500
	2	24,4772	0,0096	6,7976	2,3122	20,0550	200,6000	20,1103	201,2019	2682,6986
	3	1,0000	0,0043	4,0807	1,0000	20,0534	200,5953	20,1069	201,1925	2682,6359
	4	4,1513	0,0010	10,0000	10,2100	20,0532	200,5964	20,1067	201,1947	2682,6729

Çizelge 7.2. YAK uygulanan güç sistemi dengeleyicisi parametreleri kısa devre sonuçları

YAKGSD	GSD	KPSS	T1	T2	TW	IAE	ITAE	ISE	ITSE	ITS2E
DURUM 1 (L-G)	1	37,3511	0,0100	6,8375	14,9227	20,0186	200,2064	20,0372	200,4129	2672,3425
	2	43,8189	0,0066	5,6817	24,6110	20,0184	200,2053	20,0369	200,4109	2672,3232
	3	3,5271	0,0062	9,6536	2,5133	20,0173	200,2029	20,0346	200,4060	2672,8503
	4	4,5836	0,0025	8,4410	5,1625	20,0172	200,2028	20,0345	200,4058	2672,2858
DURUM 2 (L-L-G)	1	30,1822	0,0049	7,3819	22,3220	20,0353	200,3736	20,0706	200,7479	2676,7275
	2	3,6521	0,0057	6,4121	24,3389	20,0354	200,3718	20,0708	200,7443	2676,6728
	3	41,1148	0,0046	8,7501	5,7580	20,0338	200,3757	20,0677	200,7521	2676,7694
	4	6,4831	0,0078	7,1733	22,7928	20,0337	200,3718	20,0674	200,7444	2676,6978
	1	17,0852	0,0011	9,2903	29,4655	20,0196	200,2110	20,0392	200,4221	2672,4161

DURUM 3 (L-L-L-G)	2	44,3364	0,0086	3,8898	27,3505	20,0193	200,2105	20,0387	200,4212	2672,4135
	3	11,6934	0,0091	9,8963	4,2345	20,0182	200,2113	20,0365	200,4228	2672,4225
	4	17,7934	0,0054	9,1819	6,0190	20,0181	200,2119	20,0363	200,4240	2672,4386
DURUM 4 (L-L)	1	47,6512	0,0061	4,0320	29,7897	20,0231	200,2612	20,0463	200,5228	2673,9121
	2	21,9225	0,0042	8,7830	8,0817	20,0234	200,2632	20,0467	200,5268	2673,9470
	3	30,5735	0,0078	7,0123	22,9718	20,0216	200,2602	20,0432	200,5208	2673,9344
	4	21,7150	0,0039	4,2474	6,9508	20,0217	200,2602	20,0434	200,5209	2673,9279
DURUM 5 (L-L-L)	1	9,7635	0,0039	4,3435	17,7630	20,0195	200,2156	20,0391	200,4315	2672,5855
	2	38,3074	0,0024	7,8371	28,5190	20,0193	200,2161	20,0385	200,4325	2672,6073
	3	8,9636	0,0064	1,2875	8,0172	20,0180	200,2124	20,0360	200,4251	2672,5486
	4	19,8542	0,0034	1,2516	22,7753	20,0178	200,2116	20,0356	200,4235	2672,5352

Çizelge 7.3. EFO uygulanan güç sistemi dengeleyicisi parametreleri kısa devre sonuçları

EFO GSD	GSD	KPSS	T1	T2	TW	IAE	ITAE	ISE	ITSE	ITS2E
DURUM 1 (L-G)	1	45,5559	0,0081	2,2163	16,9598	20,0168	200,1917	20,0337	200,3836	2672,0303
	2	3,6381	0,0071	8,4005	27,4307	20,0168	200,1929	20,0336	200,3859	2672,0630
	3	8,2130	0,0037	10,0000	25,4295	20,0155	200,1898	20,0311	200,3798	2672,0220
	4	27,9095	0,0089	9,8946	1,5554	20,0154	200,1901	20,0309	200,3805	2672,0341
DURUM 2 (L-L-G)	1	20,5605	0,0093	3,0344	11,4692	20,0272	200,3013	20,0544	200,6030	2674,9147
	2	16,9035	0,0018	5,6140	25,1531	20,0272	200,3000	20,0544	200,6004	2674,8809
	3	45,3261	0,0075	4,4470	9,6425	20,0258	200,2970	20,0517	200,5945	2674,8346
	4	41,5901	0,0010	10,0000	3,3563	20,0257	200,2966	20,0515	200,5937	2674,8266
DURUM 3 (L-L-L-G)	1	41,3867	0,0010	1,0000	11,7392	20,0171	200,2024	20,0343	200,4051	2672,3160
	2	4,7062	0,0025	7,0477	18,1137	20,0170	200,2018	20,0339	200,4037	2672,3099
	3	33,7216	0,0051	8,1275	14,2181	20,0156	200,1974	20,0312	200,3950	2672,2352
	4	44,8288	0,0017	6,7189	24,4500	20,0153	200,1960	20,0307	200,3923	2672,2180
DURUM 4 (L-L)	1	19,3083	0,0036	5,2696	19,6190	20,0149	200,1751	20,0298	200,3504	2671,6318
	2	12,1960	0,0091	7,2433	15,1454	20,0146	200,1758	20,0292	200,3518	2671,6608
	3	14,6209	0,0061	1,8185	16,7675	20,0129	200,1705	20,0257	200,3412	2671,5832
	4	48,1220	0,0027	7,8103	29,0273	20,0126	200,1712	20,0253	200,3426	2671,6111
DURUM 5 (L-L-L)	1	7,9917	0,0069	2,9649	1,0000	20,0106	200,1420	20,0213	200,2842	2670,7493
	2	3,1137	0,0025	5,6000	26,1508	20,0105	200,1400	20,0210	200,2800	2670,6963
	3	38,5468	0,0022	1,5843	20,5009	20,0089	200,1362	20,0179	200,2725	2670,6449
	4	24,6281	0,0055	3,8214	10,3815	20,0090	200,1391	20,0180	200,2783	2670,7201

Sezgisel algoritmalarla gerçekleştirilen simülasyon ile değişen yük koşullarında ortaya çıkan hata sonuçları çizelgelerde gösterilmiştir.

Çizelge 7.4. FGA uygulanan güç sistemi dengeleyicisi parametreleri yük değişimi sonuçları

FGAGSD	GSD	KPSS	T1	T2	TW	IAE	ITAE	ISE	ITSE	ITS2E
DURUM 6 (Hafif Yük)	1	40,0184	0,0010	2,8573	10,1490	20,0772	200,7930	20,1548	201,5891	2688,2046
	2	50,0000	0,0010	6,4085	27,3688	20,0767	200,7915	20,1536	201,5861	2688,1801
	3	38,0006	0,0086	1,0000	27,4812	20,0762	200,7865	20,1526	201,5762	2688,0895
	4	9,7037	0,0010	10,0000	15,6164	20,0771	200,7908	20,1545	201,5848	2688,1350

DURUM 7 (Nominal Yük)	1	13,7358	0,0030	1,6688	11,2506	20,0253	200,2773	20,0505	200,5550	2674,2722
	2	25,6799	0,0087	10,0000	30,0000	20,0250	200,2781	20,0501	200,5566	2674,2974
	3	1,0000	0,0047	4,4139	24,5108	20,0238	200,2741	20,0477	200,5487	2674,2241
	4	15,7250	0,0075	3,0315	1,0000	20,0237	200,2741	20,0475	200,5485	2674,2233
DURUM 8 (Ağır Yük)	1	19,4280	0,0010	10,0000	20,0120	20,0120	200,1949	20,0241	200,3900	2672,7641
	2	31,7256	0,0100	7,9781	1,0000	20,0120	200,1961	20,0240	200,3925	2672,7913
	3	8,3500	0,0055	3,8883	3,5577	20,0091	200,1814	20,0183	200,3630	2672,4285
	4	21,1096	0,0050	2,7700	25,6500	20,0087	200,1781	20,0175	200,3564	2672,3474

Çizelge 7.5. YAK uygulanan güç sistemi dengeleyicisi parametreleri yük değişimi sonuçları

YAKGSD	GSD	KPSS	T1	T2	TW	IAE	ITAE	ISE	ITSE	ITS2E
DURUM 6 (Hafif Yük)	1	22,3571	0,0084	5,7954	19,0518	20,1388	201,4304	20,2786	202,8710	2705,1936
	2	12,2939	0,0030	2,6633	8,4839	20,1394	201,4271	20,2797	202,8645	2705,1031
	3	35,8496	0,0048	1,2630	7,8812	20,1381	201,4299	20,2772	202,8700	2705,2318
	4	12,3481	0,0043	8,1657	4,9600	20,1387	201,4273	20,2784	202,8647	2705,0519
DURUM 7 (Nominal Yük)	1	47,1540	0,0060	8,8020	12,6402	20,0301	200,3405	20,0602	200,4808	2676,1079
	2	7,8725	0,0037	3,1922	7,3996	20,0301	200,3372	20,0603	200,4770	2676,0211
	3	9,5697	0,0030	1,6152	13,4873	20,0284	200,3342	20,0568	200,4722	2676,0097
	4	35,5916	0,0031	3,8622	10,6446	20,0281	200,3346	20,0563	200,4716	2676,0399
DURUM 8 (Ağır Yük)	1	18,4689	0,0049	6,0294	25,7907	20,0090	200,0922	20,0180	200,1845	2668,9581
	2	24,4947	0,0078	2,0406	27,1350	20,0088	200,0919	20,0175	200,1838	2668,9594
	3	1,8171	0,0043	2,7556	6,1977	20,0066	200,0904	20,0133	200,1809	2668,9688
	4	19,4539	0,0091	7,3186	16,6631	20,0064	200,0903	20,0128	200,1806	2668,9813

Çizelge 7.6. EFO uygulanan güç sistemi dengeleyicisi parametreleri yük değişimi sonuçları

EFOGSD	GSD	KPSS	T1	T2	TW	IAE	ITAE	ISE	ITSE	ITS2E
DURUM 6 (Hafif Yük)	1	3,4890	0,0085	1,0000	23,2414	20,0754	200,8169	20,1510	201,6372	2689,1775
	2	6,5187	0,0010	7,3804	9,7243	20,0759	200,8147	20,1521	201,6328	2689,1081
	3	41,7526	0,0052	5,1817	30,0000	20,0751	200,8130	20,1505	201,6293	2689,0814
	4	30,7559	0,0085	9,1983	14,3492	20,0741	200,8155	20,1486	201,6343	2689,1996
DURUM 7 (Nominal Yük)	1	14,7800	0,0084	4,0788	26,2881	20,0217	200,2402	20,0435	200,4808	2673,2674
	2	14,1334	0,0080	6,4829	1,5211	20,0218	200,2384	20,0437	200,4770	2673,2225
	3	35,3741	0,0100	7,1550	26,4591	20,0202	200,2360	20,0404	200,4722	2673,2146
	4	22,1585	0,0067	6,2744	7,5949	20,0200	200,2357	20,0401	200,4716	2673,2136
DURUM 8 (Ağır Yük)	1	45,8114	0,0068	2,3812	2,5133	20,0052	200,0776	20,0104	200,1552	2668,9294
	2	1,7375	0,0028	5,7494	19,8080	20,0050	200,0775	20,0101	200,1550	2668,9238
	3	4,5836	0,0060	9,8315	5,7230	20,0028	200,0720	20,0056	200,1440	2668,8391
	4	8,6733	0,0100	1,7064	21,8336	20,0025	200,0708	20,0050	200,1417	2668,8223

Bu çalışmada, kısa devre ve yük değişimi durumları ele alınarak dört farklı güç sistem dengeleyicisi parametrelerinin belirlenmesi için üç farklı algoritmanın kullanılarak güç sistem dengeleyicisinin en iyi parametre değerlerini bulunmuştur. Belirlenen parametrelerle, dört farklı GSD uygulanan güç sisteminin bozucu durumlarındaki etkinliği aşağıdaki Çizelge 7.7' de karşılaştırılıyor.

Çizelge 7.7. Hata değerlerinin algoritmalara göre sonuçları

Durum	EFO-YAK- FGA IAE	EFO-YAK- FGA ITAE	EFO-YAK- FGA ISE	EFO-YAK- FGA ITSE	EFO-YAK- FGA ITS2E
Durum 1 L-G	20,0257	200,2609	20,0516	200,5223	2673,6718
Durum 2 L-L-G	20,0319	200,3482	20,0638	200,6971	2676,1003
Durum 3 L-L-L-G	20,0186	200,2158	20,0372	200,4318	2672,6363
Durum 4 L-L	20,0197	200,2206	20,0394	200,4416	2672,7351
Durum 5 L-L-L	20,0275	200,3169	20,0551	200,6346	2675,3121
Durum 6 Hafif Yük	20,0969	201,0114	20,1943	202,0283	2694,1464
Durum 7 Nominal Yük	20,0249	200,2834	20,0498	200,5010	2674,5095
Durum 8 Ağır Yük	20,0073	200,1178	20,0147	200,2356	2670,1428

Çizelge 7.7' de, FGA, YAK ve EFO uygulanan GSD' nin hata değerlerine göre sıralandığında, en düşük hata değerinin IAE ile elde edileceği görülmüştür. Bu nedenle, amaç fonksiyonunda hata değeri belirlenirken, değişken durumlara göre en düşük hata değerine ulaşan yöntem olan IAE tercih edilerek en iyi sonuçların elde edildiği gözlenmiştir.

Çizelge 7.8. Durumlara göre IAE hata değerleri sönümlenme sonuçları

Durum	EFO IAE	YAK IAE	FGA IAE
Durum 1 L-G	20,0162	20,0179	20,0432
Durum 2 L-L-G	20,0265	20,0346	20,0346
Durum 3 L-L-L-G	20,0163	20,0188	20,0207
Durum 4 L-L	20,0138	20,0225	20,0228
Durum 5 L-L-L	20,0098	20,0187	20,0542
Durum 6 Hafif Yük	20,0751	20,1388	20,0768
Durum 7 Nominal Yük	20,0209	20,0292	20,0245
Durum 8 Ağır Yük	20,0039	20,0077	20,0105

Kısa devre ve yük değişimi durumlarının algoritmalar için en uygun GSD parametrelerini belirleyerek dört farklı GSD'in hata sonuçlarının ortalaması

alındığında yük değişimlerinde, en düşük hata değeri EFO_IAE'de ağır yük durumunda 20,0039 olarak elde edilmiştir. En yüksek hata değeri ise YAK_IAE'de ağır yük durumunda 20,1388 olarak belirlenmiştir. Kısa devre durumlarında en düşük hata değerine EFO_IAE' de L-L-L'de 20,0098 hata değeri ile elde edildiği, L-L-G durumunda ise en yüksek hata değerine FGA_IAE' de 20,0542 ulaşıldığı görülmüştür. L-G, L-L-L-G ve L-L kısa devre durumlarında EFO' nun hata diğer algoritmalarla göre daha düşük değerlere ulaşıldığı analiz edilmiştir.

Genel olarak, sonuçlara göre EFO'nun YAK ve FGA' ye göre GSD değerlerini daha iyi belirleyerek en düşük hata değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Algoritmaların farklı kısa devre ve yük değişimi durumlarında aynı performansı göstermesi beklenirken, güç sisteminin tüm durumlarında en iyi kararlılık değerini en kısa sürede elde etmesi önemlidir.

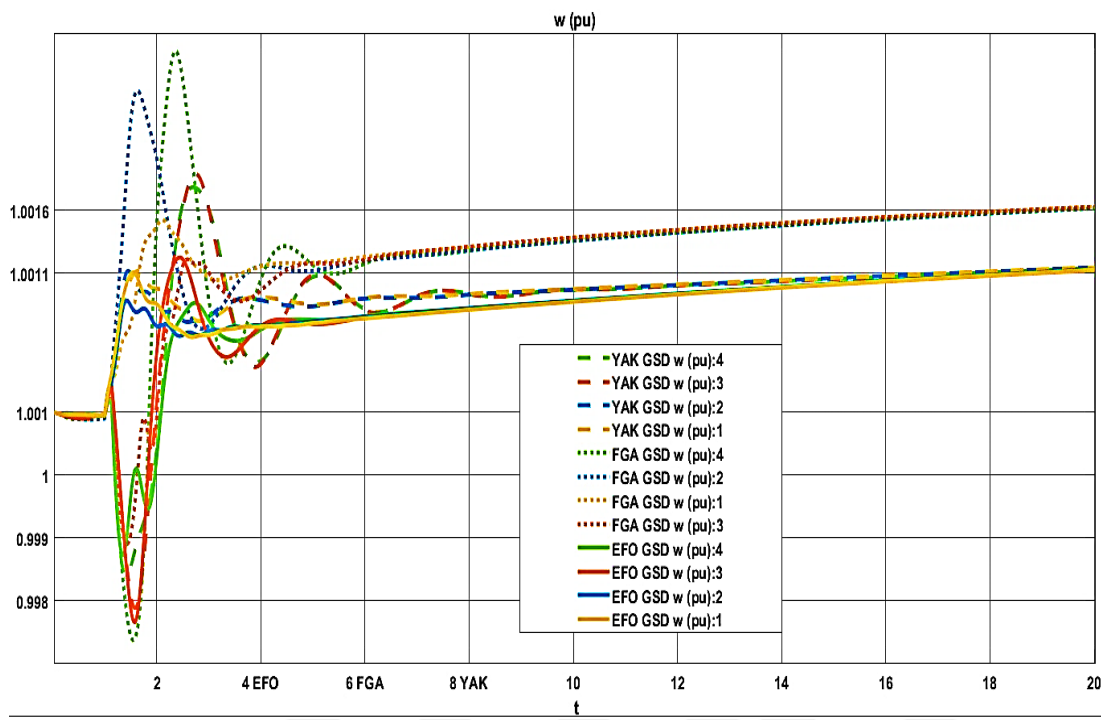
Çizelge 7.9. Kısa devre ve yük değişimi durumunda zamana göre sönümlenme sonuçları

Durum	EFO_t(s)	YAK_t(s)	FGA_t(s)
L-G (1)	389,05	437,16	4477,83
L-L-G (2)	348,56	384,66	3907,57
L-L-L-G (3)	958,33	1045,12	13630,05
L-L (4)	433,60	428,80	3813,49
L-L-L (5)	925,32	931,30	10707,61
Hafif Yük (6)	6847,51	11615,87	57419,77
Nominal Yük (7)	911,04	1356,68	15943,47
Ağır Yük (8)	2266,23	3099,20	11208,92

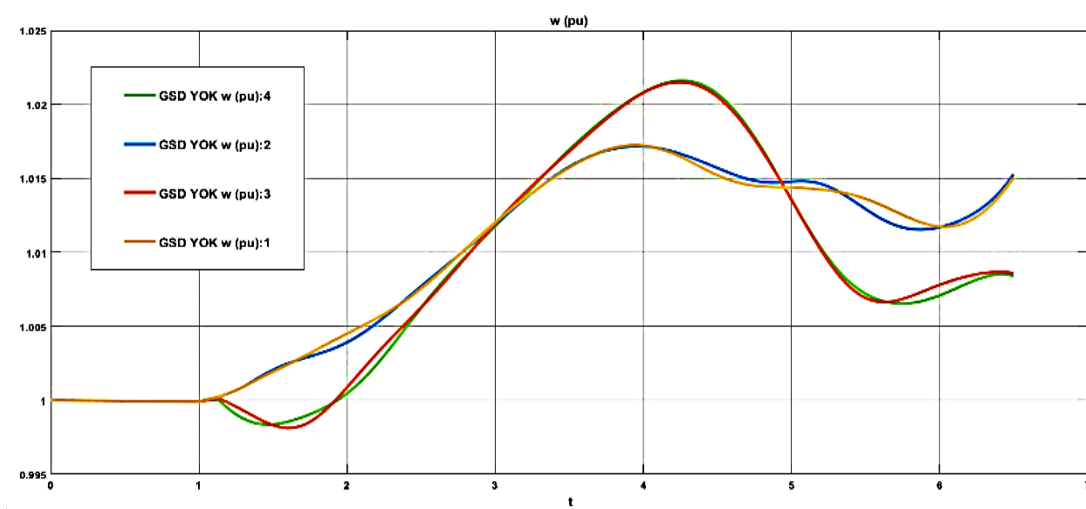
Güç sistemindeki kısa devre durumlarının analizinde, algoritmaların L-L-G durumunda en hızlı işlemi gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. EFO, diğer algoritmalarla kıyasla 348,56 saniyede en hızlı sonuçları vermiştir. Ancak, FGA' nin kullanıldığı durumlarda kararlılığın oluşması daha uzun süre almıştır. Örneğin, FGA' nin uygulandığı L-L-L-G durumunda kararlılık oluşturmak için 13630,05 saniye gerekmektedir. Yük değişimi durumlarında, EFO nominal yükte en hızlı sönümlenmeyi gerçekleştirirken, FGA hafif yükte en uzun süreye ihtiyaç duymuştur (911,04 saniye ile EFO, 57419,77 saniye ile FGA). Algoritmaların yük değişimi durumlarını incelediğimizde, EFO'nun koşullara göre daha iyi sönümlenme zamanına sahip olduğu belirlenmiştir. Genel olarak incelediğimizde, EFO'nun YAK ve FGA'ye göre farklı koşullar altında daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

7.2.Simülasyon Grafikleri

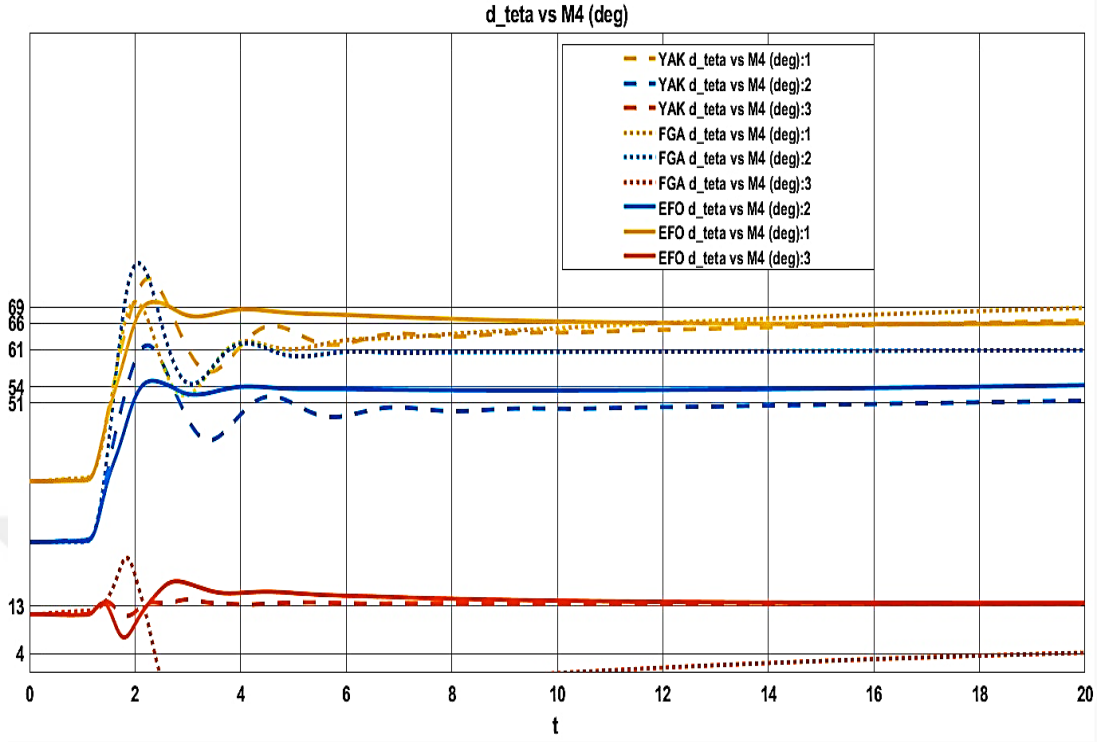
Durum 1



Durum 1 için incelendiğinde açısal hız değerleri(w) EFO ve YAK için 1,0011 p.u. sönümlenme oluşurken, FGA için 1,0016 değerinde sönümlenme sağladığı, bu sönümlemeleri sağladıkları zaman sürecine baktığımızda ise EFO ‘nun 4. saniyede, FGA’ nin 6. saniyede ve YAK’ nin ise 8. saniyede dört adet jeneratörün hızlarının bir değere sabitlendiği görülmektedir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.

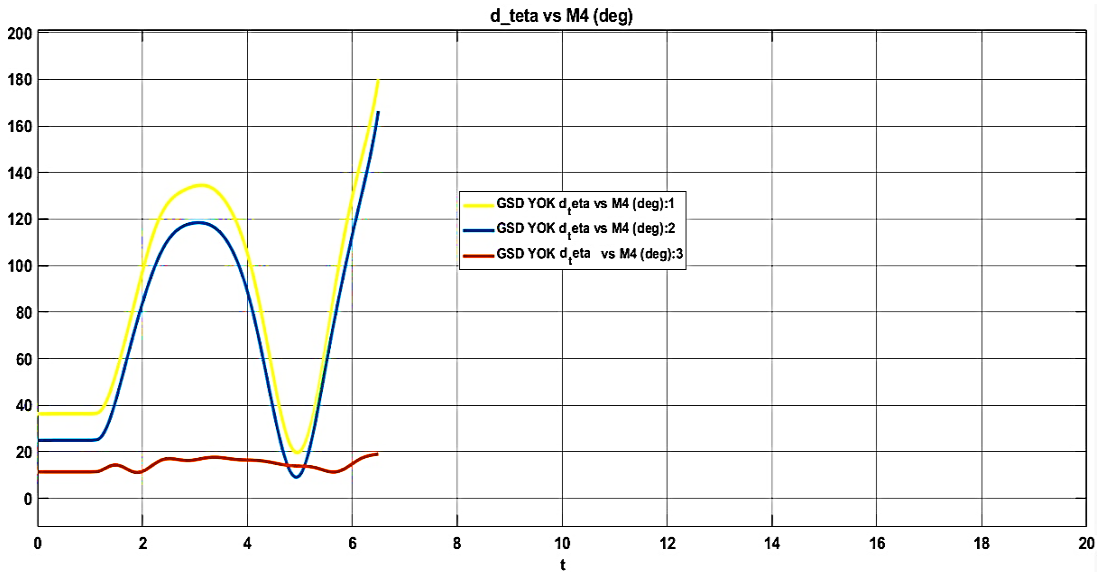


Durum 1



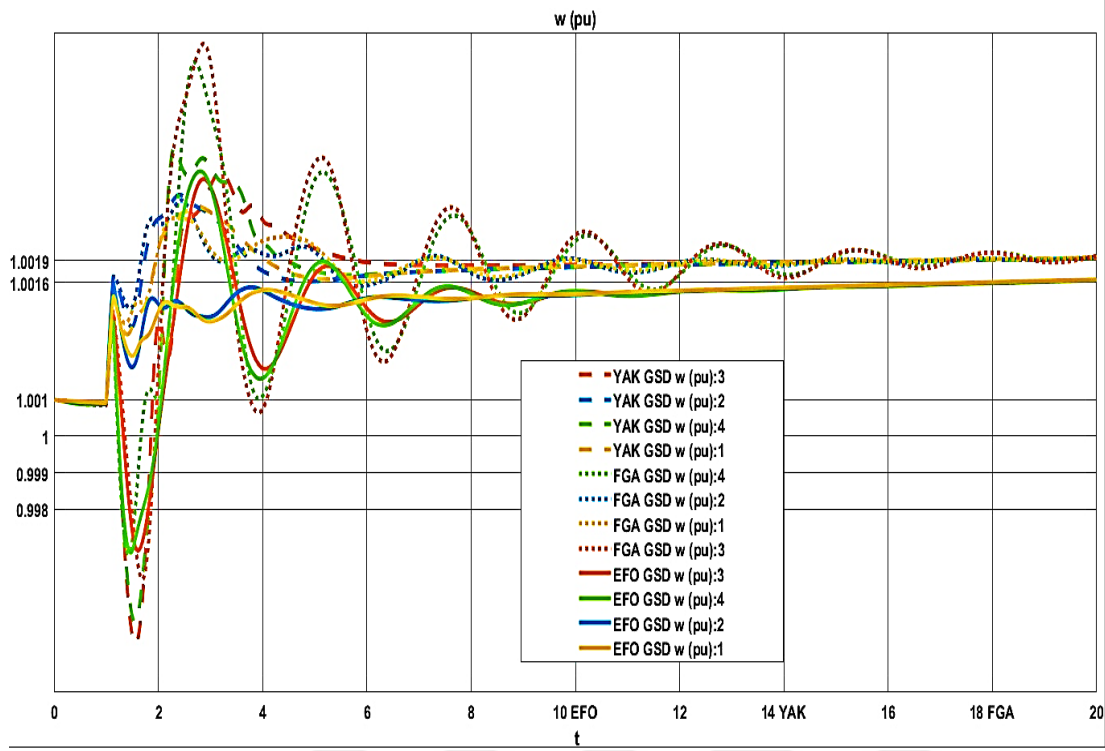
Şekil 7.3. Durum 1 (L-G) rotor açısı değişimi kararlılığı

Durum 1 için incelendiğinde rotor açısı(d_{teta}) değerleri M4 jeneratörünün 1 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 66 derece ile EFO' ya ait olup, 2 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 51 derece ile YAK' ye ait ve 3 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 4 derece ile FGA' ye aittir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



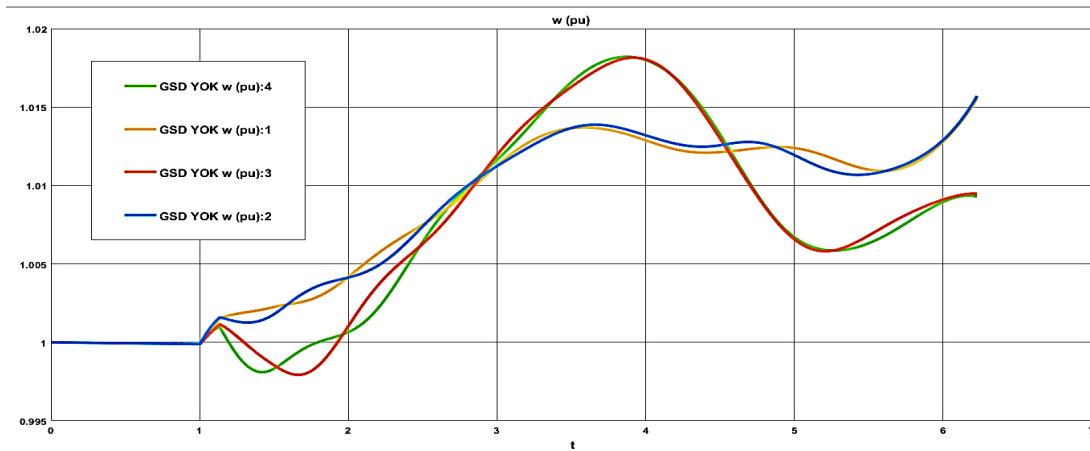
Şekil 7.4. Durum 1 (L-G) rotor açısı değişimi

Durum 2



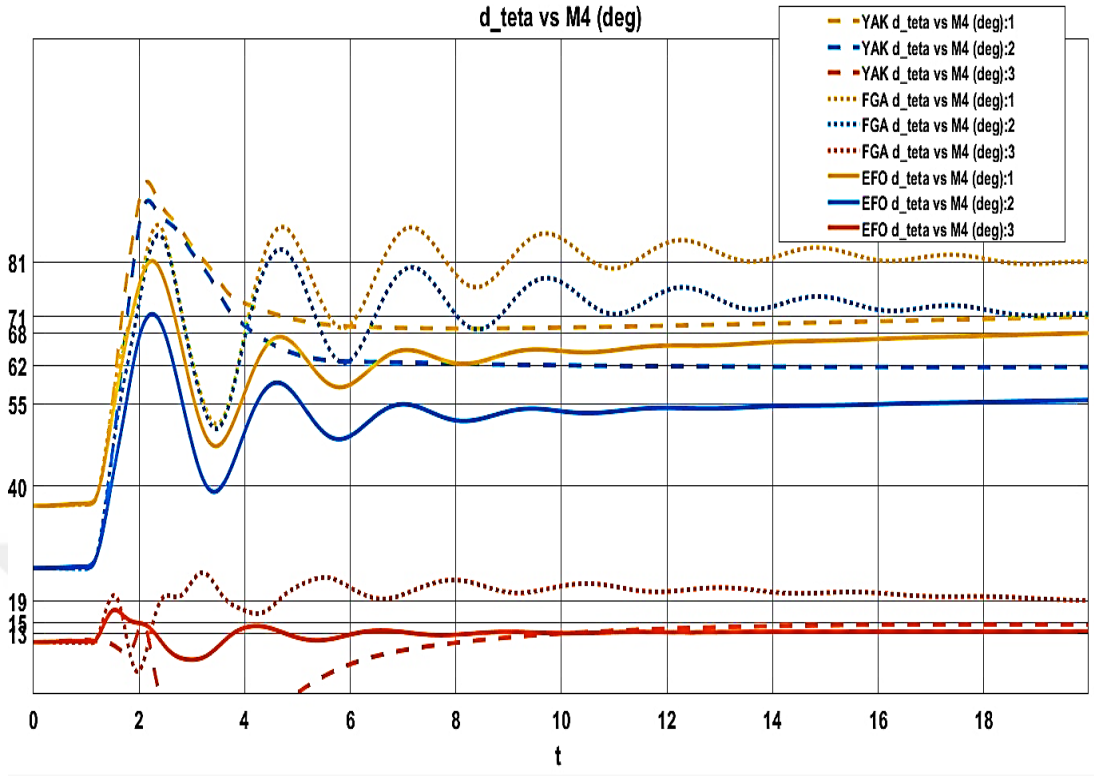
Şekil 7.5. Durum 2 (L-L-G) rotor hız değişimi kararlılığı

Durum 2 için incelendiğinde açısal hız değerleri(w) FGA ve YAK için 1,0019 p.u. sönümlenme oluşurken, EFO için 1,0016 değerinde sönümlenme sağladığı, bu sönümlemeleri sağladıkları zaman sürecine baktığımızda ise EFO ‘nun 10. saniyede, FGA’ nin 18. saniyede ve YAK’ nin ise 14. saniyede dört adet jeneratörün hızlarının bir değere sabitlendiği görülmektedir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



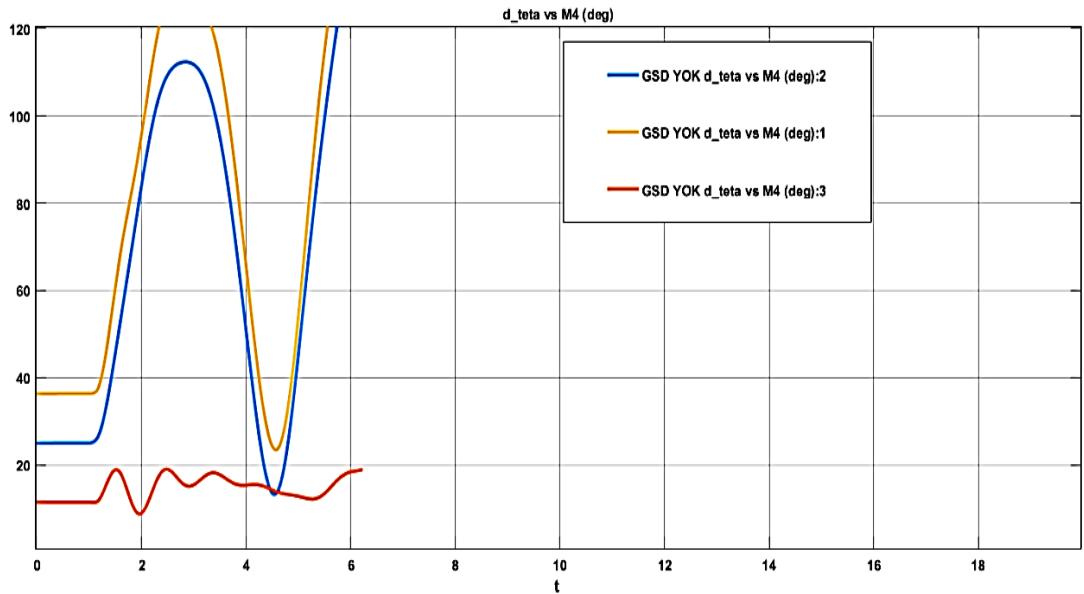
Şekil 7.6. Durum 2 (L-L-G) rotor hız değişimi GSD yok

Durum 2



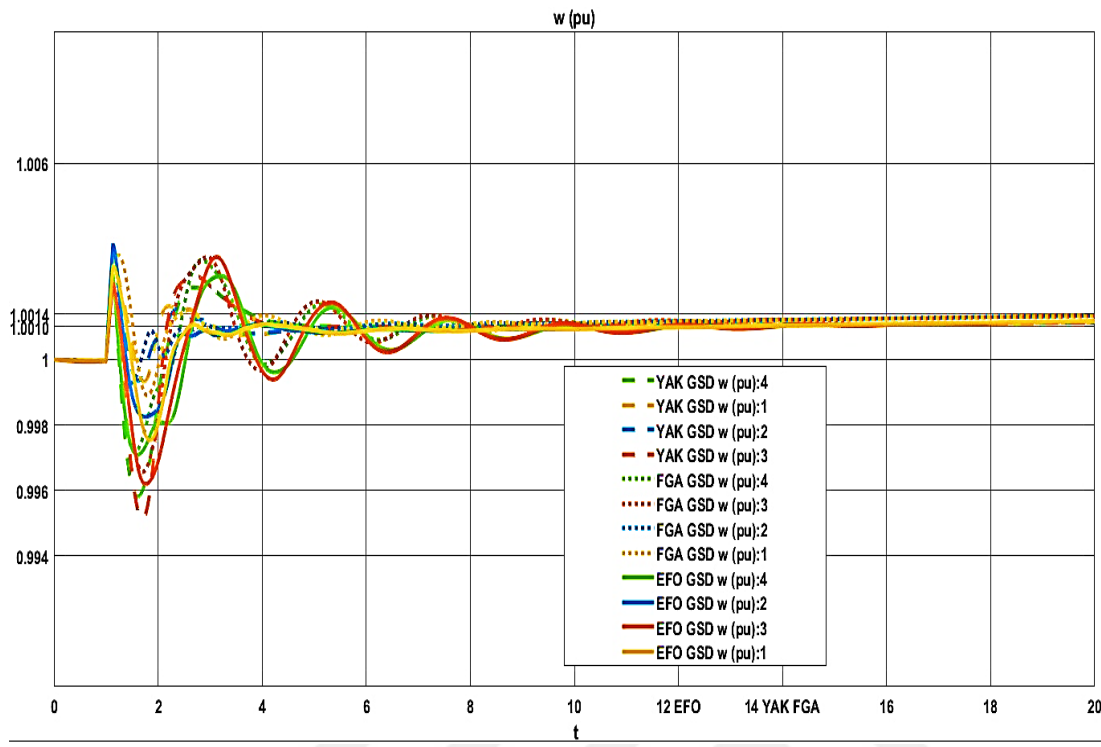
Şekil 7.7. Durum 2 (L-L-G) rotor açısı değişimi kararlılığı

Durum 2 için incelendiğinde rotor açısı(d_{teta}) değerleri M4 jeneratörünün 1 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 68 derece ile EFO' ya ait olup, 2 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 55 derece ile EFO' ye ait ve 3 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 13 derece ile EFO' ya aittir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



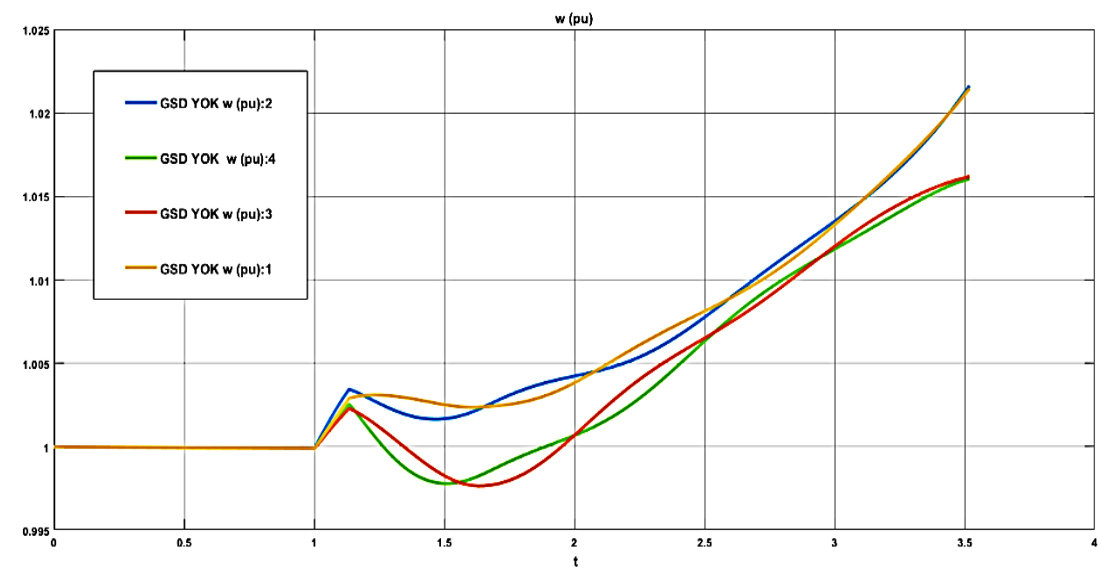
Şekil 7.8. Durum 2 (L-L-G) rotor açısı değişimi GSD yok

Durum 3



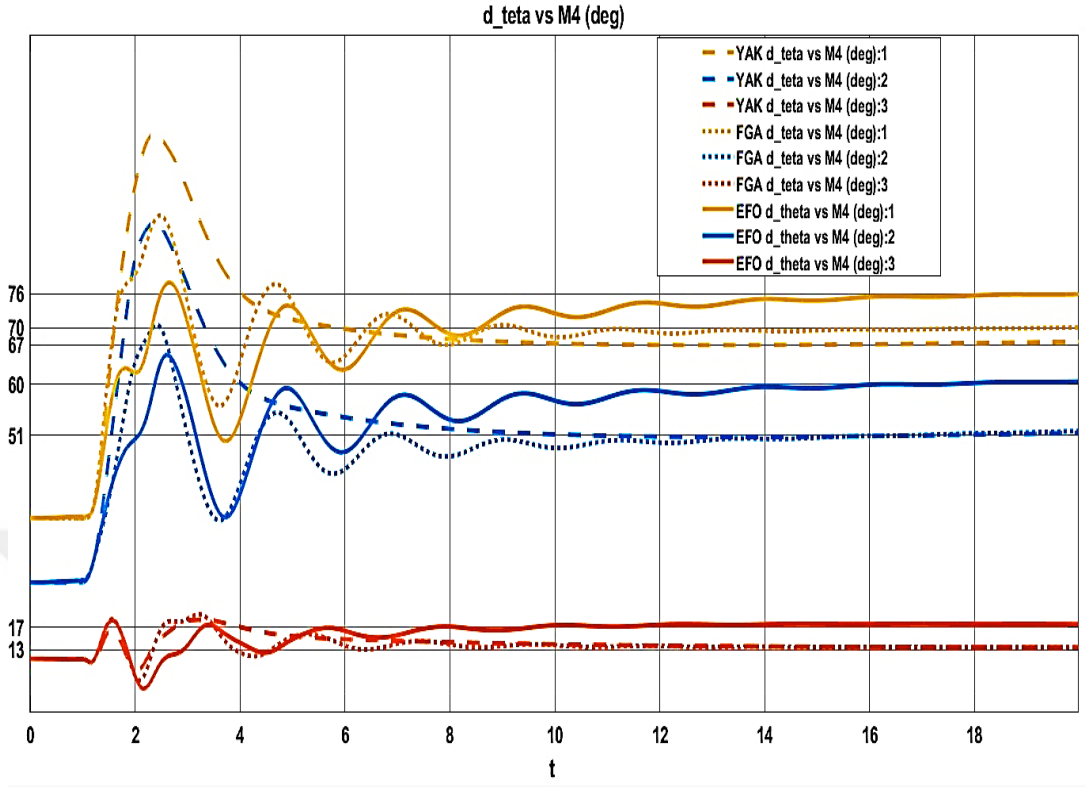
Şekil 7.9. Durum 3 (L-L-L-G) rotor hız değişimi kararlılığı

Durum 3 için incelendiğinde açısal hız değerleri(w) EFO ve YAK için 1,0010 p.u. sönümlenme oluşurken, FGA için 1,0014 değerinde sönümlenme sağladığı, bu sönümlenmeleri sağladıkları zaman sürecine baktığımızda ise EFO' nun 12. saniyede, YAK ve FGA' nin 14. saniyede dört adet jeneratörün hızlarının bir değere sabitlendiği görülmektedir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



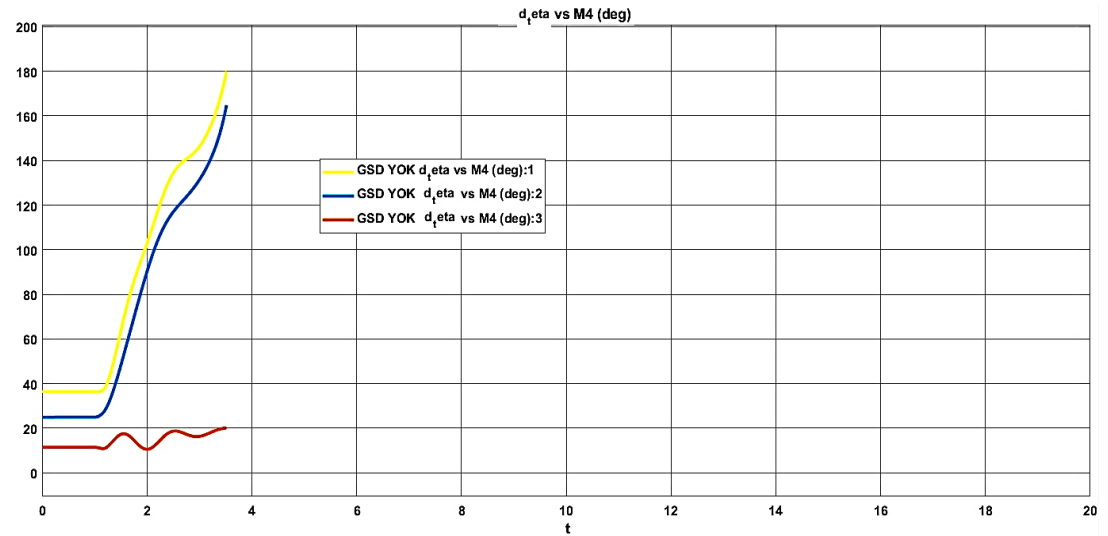
Şekil 7.10. Durum 3 (L-L-L-G) rotor hız değişimi GSD yok

Durum 3



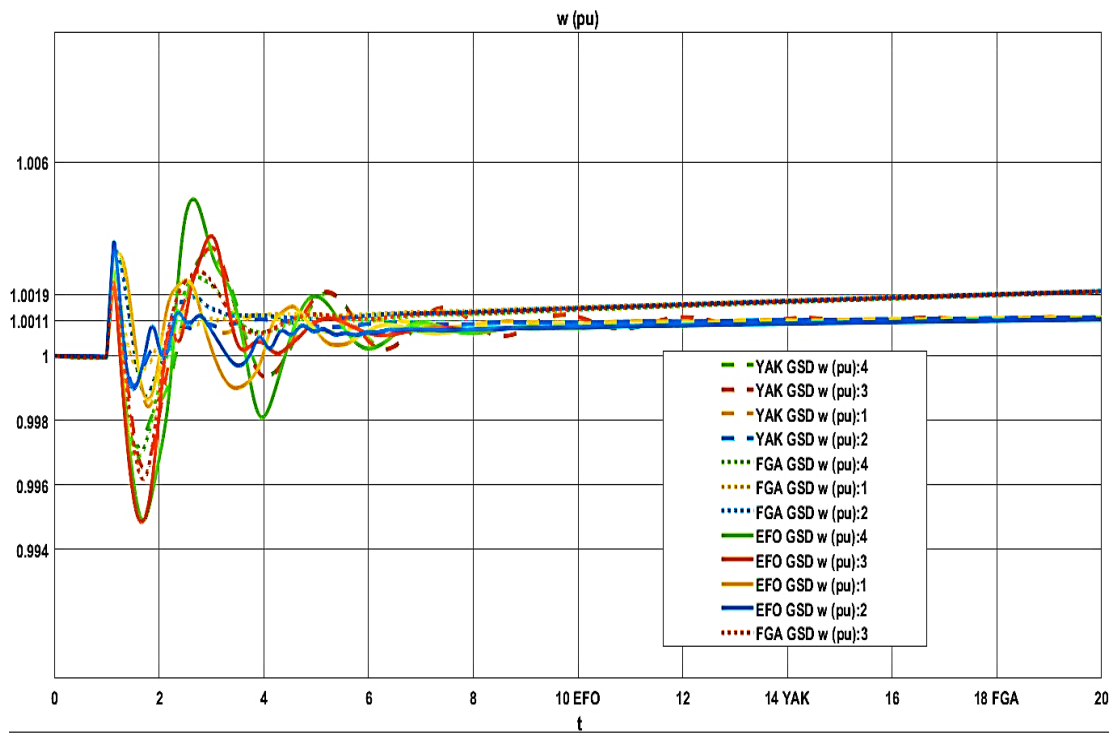
Şekil 7.11. Durum 3 (L-L-L-G) rotor açısı değişimi kararlılığı

Durum 3 için incelendiğinde rotor açısı(d_{teta}) değerleri M4 jeneratörünün 1 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 67 derece ile YAK' ye ait olup, 2 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 51 derece ile YAK ve FGA' ye ait ve 3 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 13 derece ile YAK ve FGA' ye aittir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



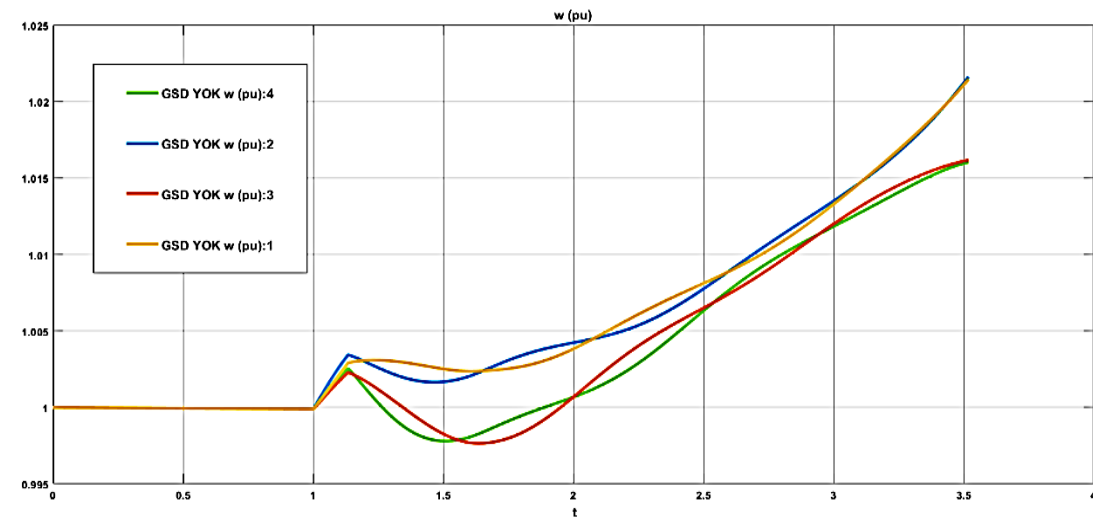
Şekil 7.12. Durum 3 (L-L-L-G) rotor açısı değişimi GSD yok

Durum 4



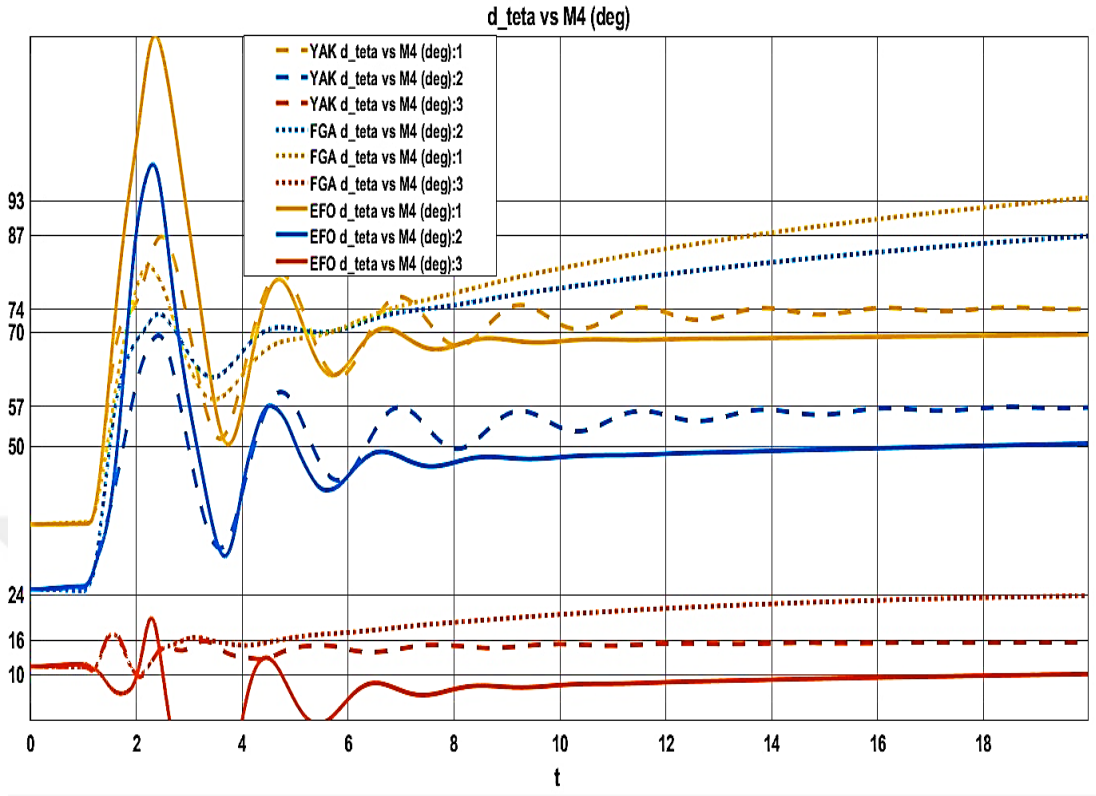
Şekil 7.13. Durum 4 (L-L-L) rotor hız değişimi kararlılığı

Durum 4 için incelendiğinde açısal hız değerleri(w) EFO ve YAK için 1,0011 p.u. sönümlenme oluşurken, FGA için 1,0019 değerinde sönümlenme sağladığı, bu sönümlenmeleri sağladıkları zaman sürecine baktığımızda ise EFO' nun 10. saniyede, YAK' nin 14. saniyede ve FGA' nin 18. saniyede dört adet jeneratörün hızlarının bir değere sabitlendiği görülmektedir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



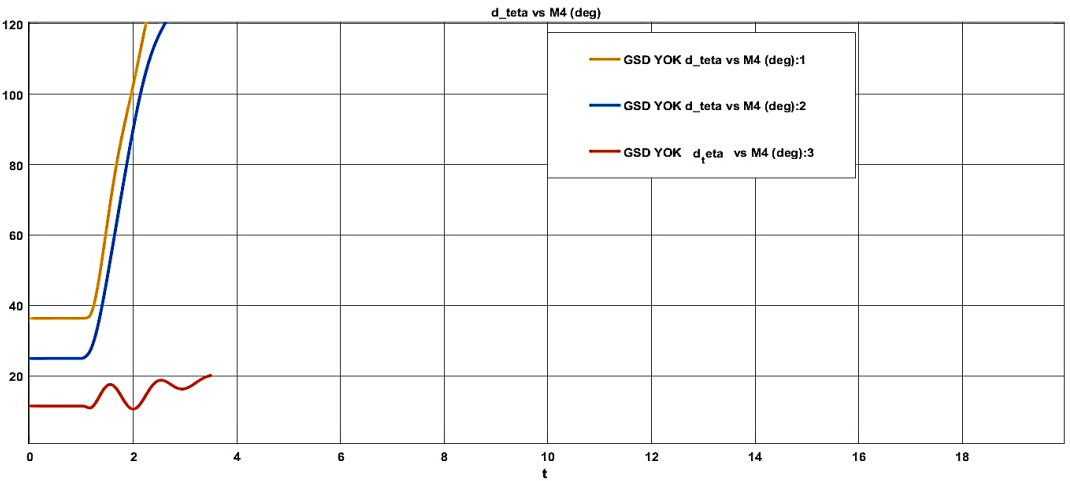
Şekil 7.14. Durum 4 (L-L-L) rotor hız değişimi GSD yok

Durum 4



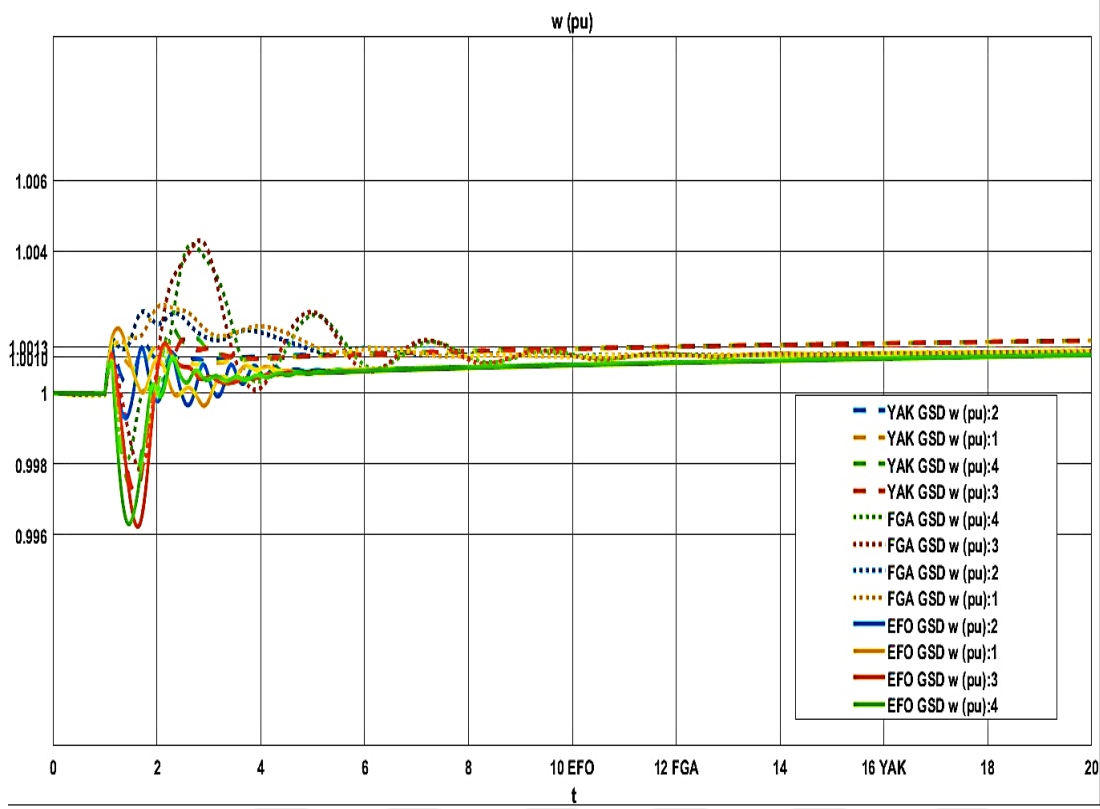
Şekil 7.15. Durum 4 (L-L-L) rotor açısı değişimi kararlılığı

Durum 4 için incelendiğinde rotor açısı(d_{teta}) değerleri M4 jeneratörünün 1 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 70 derece ile EFO' ya ait olup, 2 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 50 derece ile EFO' ya ait ve 3 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 10 derece ile EFO' ya aittir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



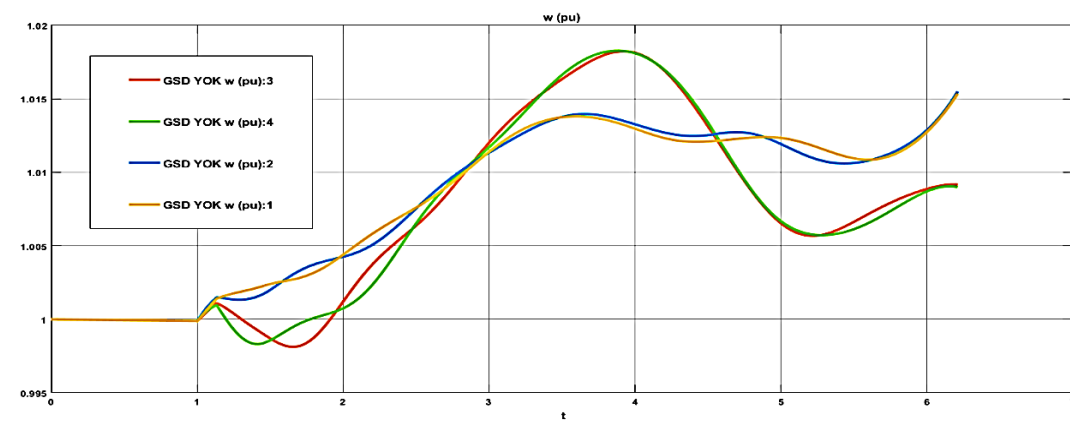
Şekil 7.16. Durum 4 (L-L-L) rotor açısı değişimi GSD yok

Durum 5



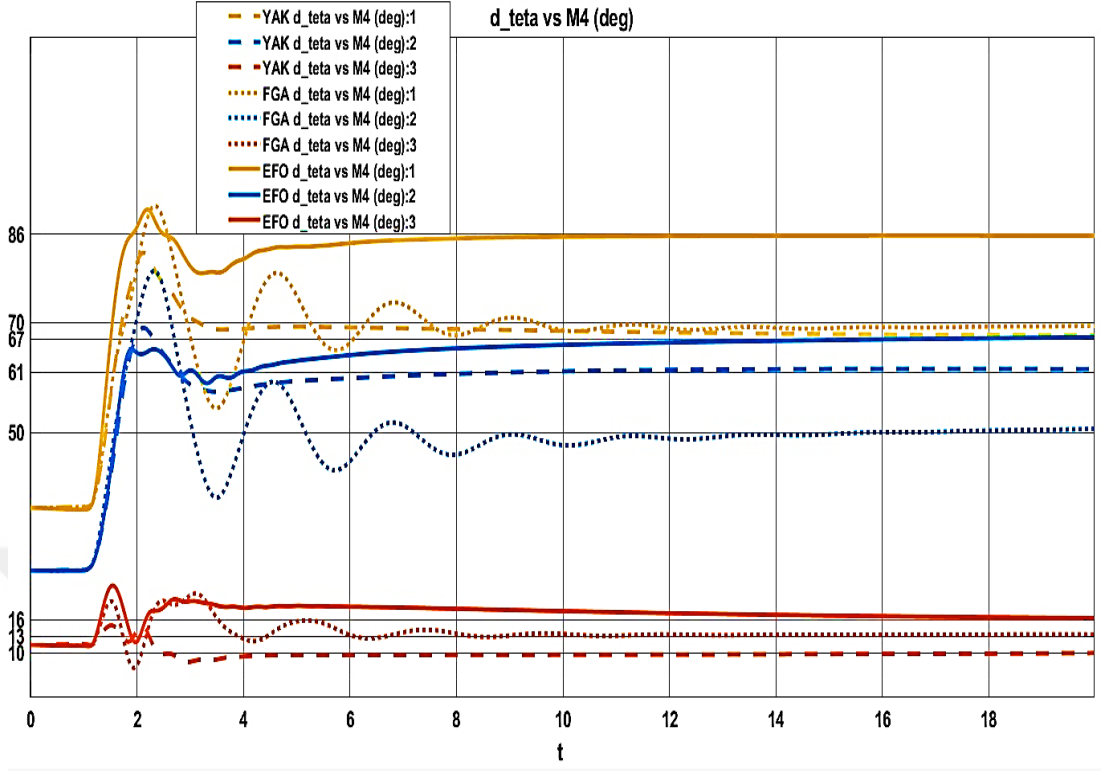
Şekil 7.17. Durum 5 (L-L) rotor hız değişimi kararlılığı

Durum 5 için incelendiğinde açısal hız değerleri(w) EFO için 1,0010 p.u. sönümlenme oluşurken, FGA için 1,00013 değerinde sönümlenme sağladığı ve YAK için ise 1,00014 değerinde sönümlendiği, bu sönümlmeleri sağladıkları zaman sürecine baktığımızda ise EFO' nun 10. saniyede, YAK' nin 16. saniyede ve FGA' nin 12. saniyede dört adet jeneratörün hızlarının bir değere sabitlendiği görülmektedir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



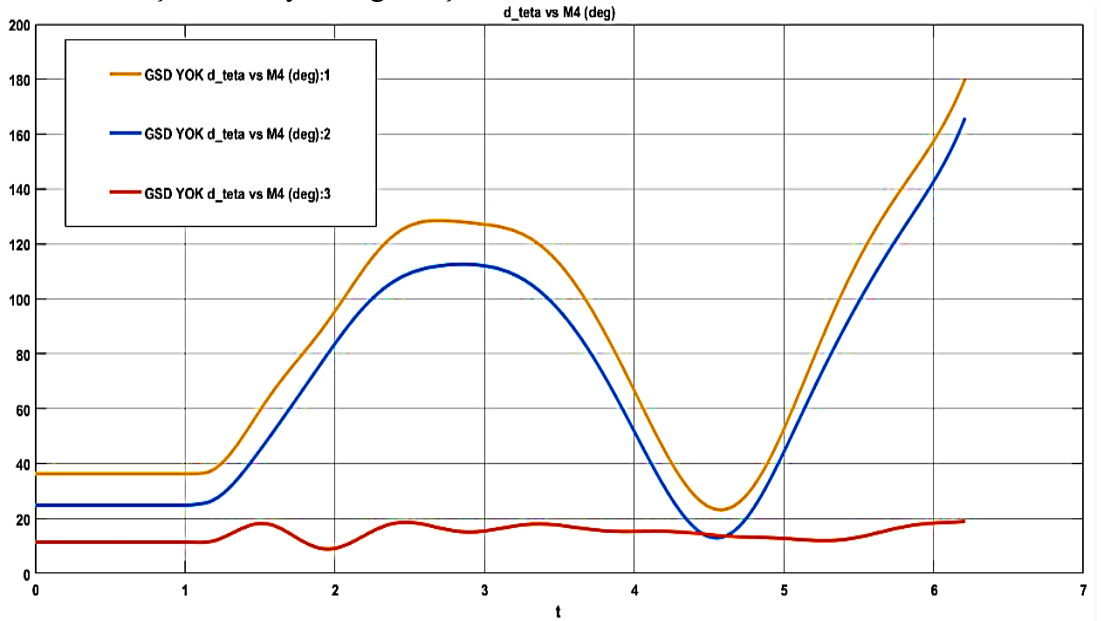
Şekil 7.18. Durum 5 (L-L) rotor hız değişimi GSD yok

Durum 5



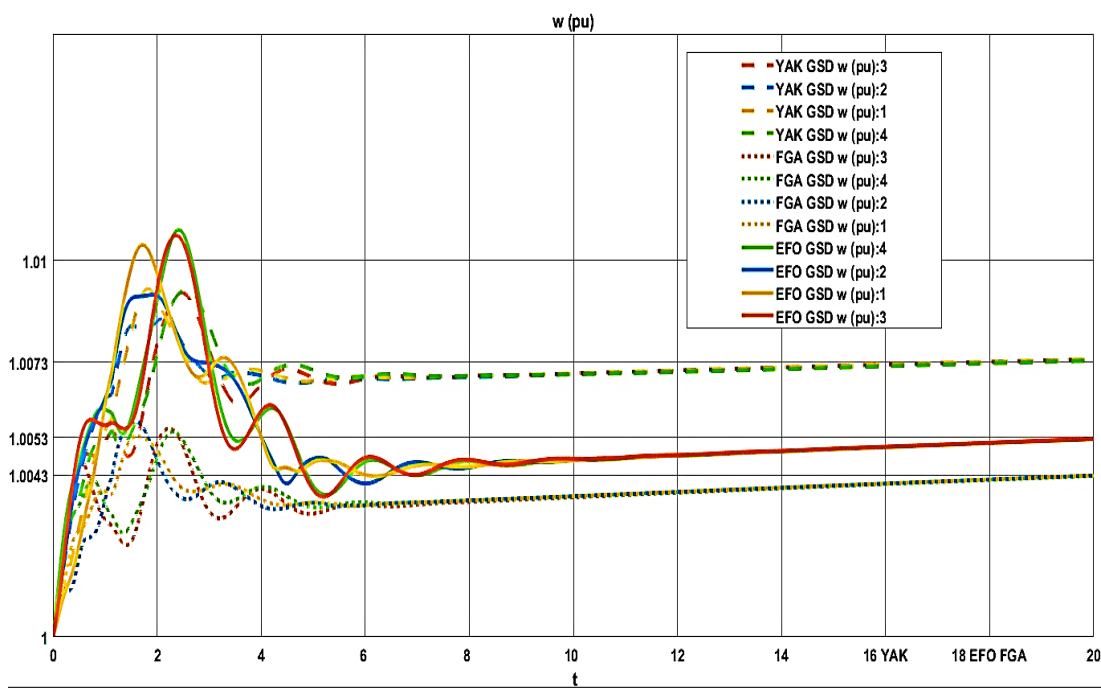
Şekil 7.19. Durum 5 (L-L) rotor açısı değişimi kararlılığı

Durum 5 için incelendiğinde rotor açısı(d_teta) değerleri M4 jeneratörünün 1 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 67 derece ile YAK' ye ait olup, 2 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 50 derece ile FGA' ya ait ve 3 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 10 derece ile YAK' ye aittir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



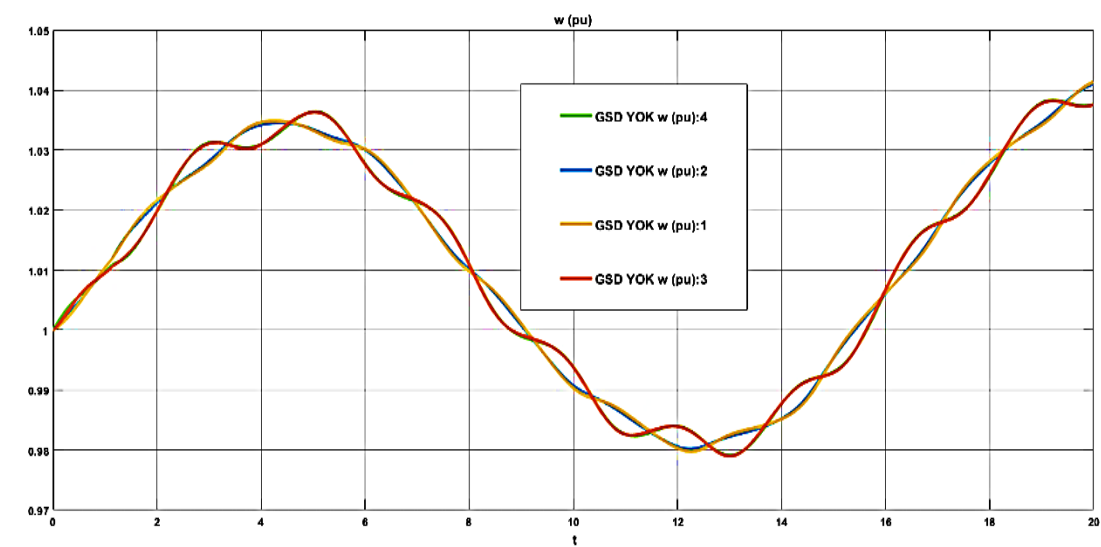
Şekil 7.20. Durum 5 (L-L) rotor açısı değişimi GSD yok

Durum 6



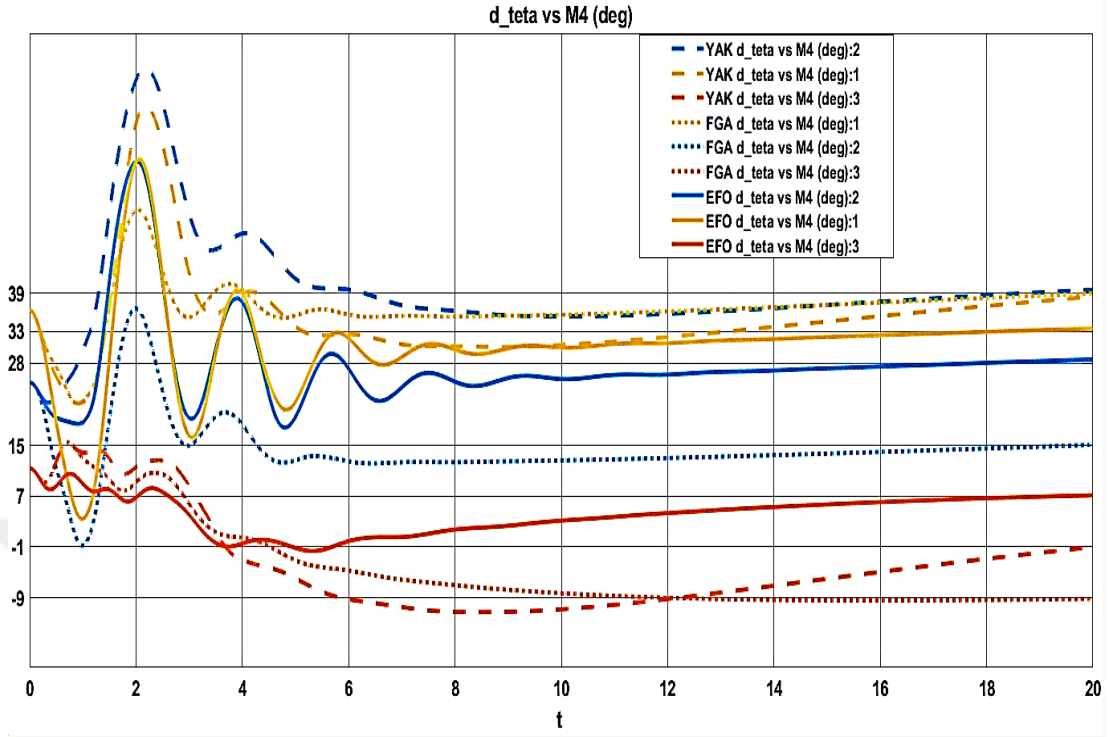
Şekil 7.21. Durum 6 (Hafif Yük) rotor hız değişimi kararlılığı

Durum 6 için incelendiğinde açısal hız değerleri(w) EFO için 1,0053 p.u. sönümlenme oluşurken, FGA için 1,0043 değerinde sönümlenme sağladığı ve YAK için ise 1,0073 değerinde sönümlendiği, bu sönümlmeleri sağladıkları zaman sürecine baktığımızda ise EFO' nun 18. saniyede, YAK' nin 16. saniyede ve FGA' nin 18. saniyede dört adet jeneratörün hızlarının bir değere sabitlendiği görülmektedir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



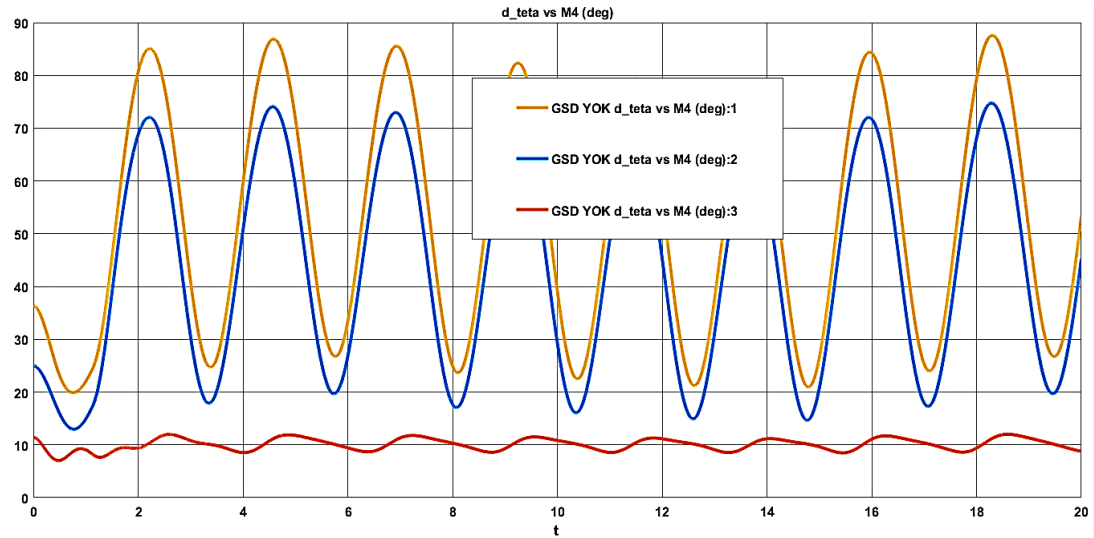
Şekil 7.22. Durum 6 (Hafif Yük) rotor hız değişimi GSD yok

Durum 6



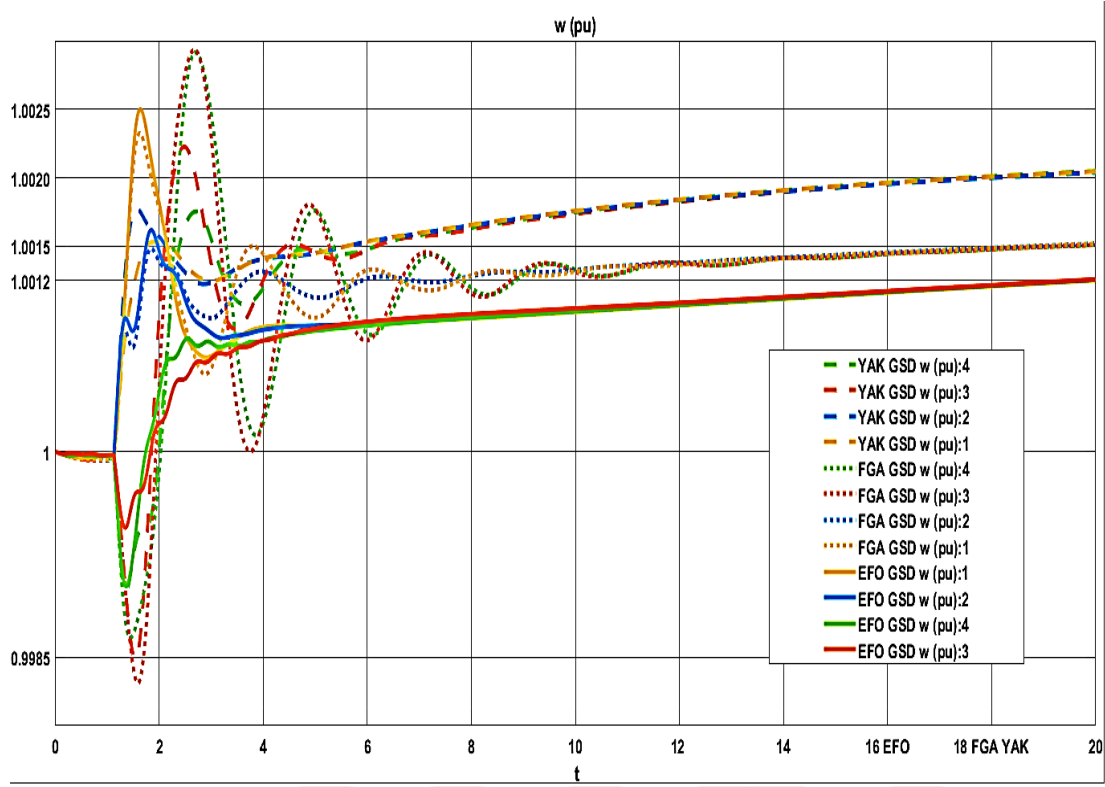
Şekil 7.23. Durum 6 (Hafif Yük) rotor açısı değişimi kararlılığı

Durum 6 için incelendiğinde rotor açısı(d_{teta}) değerleri M4 jeneratörünün 1 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 33 derece ile EFO' ya ait olup, 2 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 15 derece ile FGA' ye ait ve 3 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 9 derece ile FGA' ye aittir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



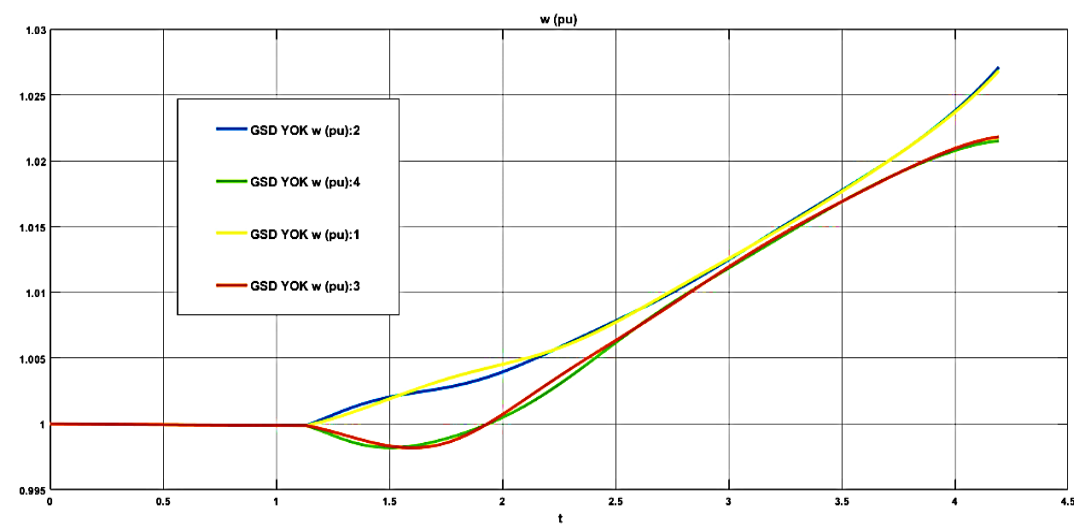
Şekil 7.24. Durum 6 (Hafif Yük) rotor açısı değişimi GSD yok

Durum 7



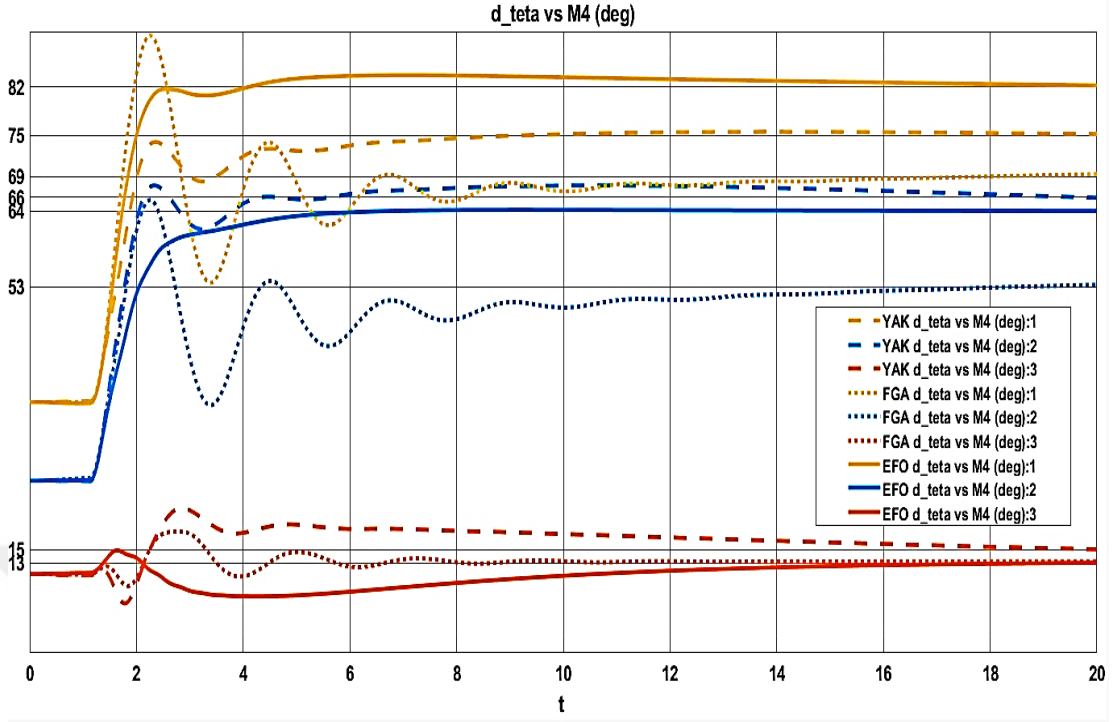
Şekil 7.25. Durum 7 (Nominal Yük) rotor hız değişimi kararlılığı

Durum 7 için incelendiğinde açısız hız değerleri(w) EFO için 1,0012 p.u. sönümlenme oluşurken, FGA için 1,0015 değerinde sönümlenme sağladığı ve YAK için ise 1,0020 değerinde sönümlendiği, bu sönümlmeleri sağladıkları zaman sürecine baktığımızda ise EFO' nun 16. saniyede, YAK' nin 18. saniyede ve FGA' nin 18. saniyede dört adet jeneratörün hızlarının bir değere sabitlendiği görülmektedir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



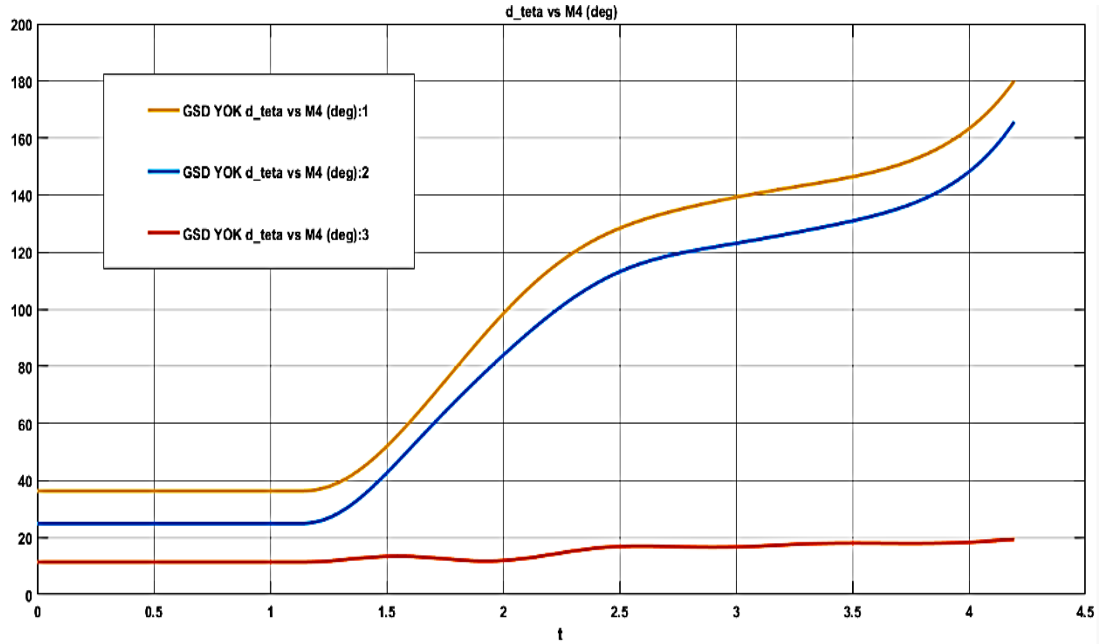
Şekil 7.26. Durum 7 (Nominal Yük) rotor hız değişimi GSD yok

Durum 7



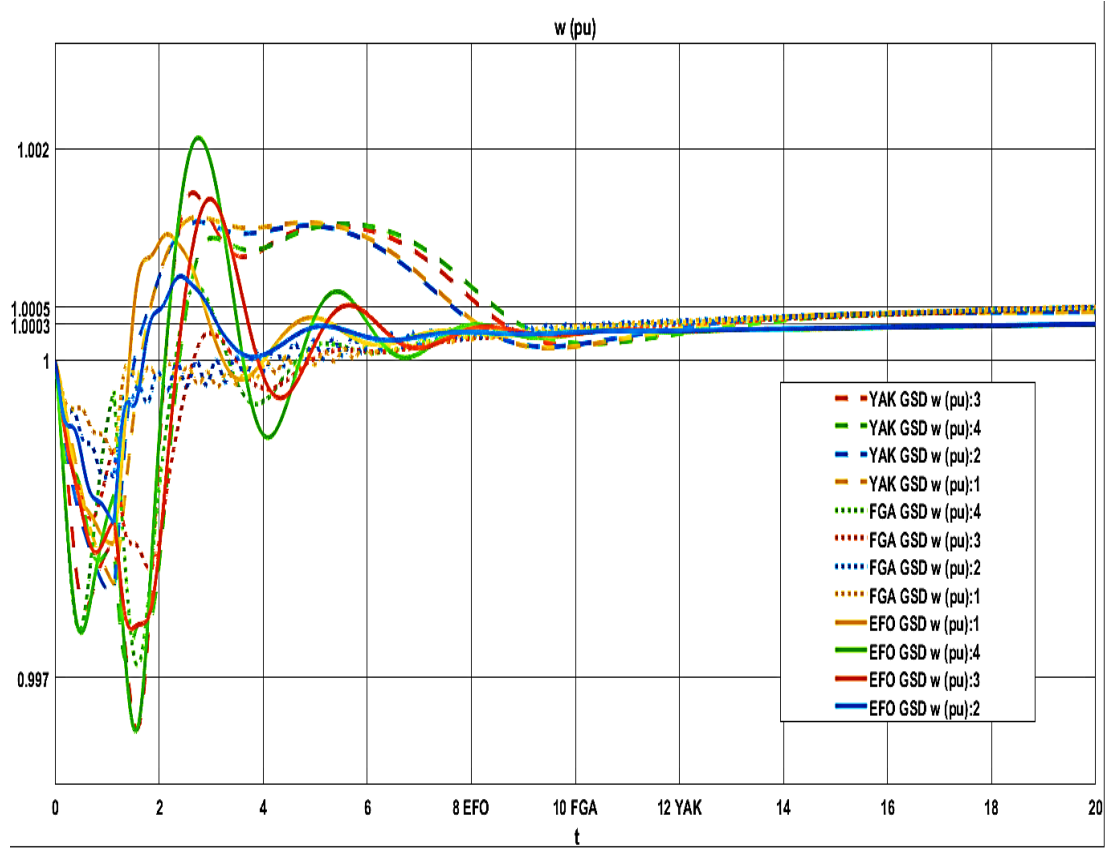
Şekil 7.27. Durum 7 (Nominal Yük) rotor açısı değişimi kararlılığı

Durum 7 için incelendiğinde rotor açısı(d_{teta}) değerleri M4 jeneratörünün 1 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 69 derece ile FGA' ye ait olup, 2 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 53 derece ile FGA' ya ait ve 3 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 13 derece ile EFO ve FGA' ye aittir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



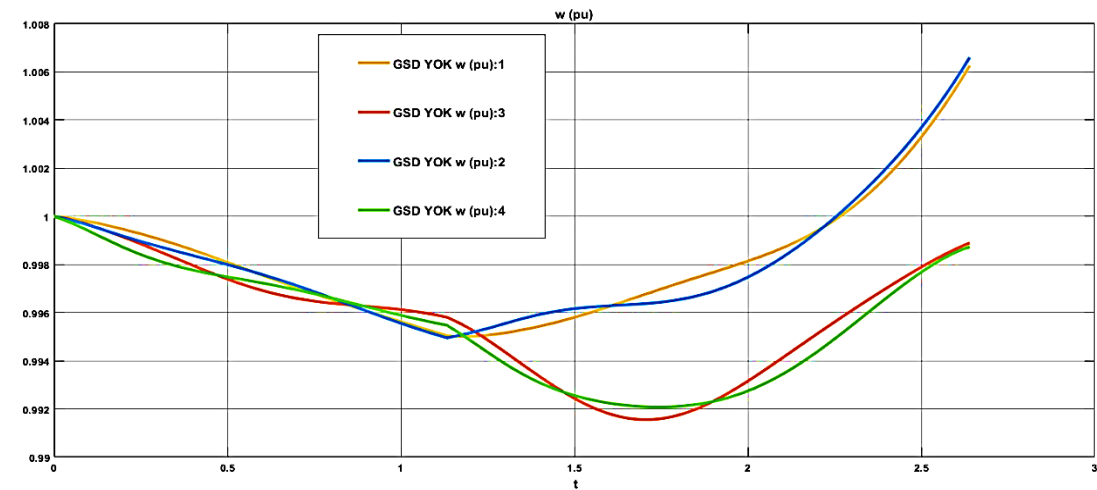
Şekil 7.28. Durum 7 (Nominal Yük) rotor açısı değişimi GSD yok

Durum 8



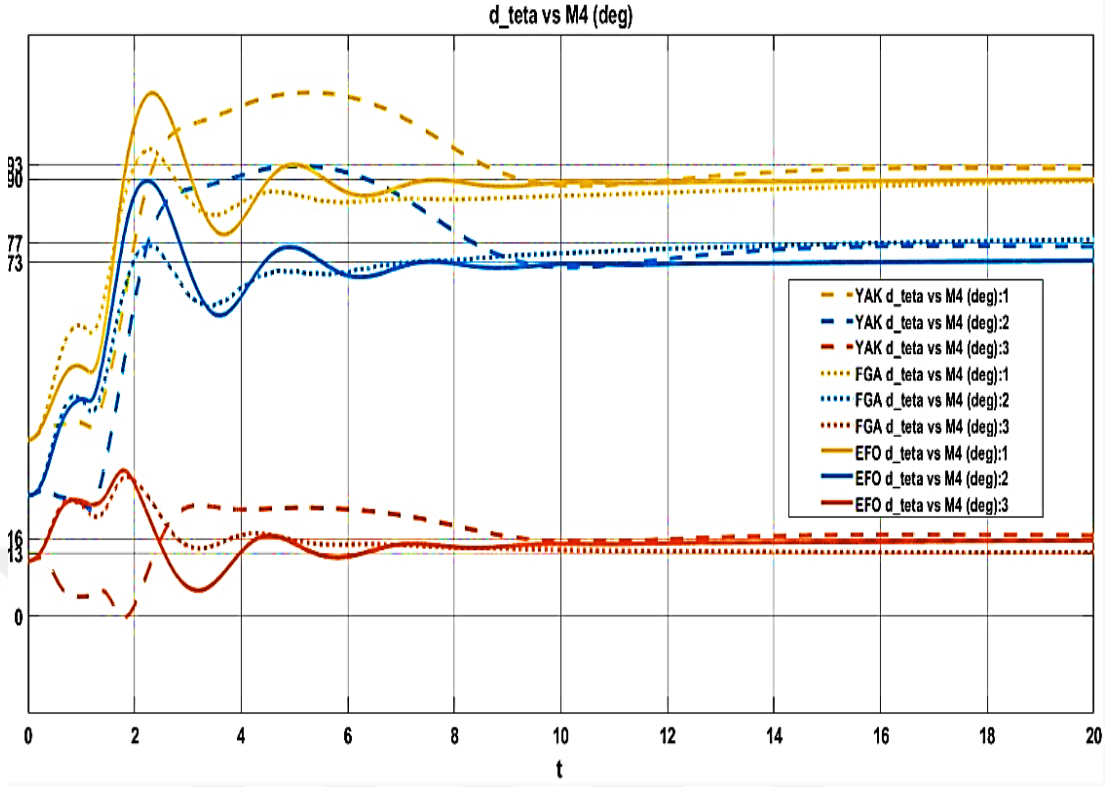
Şekil 7.29. Durum 8 (Ağır Yük) rotor hız değişimi kararlılığı

Durum 8 için incelendiğinde açısız hız değerleri(w) EFO için 1,0003 p.u. sönümlenme oluşurken, FGA ve YAK için ise 1,0005 değerinde sönümlendiği, bu sönümlmeleri sağladıkları zaman sürecine baktığımızda ise EFO' nun 8. saniyede, YAK' nin 12. saniyede ve FGA' nin 10. saniyede dört adet jeneratörün hızlarının bir değere sabitlendiği görülmektedir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



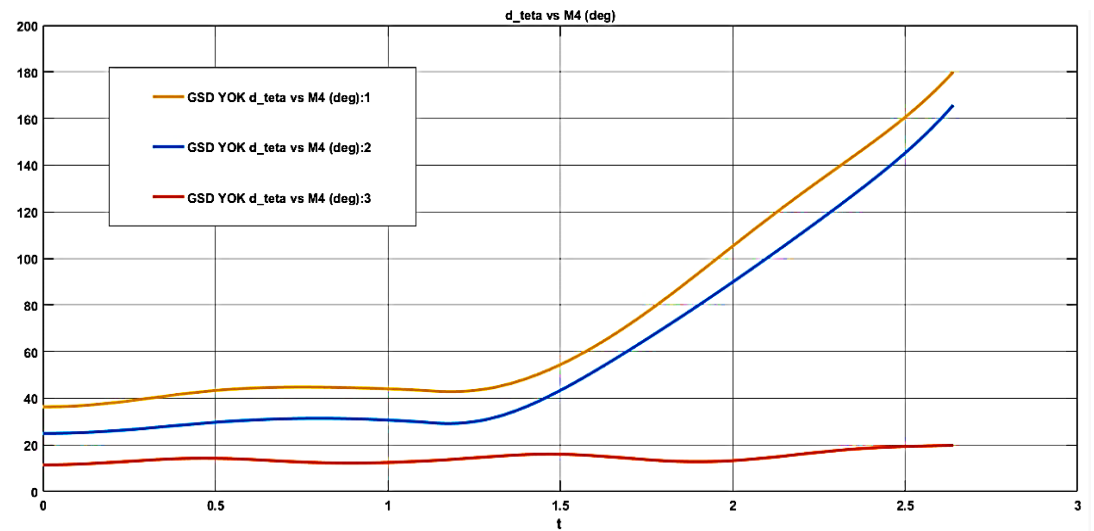
Şekil 7.30. Durum 8 (Ağır Yük) rotor hız değişimi GSD yok

Durum 8



Şekil 7.31. Durum 8 (Ağır Yük) rotor açısı değişimi kararlılığı

Durum 8 için incelendiğinde rotor açısı(d_{teta}) değerleri M4 jeneratörünün 1 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 90 derece ile FGA ve EFO' ya ait olup, 2 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 73 derece ile EFO' ya ait ve 3 no lu jeneratör ile yaptığı en düşük açı 13 derece ile FGA' ye aittir. Aşağıda yer alan GSD yok durumda ise güç sisteminde çökme meydana gelmiştir.



Şekil 7.32. Durum 8 (Ağır Yük) rotor açısı değişimi GSD yok

7.3.Simülasyon Grafik Sonuçları

Çizelge 7.10. Sonuç grafiklerine göre açısal hız ve sönümlenme zamanları

w(pu)		EFO(w)	YAK(w)	FGA(w)	EFO_t(s)	YAK_t(s)	FGA_t(s)
Durum 1	L-G	1,0011	1,0011	1,0016	4	8	6
Durum 2	L-L-G	1,0016	1,0019	1,0019	10	14	18
Durum 3	L-L-L-G	1,0010	1,0010	1,0014	12	14	14
Durum 4	L-L-L	1,0011	1,0011	1,0019	10	14	18
Durum 5	L-L	1,0010	1,0013	1,0013	10	16	12
Durum 6	Hafif Yük	1,0053	1,0073	1,0043	18	16	18
Durum 7	Nominal Yük	1,0012	1,0020	1,0015	16	18	18
Durum 8	Ağır Yük	1,0003	1,0005	1,0005	8	12	10

Kısa devre ve yük değişimi durumlarının grafikleri incelendiğinde 7 farklı durumda EFO ile en küçük açısal hız değerlerini ulaşırken, bu durum 3 farklı durumda YAK ve 1 farklı durumda FGA ile elde edilmiştir. Ayrıca grafiklerde sönümlenme zamanları incelendiğinde ise 7 farklı durumda EFO ile en iyi değerlere ulaşılmış ve YAK ise 1 kez en iyi zamanı yakaladığı analiz edilmiştir.

Grafik sonuçlarından açıkça görüleceği üzere sistem kararlılığı için açısal hız değişimlerinden herhangi biri referans işareti seçilmesi ile zamanla sönümlenerek uygulanan algoritmalar yoluyla kararlık elde edilmiştir. Güç sistemin bozucu durumlara karşı yeni belirlediği açısal hız değerleri ile eski çalışma koşullarına dönme yeteneğini EFO tabanlı GSD ile en iyi değerleri sağladığı görülmüştür.

Kısa devre arızası durumunda, genetik algoritma ve yapay arı kolonisi tabanlı GSD modellerine uygulanan Rüzgar Türbini içeren güç sisteminin benzetim çalışmalarında açısal hızların 1,0000 ve 1,0030 p.u. değerleri arasında, kararlılığa ulaştığı yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur. (Yokuş, 2022)

Çizelge 7.11. Sonuç grafiklerine göre rotor açısı değerleri

δ (derece)	Durum	EFO _teta _1	YAK _teta _1	FGA _teta _1	EFO _teta _2	YAK _teta _2	FGA _teta _2	EFO _teta _3	YAK _teta _3	FGA _teta _3
Durum 1	L-G	66	67	69	54	51	61	13	13	4
Durum 2	L-L-G	68	71	81	55	62	71	13	15	19
Durum 3	L-L-L-G	76	67	70	60	51	51	17	13	13
Durum 4	L-L-L	70	74	93	50	57	87	10	16	24
Durum 5	L-L	86	67	70	67	61	50	16	10	13
Durum 6	Hafif Yük	33	39	39	28	39	15	7	1	9
Durum 7	Nomin al Yük	82	75	69	64	67	53	13	15	13
Durum 8	Ağır Yük	90	93	90	73	77	77	16	16	13

Kısa devre ve yük değişimi durumlarının grafikleri incelendiğinde bir senkron jeneratörün diğer üç jeneratör ile yaptığı açılar dikkate alındığında 12 açıda EFO en küçük derecelere ulaşırken, 7 açıda YAK ve 9 açıda FGA ile en küçük açı değerlerine ulaşılmıştır.

Geçici hal kararlılığını analiz ederken, sistemin kararlı olup olmadığını belirlemek için zaman domeninde simülasyonlar yapılmalıdır. Çok makinalı elektrikli güç sistemlerinde, bir makinenin rotor açısını referans olarak alarak diğer makinelerin rotor açılarıyla karşılaştırılır. Eğer rotor açısı farkları zamanla artış gösteriyorsa, sistem kararsız kabul edilir. Rotor açısı farkları belli sınırlar içinde kalıyorsa, sistem kritik kararlıdır. Rotor açısı farkları zamanla azalırsa, sistem mutlak (kesin) kararlıdır. (Ekinci, 2010)

Ayrıca, iki jeneratör grubunun rotor açıları 180° ye yaklaştığında, makinelerin senkronizasyonu bozulabilir. Bu senkronizasyon kaybı, elektrik şebekesinde, şebekenin merkezi noktasına yakın bölgelerde, gerilimde ani bir düşüşe neden olabilir. (Yokuş, 2022)

8. GENEL DEĞERLENDİRMELER

Güç sistemlerinin dengeleyicilerinin tasarlanması için büyük çaba harcanmaktadır ve modern güç sistemlerinin zorluklarıyla başa çıkabilmesi için sürekli olarak geliştirilmektedir. Geleneksel dengeleyicilerin parametrelerini ayarlamak için optimal kontrol teknikleri kullanılmış ve güç sistemlerinin kararlılığını önemli ölçüde artırmıştır. Ancak, geleneksel dengeleyiciler bazı ağır çalışma koşullarında yetersiz kalabilir, çünkü genellikle doğrusal modellere dayanır ve zamanla değişen özelliklerle başa çıkamaz. Bu nedenle, modern güç sistemlerinde alternatif kontrolörlerin kullanılması gerekmektedir. Bu kontrolörler, parametrelerini çalışma koşullarına göre ayarlayabilir ve sistem dinamik performansını dış etkenlerin veya parametre belirsizliğinin olumsuz etkilenmesini önleyebilir.

Bu çalışmada, güç sistemi dengeleyicisinin parametrelerinin en uygun değerlerini belirlemek için elektrik balığı optimizasyonu kullanılmıştır. Elektrik balığı optimizasyonu, güç sistem kararlılığını sağlamak için yeni bir kontrol tekniğini önermek amacıyla kullanılmıştır. Önerilen algoritmanın farksal gelişim ve yapay arı kolonisi algoritmaları GSD ile karşılaştırıldığında üstün olduğu gösterilmiştir. Sonuçlar, elektrik balığı optimizasyonu ile güç sistem rotor açısı kararlılığı için etkili bir kontrol sağladığını göstermektedir.

Gelecekte, bu algoritmaların laboratuvar ortamında güç sistem modelleri üzerinde uygulanması, çok bölgeli güç sistemlerinde kullanılması ve algoritmaların geliştirilerek literatüre sunulması önemlidir.

Büyük ölçekli bozucu salınımlar, güç sistemlerinin kararlılığı açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu salınımlar, GSD tarafından sönümlenmektedir. Son yıllarda, güç elektroniği tabanlı Esnek AC İletim Sistemleri cihazları, güç sistemlerinin kararlılık analizlerinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Bu bağlamda, senkron jeneratörlerde uygulanan GSD modelleri ile Otomatik Gerilim Regülatörü, Statik Var Kompanzatörü ve Türbin Yöneticisi modellerinin birlikte kullanımının açısal hız, gerilim, aktif ve reaktif güç üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması ve analiz edilmesi üzerine bir temel oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

- Abdalqadir, H. (2018). *Analysis Of Transient Stability By Using Power System Stabilizer And Static Var Compensator*. Master Thesis, Republic Of Türkiye Siirt University Graduate School Of Natural And Applied .
- Abdulazeez, A. D. (2015). *Intelligent Coordinated Control Of Unified Power Flow Controller And Power System Stabilizer To Damp Inter-Area Oscillations In Multi-Machine Power Systems*. Master Thesis, University Of Gaziantep Graduate School Of Natural & Applied Sciences.
- Abedinia, O., Amjady, N., Izadfar, H. R., & Shayanfar, H. (2012). Multimachine power system oscillation damping: placement and tuning pss via multiobjective HBMO. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*(12(4)), 1-8.
- Ağın, A. (2013). *Enerji Sistemleri Kararlılığı Ve Güç Sistemi Dengeleyicisi Uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akay, B. (2009). *Nümerik optimizasyon problemlerinde yapay arı kolonisi algoritmasının performans analizi*. Kayseri: Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aksoy, E. (2007). *"Farksal gelişim algoritması ile anten dizilerinde örüntü şekillendirme"*, . Ankara: Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Al-Duwaish, H. N., & Hamouz, Z. (2011). A neural network based adaptive sliding mode controller: Application to a power system stabilizer. *Energy Conversion and Management* (52(2):), 1533-1538.
- Anderson, P. M., & Fouad, A.-a. (2003). *Power System Control and Stability* (2nd Edition ed.). Iowa: The Iowa State University Press.
- Anderson, P. M., & Fouad, A.-a. (2003). *Power System Control and Stability* . Iowa: The Iowa State University Press.
- Bal, E. (2012). *Gerilim Kontrolünde Güç Sistemleri Kararlı Kılıcısı Uygulamaları Ve Alternatifleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Cengiz, H., & Kaya, İ. (2019). Kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli sistemler için optimal PI denetleyici tasarımı. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*(10(2)), 537 - 547.
- Chen, C.-R., & Hsu, Y.-Y. (1991). Synchronous machine steady-state stability analysis using an artificial neural network. *IEEE Transactions on Energy Conversion* (6(1)), 12 - 20.
- Chi-Jui, W., & Yuan-Yih, H. (1988). Design of self-tuning PID power system stabilizer for multimachine power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*(3), 1059 - 1064.

- Cura, T. (2008). *Modern Sezgisel Teknikler ve Uygulamaları*. İstanbul: Papatya Yayıncılık.
- Çam, E., & Kocarslan, İ. (2005). A fuzzy gain scheduling PI controller application for an interconnected electrical power system. *Electric Power Systems Research*(73(3)), 267-274.
- Demirbaş, M. (2021). *Güç Sistemlerinde Küçük Sinyal Kararlılığının Upfc-Pod İle İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Demirbaş M. & Döşoğlu M.K (2022). *Güç Sistemlerinde Farklı PSS Modelleri Ve UPFC-POD İle Küçük Sinyal Kararlılığının İncelenmesi*. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(1), 11-22.
- Demiroren, A., & Zeynelgil, L. (2004). *Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması*. İstanbul: Birsan Yayınevi.
- Duman, S. (2010). *Güç Sistemlerinde Kararlılık Analizi İçin Pıd Kontrolör Parametrelerinin Genetik Algoritma Kullanarak Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Eke, İ. (2011). *Yapay Ari Kolonisi Algoritması Tabanlı Kararlı Güç Sistemi*. Ankara: Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Eke, İ., Taplamacıoğlu, M. C., & Kocaarslan, İ. (2011). Rotor Açısız Kararlılığı İçin Güç Sistemi Dengeleyicisi Tasarımı. *International Journal Of Engineering Research And Development*(3(2)).
- Ekinci, S. (2010). *Çok Makinalı Güç Sistemlerinde PSO Algoritması Yardımıyla Geçici Kararlılığın Düzeltilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Farhad, Z. (2015). *Rotor Açısı Kararlılığının Analizi Ve Optimizasyon Tekniklerinin Uygulanması*. Yüksek Lisans Tezi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ghahremani, E., Karrari, M., Menhaj, M. B., & Malik, O. (2008). Synchronous jeneratör thirdorder model parameter estimation using online experimental data. *IET Generation Transmission & Distribution*(2(5)), 708-719.
- Gupta, R., Bandyopadhyay, B., & Kulkarni, A. (2003). Design of power system stabiliser for single-machine system using robust periodic output feedback controller. *IEE Proceedings - Generation Transmission and Distribution*, 211 - 216.
- Gurralla, G., & Sen, I. (2008). A Modified Heffron-Phillip's Model for The Design of Power System Stabilizers. *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*. New Delhi, India: IEEE.
- Gülseren, U. (2010). *Genetik Algoritma İle Fuzzy Pss'in Kural Tablosu Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hatziargyriou, N., Milanovic, J., Rahmann, C., & Ajarapu, V. (2021). Definition and Classification of Power System. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*(36(4)).

- Holland, O., & Melhuish, C. (1999). Stigmergy. Self-Organization and Sorting in Collective Robotics . *Artificial Life*(5(2), 173-202.
- Husein, M. A. (2014). *Wide-Area Damping Of Power System Oscillations Using Model Predictive* . Master Thesis, Yaşar University Graduate School Of Natural And Applied Sciences.
- IEEE, & 1110-2002. (2002). *IEEE Guide for Synchronous Jeneratör Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*. USA, NY: The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- IEEE, S., & 421.5-2005. (2006). *IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies* (Revision of IEEE Std 421.5-1992 ed.). IEEE.
- Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). A Powerful and Efficient Algorithm for Numeric Optimization: Artificial Bee Colony (YAK) Algorithm. *Journal Of Global Optimization*(39(3)), 459-471.
- Karaboğa, D. (2004). *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*. İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım.
- Karaboğa, D. (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. *Technical Teport-TR06*.
- Khodabakhshian, A., & Hemmati, R. (2013). Multi-machine power system stabilizer design by using cultural algorithms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*(44(1)), 571-580.
- Kocarslan, İ., & Çam, E. (2005). Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load-frequency control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*(27(8)), 542-549.
- Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (1995). *Analysis of Electric Machinery*. New York: IEEE Press.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control* (First Edition ed.). New York: McGraw-Hill Professional.
- Küçüktezcan, F. (2012). *Genetik algoritma ile optimize edilmiş bulanık güç sistemi kararlı kılıcısının sistem kararlılığına etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kyriakides, E., & Heydt, G. T. (2004). Estimation of synchronous generator parameters using an observer for damper currents and a graphical user interface. *Electric Power Systems Research* (69(1)), 7-16.
- Larsen, E. V., & Swann, D. A. (1981). Applying Power System Stabilizers Part I: General Concepts. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*(6), 3017 - 3024.
- Larsen, E. V., & Swann, D. A. (1981). Applying Power System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*(6), 3025 - 3033.

- Larsen, E. V., & Swann, D. A. (1981). Applying Power System Stabilizers Part III: Practical Considerations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*(6), 3034 - 3046.
- Machowski, J., Bumby, J., & Bialek, J. (1997). *Power System Dynamics and Stability*. New York: John Wiley and Sons.
- Machowski, J., Bumby, J., & Bialek, J. (2008). *Power System Dynamics Stability and Control* (Second Edition ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- Mello, D., & Charles, C. (1969). Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*(PAS-88(4)), 316-329 .
- Montakhabı, K. (2022). *An Artificial Neural Network Based Emergency Controller To Improve Transient Stability In Power Systems*. Master Thesis, Istanbul Technical University Graduate School Department Of Electrical Engineering Electrical Engineering Programme.
- Motallebzadeh, M. (2022). *Adaptive Backstepping Control Based Emegency Scheme For Improving Transient Stability Of Power Systems With Renewable Energy Sources*. Master Thesisi, Istanbul Technical University Graduate School Department of Electrical Engineering Electrical Engineering Programme.
- Nabiyev, V. V. (2010). *Yapay Zeka İnsan-Bilgisayar Etkileşimi* (3. Baskı ed.). Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Nalbantoğlu, M. (2010). *Güç sistemlerinin kararlılığı için senkron jeneratörün uyarımının kayma kipli kontrolü*. Elazığ: Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özbay, M. (2021). *Farklı Jeneratör Denetleyicileri Ve Çbag Tabanlı Rüzgar Türbini Entegre Edilen Güç Sisteminde Küçük Sinyal Kararlılığının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Elektrik-Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Padiyar, K. R. (2004). *Power System Dynamics Stability and Control*. Singapore: John Wiley and Sons.
- Padiyar, K. R. (2008). *Power System Dynamics Stability and Control* (Second Edition Indian Institute of Science ed.). Bangalore: BS Publications.
- Pal, B. C., & Chaudhuri, B. (2003). *Robust Control in Power Systems* (1st ed ed.). New York: Pai M.A. and Stankovic A.M.
- Rogers, G. (2000). *Power System Oscillations*. Boston: Kluwer Academic.
- Saleh, K. K. (2016). *Transient Stability Improvement In Multi-Machine System Using Power System Stabilizer (Pss) And Static Var Compensator (Svc)*. Master Thesis, University Of Gaziantep Graduate School Of Natural & Applied Sciences.
- Salman, K. K. (2017). *Modeling And Simulation Of Bazyan Gas Power Plant*. Master Thesis, University Of Gaziantep Graduate School Of Natural & Applied Sciences.
- Sambariya, D. K., & Prasad, R. V. (2014). Robust tuning of power system stabilizer for small signal stability enhancement using metaheuristic bat algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*(61), 229-238.

- Sauer, P. W., & Pai, A. (1998). Power System Dynamics and Stability. (pp. 89-93, 262-270, 104-106, 255-261, 270-277). New Jersey: Prentice Hall.
- Sherbiny, M. K., & Mehta, D. M. (1973). Dynamic system stability part I – investigation of the effect of different loading and excitation systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*(PAS-92(5)), 1538-1546.
- Somarin, H. M. (2016). *Designing A Microgrid Stabilizer Using Sliding Mode Controller*. Master Thesis, Istanbul Technical University Graduate School Of Science Engineering And Technology.
- Storn, R. M., & Price, K. (1997). Differential Evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces . *Journal of Global Optimization*(11(4)), 341-359 .
- Tacer, M. E. (1990). *Enerji Sistemlerinde Kararlılık*. İstanbul: İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi.
- Taşar, B., & Özdemir, M. (2011). Sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratörün uyartım kontrolü için güç sistem kararlayıcısı tasarımı. *6th International Advanced Technologies* . Elazığ, Türkiye.
- Tereshko, V. (2000). Reaction-Diffusion Model of a Honeybee Colony's Foraging Behaviour. In M. S.-V. Parallel Problem Solving from Nature VI (Ed.), (pp. 807-816). Berlin.
- Tosun, S. (2011). *Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Sezgisel Yöntemlerle İncelenmesi*. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Trudnowski, D., Smith, J. R., Short, T. A., & Pierre, D. A. (1991). An application of Prony methods in PSS design for multimachine systems. *IEEE Transactions on Power Systems* (6(1)), 118 - 126.
- Tufan, F. (2013). *Senkron Jeneratör Statik İkaz Sisteminin Modellenmesi Ve Şebeke Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Vandiver, B., Apostolov., A., & Steinhauser, F. (2010). Testing of Phasor Measurement. *63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers* (pp. 1-5). College Station.
- Winston, M. L. (1988). The biology of the honey bee. *Harvard University Press*(35 (3)), 316-318 .
- Yalçın, Ş. B. (2019). *Güç Sistemlerindeki Alanlar Arası Salınım İçin Statik Var Kompansatör (Svc) Tabanlı Geniş Alan Sönümleme Sistemi Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Yang, T. (1997). Applying H_{∞} optimisation method to power system stabiliser design Part 1: Single-machine infinite-bus systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*(19(1)), 29-35.
- Yazıcı, İ. (2008). *Model referans kayan kipli kontrolör tabanlı güç sistem kararlayıcı tasarımı*. Kocaeli: Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yılmaz, S. (2020). *Electric Fish Optimization: A New Heuristic Algorithm Based On Electrolocation*. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği.

Yılmaz, S., & Sen, S. (2020). Electric fish optimization: a new heuristic algorithm inspired by electrolocation. *Neural Computing and Applications*(32(4)), 11543–11578.

Yokuş, H. (2022). *Rüzgar Türbini İçeren Bir Güç Sisteminin Geçici Hal Kararlılığının Güç Sistemi Dengeleyicisi Kullanılarak Karga Arama Algoritması İle İyileştirilmesi*. Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.

Yousf, I. (2019). *Design Of Robust Power System Stabilizer For Single Machine Infinite Bus System Using Modern Control Approaches*. Master Thesis, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Atılım University.

Yuan-Yih, H., & Cheng, C.-H. (1990). Design of fuzzy power system stabilisers for multimachine power systems. *IEE Proceedings C Generation Transmission and Distribution* (137(3)), 233 - 238.

Zhou, E. Z., Malik, O. P., & Hope, G. S. (1991). Theory and method for selection of power system stabilizer location. *IEEE Transactions on Energy Conversion*(6(1)), 170 - 176.

Zubaydi, A. (2012). *Yapay Zekâ Hesaplama Teknikleri Kullanılarak Eşzamanlı Jeneratörün En Uygun Duruma Getirilmiş Parametre Kontrolörü*. Ankara: Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

EKLER

EK 1

```
function RunEFO
tic
%% Electric Fish Optimization Algorithm, @version 1.0 (07/2017)
%
% Electric Fish Optimization (or EFO) algorithm, inspired from the
% object detection (electrolocation) and communication
% (electrocommunication) behaviors of electric fish, is the most recently
% swarm-intelligence based algorithm proposed by Selim Yilmaz and Sevil
% Sen.
%
% Contact:
% @author1 - Selim Yilmaz {selimy[at]cs.hacettepe.edu.tr}
% @author2 - Sevil Sen {ssen[at]cs.hacettepe.edu.tr}
clear all
clc
tzaman=cputime;
% Control parameters of EFO
populationSize = 10; % Population size, (M)
maxCycle = 5; % Maximum number of iterations
x = 0.989; % Balances the magnitudes of current frequency and
old amplitude values
activeIndSize = 10; % Subpopulation size, (K)
iterCounter = 1; % Iteration counter
problemIndex = 1; % Problem index, ranges from 1 to 50.
thres = 1e-5; % A small constant value
% Problem specific parameters
problem = callFunction(problemIndex); % A struct that gets problem information
lowerBound = problem.lowerBound; % Lower limit of the problem, (x_maxj)
upperBound = problem.upperBound; % Upper limit of the problem, (x_minj)
parameterSize = problem.parameterSize; % Parameter size to be optimized, (d)
name = problem.name; % Problem name
fMin = problem.fMin; % Global minimum of the problem
population = struct; % Population struct, (N)
% Initially all individuals are first initialized in the range of [x_maxj,
% x_minj] then their fitness values are calculated (see Sect. 2.3.1)
for p = 1 : populationSize

    population(p).solution = lowerBound + (upperBound - lowerBound) .* rand(1,
parameterSize);
    population(p).fitness = benchmark_func(population(p).solution, problemIndex);
    population(p).isActive = true;
end
% The best individual information is stored
[bestCost, index] = min( [population(:).fitness] );
bestIndividual = population(index).solution;
% The worst individual information is also stored for frequency calculation
```

```

[worstCost, index] = max( [population(:).fitness] );
worstIndividual = population(index).solution;
globalBest = bestCost;
globalBestSol = bestIndividual;
% Frequency (f) and amplitude (A) values are also initialized
for p = 1 : populationSize

    if std([population(:).fitness]) < thres,

        population(p).frequency = rand;

    else

        population(p).frequency = (worstCost - population(p).fitness) / (worstCost -
bestCost);

    end

    population(p).amplitude = population(p).frequency;
end

% Beginning of the optimization process
%while (iterCounter < maxCycle )
while (iterCounter < maxCycle && globalBest ~= fMin)
    for p = 1 : populationSize % For every individual do,

        newIndividual = population(p); % ith individual, (i)
        neighborIndividual = population; neighborIndividual(p) = []; % Neighbors of
i, (N - {i})

        if (newIndividual.frequency > rand) % Active electrolocation phase (see Sect.
2.3.2)

            population(p).isActive = true; % Broadcasts other individuals that ith
individual will be in active mode
            newIndividual.solution = activeSearch(newIndividual, neighborIndividual,
lowerBound, upperBound); % Performs search through active electrolocation

        else % Passive electrolocation phase (see Sect. 2.3.3)

            population(p).isActive = false; % Broadcasts other individuals that ith
individual will be in passive mode
            activePopulation = neighborIndividual( [neighborIndividual(:).isActive] ); %
Actively electrolocating individuals, (N_A)

            if ~isempty(activePopulation)

                newIndividual.solution = passiveSearch(newIndividual, activePopulation,
activeIndSize); % Performs search through passive electrolocation

```

```

end

if rand < rand, % Mutates one more parameter in a stochastic manner to keep
the population diverse

    I = randi(parameterSize);
    newIndividual.solution(I) = lowerBound(1,I) + (upperBound(1,I) -
lowerBound(1,I)) * rand;
end

end

newIndividual.solution = boundaryCheck(newIndividual.solution, lowerBound,
upperBound); % Solution set of candidate individual, (x_cand)

newIndividual.fitness = benchmark_func(newIndividual.solution,
problemIndex); % Fitness value of candidate individual

if newIndividual.fitness < population(p).fitness % Accepts if better source
found

    population(p) = newIndividual;

end

end

% The best individual information is stored
[bestCost, index] = min( [population(:).fitness] );
bestIndividual = population(index).solution;

% The worst individual information is also stored for frequency calculation
[worstCost, index] = max( [population(:).fitness] );
worstIndividual = population(index).solution;

% Frequency (f) and amplitude (A) values are updated
for p = 1: populationSize

    if std([population(:).fitness]) < thres,

        population(p).frequency = rand;

    else

        population(p).frequency = (worstCost - population(p).fitness) / (worstCost -
bestCost);

    end
end

```

```

        population(p).amplitude = population(p).amplitude * (x) +
        population(p).frequency * (1 - x);

```

```

end

```

```

    if bestCost < globalBest, % The best cost and solution found so far are stored

```

```

        globalBest = bestCost;
        globalBestSol = bestIndividual;

```

```

end

```

```

iterCounter = iterCounter + 1;

```

```

    disp(['EFO Problem:', num2str(problemIndex), '-',name,'
D:',num2str(problem.parameterSize), ...
' iter:', num2str(iterCounter), ' Fmin:', num2str(globalBest)])

```

```

% End of the iteration

```

```

end

```

```

Kpss1=globalBestSol(1,1);
T11=globalBestSol(1,2);
T21=globalBestSol(1,3);
Tw1=globalBestSol(1,4);
Kpss2=globalBestSol(1,5);
T12=globalBestSol(1,6);
T22=globalBestSol(1,7);
Tw2=globalBestSol(1,8);
Kpss3=globalBestSol(1,9);
T13=globalBestSol(1,10);
T23=globalBestSol(1,11);
Tw3=globalBestSol(1,12);
Kpss4=globalBestSol(1,13);
T14=globalBestSol(1,14);
T24=globalBestSol(1,15);
Tw4=globalBestSol(1,16);
run('power_PSS_1112')
sim('power_PSS_1112')
save RunEFO
toc
end

```

```

function newSolution = activeSearch(newIndividual, neighborIndividual,
lowerBound, upperBound)

```

```

%% Active Electrolocation Phase

```

```

activeRange = (upperBound - lowerBound) * newIndividual.amplitude; %
Calculates active search range
%activeRange tek değer olmalı
activeRange=mean(activeRange);

```

```

parameter = randi(size(newIndividual.solution, 2)); % Determines jth parameter to
modify

dist = getDistance(newIndividual.solution, [neighborIndividual(:).solution]); %
Obtains cartesian distance between ith individual and its neighbors ( i.e.,  $N \setminus \{i\}$  )

index = find(dist < activeRange); % Determines if at least a neighbor exists in the
active search range

if isempty(index) % If no neighbor exists in the search range (see Eq. 7)

    newIndividual.solution(parameter) = newIndividual.solution(parameter) + (2 * rand
- 1) * activeRange;

else % If at least one neighbor exists in the search range (see Eq. 6)

    selectedNeighbor = index(randi(size(index, 1))); % Randomly selects one neighbor
individual (k) among those inside active range area
    newIndividual.solution(parameter) = newIndividual.solution(parameter) + ...
        (neighborIndividual(selectedNeighbor).solution(parameter) - ...
        newIndividual.solution(parameter)) * (2 * rand - 1);

end

newSolution = newIndividual.solution;
end

function newSolution = passiveSearch(newIndividual, activePopulation,
activeIndSize)
%% Passive Electrolocation Phase

e = 1e-6; % A small constant used in distance calculation
D = size(newIndividual.solution, 2); % Parameter size of the problem

if size(activePopulation, 2) < activeIndSize, % If the number of active individuals
is less than that of predetermined neighbor, (K)

    activeIndSize = size(activePopulation, 2); % Set K as the number of active
individuals

end

dist = getDistance(newIndividual.solution, [activePopulation(:).solution]); % Obtains
cartesian distance between ith individual and those in active modes
p = cumsum([activePopulation(:).amplitude] ./ (dist' + e)); % The probability values
of active mode individuals (see Eq. 8)
selectedNeighbor = zeros(1, activeIndSize);

for i = 1 : activeIndSize, % K individuals are selected through fitness proportionate
(or roulette wheel) selection (see Eq. 8)

```

```
I = find (rand*p(end) < p);
selectedNeighbor(i) = I(1);
```

```
end
```

```
neighbor = activePopulation(selectedNeighbor);
solutionSet = reshape([neighbor.solution], D, activeIndSize);
xReference = sum(repmat([neighbor.amplitude]', 1, D) .* solutionSet) ./
sum(repmat([neighbor.amplitude]', 1, D)); % A reference point is created (see Eq.
9)
newSolution = newIndividual.solution + (xReference - newIndividual.solution) .* (2
* rand(1, D) - 1); % Generates new location (see Eq. 10)
I = find(rand(1, D) > newIndividual.frequency); % Determines which modified
parameters will be accepted
newIndividual.solution(I) = newSolution(I);
newSolution = newIndividual.solution;
```

```
end
```

```
% Returns the cartesian distance between individual 'newIndividualSol' and
% its neighbors 'solutionSet' (see Eq. 5)
```

```
function dist = getDistance(newIndividualSol, solutionSet)
%% Distance Calculator
```

```
parameterSize = size(newIndividualSol, 2);
popSize = size(solutionSet, 2) / parameterSize;
solutionSet = reshape(solutionSet, parameterSize, popSize);
dist = sqrt(sum((solutionSet - repmat(newIndividualSol, popSize, 1)).^2, 2));
```

```
end
```

```
% Controls if a parameter value exceeds the space limits, if so it is
% relocated into the bound where it exceeds
```

```
function newIndividualSol = boundaryCheck(newIndividualSol, lowerBound,
upperBound)
%% Boundary Controller
```

```
newIndividualSol = min(newIndividualSol, upperBound);
newIndividualSol = max(newIndividualSol, lowerBound);
```

```
end
```

EK 2

```
tic
clear all
close all
clc
tzaman=cputime;
```

```

objfun='Spss';%/* Control Parameters of ABC algorithm*/
NP=10;%/* The number of colony size (employed bees+onlooker bees)*/
FoodNumber=NP/2;%/*The number of food sources equals the half of the colony
size*/
limit=10;%/*A food source which could not be improved through "limit" trials is
abandoned by its employed bee*/
maxCycle=5;%/*The number of cycles for foraging {a stopping criteria}*/

%/* Problem specific variables*/
D=16;%/*The number of parameters of the problem to be optimized*/
lb=[1 0.001 1 1 1 0.001 1 1 1 0.001 1 1 1 0.001 1 1];
ub=[50 0.01 10 30 50 0.01 10 30 50 0.01 10 30 50 0.01 10 30];

runtime=1;%/*Algorithm can be run many times in order to see its robustness*/

GlobalMins=zeros(1,runtime);

for r=1:runtime

% /*All food sources are initialized */
%/*Variables are initialized in the range [lb,ub]. If each parameter has different range,
use arrays lb[j], ub[j] instead of lb and ub */

Range = repmat((ub-lb),[FoodNumber 1]);
Lower = repmat(lb, [FoodNumber 1]);
Foods = rand(FoodNumber,D) .* Range + Lower;

ObjVal=feval(objfun,Foods);
for i=1:(FoodNumber)
Fitness(i)=calculateFitness(ObjVal);
end
%reset trial counters
trial=zeros(1,FoodNumber);

%/*The best food source is memorized*/
BestInd=find(ObjVal==min(ObjVal));
BestInd=BestInd(end);
GlobalMin=ObjVal(BestInd);
GlobalParams=Foods(BestInd,:);

iter=1;
while ((iter <= maxCycle)),

%%%%%%%%%%%%%EMPLOYEDBEEPHASE

for i=1:(FoodNumber)

%/*The parameter to be changed is determined randomly*/
Param2Change=fix(rand*D)+1;

```

```

    /*A randomly chosen solution is used in producing a mutant solution of the
    solution i*/
    neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;

    /*Randomly selected solution must be different from the solution i*/
    while(neighbour==i)
        neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;
    end;

    sol=Foods(i,:);
    /*  $v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij} * (x_{kj} - x_{ij})$  */
    sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+(Foods(i,Param2Change)-
    Foods(neighbour,Param2Change))*(rand-0.5)*2;

    /* if generated parameter value is out of boundaries, it is shifted onto the
    boundaries*/
    ind=find(sol<lb);
    sol(ind)=lb(ind);
    ind=find(sol>ub);
    sol(ind)=ub(ind);

    %evaluate new solution
    ObjValSol=feval(objfun,sol);
    FitnessSol(i)=calculateFitness(ObjValSol);

    /* a greedy selection is applied between the current solution i and its
    mutant*/
    if (FitnessSol(i)>Fitness(i)) /*If the mutant solution is better than the current
    solution i, replace the solution with the mutant and reset the trial counter of solution
    i*/
        Foods(i,:)=sol;
        Fitness(i)=FitnessSol(i);
        ObjVal(i)=ObjValSol;
        trial(i)=0;
    else
        trial(i)=trial(i)+1; /*if the solution i can not be improved, increase its trial
    counter*/
    end;

    end;

    prob=(0.9.*Fitness./max(Fitness))+0.1;

    %%%%%%%%%% ONLOOKER BEE PHASE
    %%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%

    i=1;
    t=0;

```

```

while(t<FoodNumber)
    if(rand<prob(i))
        t=t+1;
        /*The parameter to be changed is determined randomly*/
        Param2Change=fix(rand*D)+1;

        /*A randomly chosen solution is used in producing a mutant solution of the
        solution i*/
        neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;

        /*Randomly selected solution must be different from the solution i*/
        while(neighbour==i)
            neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;
        end;

        sol=Foods(i,:);
        % /*v_{ij}=x_{ij}+\phi_{ij}*(x_{kj}-x_{ij}) */
        sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+(Foods(i,Param2Change)-
        Foods(neighbour,Param2Change))*(rand-0.5)*2;
        % /*if generated parameter value is out of boundaries, it is shifted onto the
        boundaries*/
        ind=find(sol<lb);
        sol(ind)=lb(ind);
        ind=find(sol>ub);
        sol(ind)=ub(ind);

        /*evaluate new solution
        ObjValSol=feval(objfun,sol);
        FitnessSol(i)=calculateFitness(ObjValSol);

        /*a greedy selection is applied between the current solution i and its mutant*/
        if (FitnessSol(i)>Fitness(i)) /*If the mutant solution is better than the current
        solution i, replace the solution with the mutant and reset the trial counter of solution
        i*/
            Foods(i,:)=sol;
            Fitness(i)=FitnessSol(i);
            ObjVal(i)=ObjValSol;
            trial(i)=0;
        else
            trial(i)=trial(i)+1; /*if the solution i can not be improved, increase its trial
            counter*/
        end;
    end;

    i=i+1;
    if (i==(FoodNumber)+1)
        i=1;
    end;
end;

```

```

%/*The best food source is memorized*/
ind=find(ObjVal==min(ObjVal));
ind=ind(end);
if (ObjVal(ind)<GlobalMin)
GlobalMin=ObjVal(ind);
GlobalParams=Foods(ind,:);
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% SCOUT BEE PHASE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%/*determine the food sources whose trial counter exceeds the "limit" value.
%In Basic ABC, only one scout is allowed to occur in each cycle*/

ind=find(trial==max(trial));
ind=ind(end);
if (trial(ind)>limit)
trial(ind)=0;
sol=(ub-lb).*rand(1,D)+lb;
ObjValSol=feval(objfun,sol);
FitnessSol=calculateFitness(ObjValSol);
Foods(ind,:)=sol;
Fitness(ind)=FitnessSol;
ObjVal(ind)=ObjValSol;
end;

fprintf('Iter=%d ObjVal=%g\n',iter,GlobalMin);
iter=iter+1;

end % End of ABC

GlobalMins(r)=GlobalMin;
end; %end of runs

Kpss1=GlobalParams(1,1);
T11=GlobalParams(1,2);
T21=GlobalParams(1,3);
Tw1=GlobalParams(1,4);
Kpss2=GlobalParams(1,5);
T12=GlobalParams(1,6);
T22=GlobalParams(1,7);
Tw2=GlobalParams(1,8);
Kpss3=GlobalParams(1,9);
T13=GlobalParams(1,10);
T23=GlobalParams(1,11);
Tw3=GlobalParams(1,12);
Kpss4=GlobalParams(1,13);
T14=GlobalParams(1,14);
T24=GlobalParams(1,15);
Tw4=GlobalParams(1,16);

```

```

run('power_PSS_1122')
sim('power_PSS_1122')
save runABC
toc

```

EK 3

```

tic
clc;
clear all;
close all;
tzaman=cputime;
l=[1 0.001 1 1 1 0.001 1 1 1 0.001 1 1 1 0.001 1 1];
u=[50 0.01 10 30 50 0.01 10 30 50 0.01 10 30 50 0.01 10 30];
dim=16;
%%Bounds & Parameters
Np=10;
lb = l.*ones(1,dim);
ub = u.*ones(1,dim);
T=5;
PCr=0.8;
F=0.85;
%%Initialisation
f=NaN(Np,1);
fu=NaN(Np,1);
D=dim;
U=NaN(Np,D);
%%Initial population
population= repmat(lb,Np,1) + repmat((ub-lb),Np,1).*rand(Np,D);
OF_I AE_PSS_121

%%Calculation of initial fitness
for p=1:Np
    f(p) = cost(p);
end

for Z=1:T

    for i=1:Np

        %%Mutation
        Candidates=[1:i-1 i+1:Np];
        idx=Candidates(randperm(Np-1,3));
        x1=population(idx(1),:);
        x2=population(idx(2),:);
        x3=population(idx(3),:);

        V=x1+F*(x2-x3);
        %%Crossover(binomial)
        del=randi(D,1);

```

```

for j=1:D
    if(rand<=PCr)||del==j
        U(i,j)=V(j);
    else
        U(i,j)=population(i,j);
    end
end
end
end
%%Checking Bounds and Greedy Selection
for j=1:Np
    U(j,:)=min(ub,U(j,:));
    U(j,:)=max(lb,U(j,:));
    population(j,:)=U(j,:);
    OF_I AE_PSS_121
    fu(j)=cost(j);

    if fu(j)<f(j)
        population(j,:)=U(j,:);
        f(j)=fu(j);
    end
end

disp(['Iteration ' num2str(Z) ': Best Cost = ' num2str((min(f)))]);

end
best_cost=find(f==min(f));
best_parameters=population(best_cost,:);

Kpss1=best_parameters(1,1);
T11=best_parameters(1,2);
T21=best_parameters(1,3);
Tw1=best_parameters(1,4);
Kpss2=best_parameters(1,5);
T12=best_parameters(1,6);
T22=best_parameters(1,7);
Tw2=best_parameters(1,8);
Kpss3=best_parameters(1,9);
T13=best_parameters(1,10);
T23=best_parameters(1,11);
Tw3=best_parameters(1,12);
Kpss4=best_parameters(1,13);
T14=best_parameters(1,14);
T24=best_parameters(1,15);
Tw4=best_parameters(1,16);
run('power_PSS_1132')
sim('power_PSS_1132')
save DE
tzaman=cputime-tzaman;
toc

```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Burak Kaya

Yabancı Dil: İngilizce

Eğitim Durumu:

Lisans: Kırıkkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği / 2010

Yayınları:

- [1] Kaya, B. (2020). Yapay Arı Kolonisi Algoritması İle Yapılan Geliştirmeler Ve Sonuçları. Verimlilik Dergisi (1), 99-115.
- [2] Kaya, B., & Eke, İ. (2024). Çok Makinalı Test Sisteminin, Kısa Devre Arızası Analizinde Güç Sistem Dengeleyicisi Parametrelerinin Elektrik Balığı Optimizasyonu ile Belirlenmesi. International Journal of Engineering Research and Development, 16(2), 530-549.