



**ROTOR AÇISI KARARLILIĞININ ANALİZİ VE OPTİMİZASYON  
TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI**

**Zakirhussain FARHAD**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2015**

Zakirhussain FARHAD tarafından hazırlanan “ROTOR AÇISI KARARLILIĞININ ANALİZİ VE OPTİMİZASYON TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Öğr. Gör. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, GAZİ Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**İkinci Danışman:** Yrd. Doç. Dr. İbrahim EKE

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı , Kırıkkale Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Başkan :** Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, GAZİ Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Üye :** Prof. Dr. M. Ali AKCAYOL

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, GAZİ Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Üye :** Doç. Dr. Erkan AFACAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, GAZİ Üniversitesi  
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 08 / 01 / 2015

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

.....  
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- 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 çalışmasında 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.

.....

Zakirhussain FARHAD

08/ 01/ 2015



ROTOR AÇISI KARARLILIĞININ ANALİZİ VE OPTİMİZASYON TEKNİKLERİNİN  
UYGULANMASI  
(Yüksek Lisans Tezi)

Zakirhussain FARHAD

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2015

ÖZET

Gelişen dünyada gün geçtikçe enerji ihtiyacının artması, elektrik enerjisi talebinin de sürekli artmasına neden olmaktadır. Bu durumda, elektrik enerjisinin belli standartlarda ve sürekli olarak tüketiciye sağlanması bir zorunluluk haline gelmiştir. Elektrik enerjisini, sabit gerilim ve frekans değerlerinde, kesintisiz olarak sağlamak ancak güç sistemlerinin kararlı çalışmasıyla mümkün olabilir. Güç sistemleri, elektrik enerjisi üretimi için senkron jeneratörlere bağımlıdır. Sistemin düzgün çalışması için gerekli koşul bütün senkron jeneratörlerin senkronizmada kalması ve çalışmaya devam etmesidir. Bu açıdan bakıldığında güç sistemlerinde kararlılık, senkron jeneratörlerin rotor açılarına bağlıdır. Bu tez çalışmasında ilk olarak tek makineli sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratörde oluşan salınımları sönmülemde kullanılan oransal integral türev tabanlı güç sistemi dengeleyicisinin ve ikinci olarak çok bölgeli sisteme bağlı senkron jeneratörlerde oluşan salınımları sönmülemde kullanılan güç sistemi dengeleyicilerinin parametrelerinin ayarlanması ile ilgili teknikler sunulmuştur. Ateş böceği algoritması ile tek makine sonsuz güçlü baraya bağlı güç sistem dengeleyicisi parametrelerinin ve yapay arı koloni algoritması ile çok makineli güç sistem dengeleyicisi parametrelerinin çözümü sağlanmıştır. Her iki algoritmada da özdeğer temelli amaç fonksiyonlar kullanılmıştır. Yapay arı koloni algoritması tabanlı güç sistem dengeleyicisi, dört makine iki bölgeli güç sisteminde farklı işletme koşullarında test edilmiştir. Tek makine için yarasa algoritması tabanlı güç sistem dengeleyicisi ile ateş böceği algoritması tabanlı oransal integral türev kontrolü güç sistem dengeleyicisi karşılaştırılmıştır. Ayrıca ikinci bölümde, otomatik gerilim regülatörü ve governörün devrede olup olmadığı durumlardaki; yapay arı kolonisi algoritma tabanlı GSD olan, 2 yapay arı kolonisi algoritma tabanlı GSD olan, 3 yapay arı kolonisi algoritması tabanlı güç sistem dengeleyicisinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve önerilen 4 yapay arı kolonisi algoritması tabanlı güç sistem dengeleyicisi olan dört makine iki bölgeli güç sistemin salınımlarını söndürmede daha hızlı cevaplar ürettiği gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 905.1.033

Anahtar Kelimeler : Tek makine sonsuz güçlü bara ve dört makine iki bölgeli güç sistemi, GSD, Ateş böceği ve yapay arı kolonisi algoritması

Sayfa Adedi : 128

Danışman : Öğr. Gör. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN

İkinci Danışman : Yrd. Doç. Dr. İbrahim EKE

ROTOR ANGLE STABILITY ANALYSIS VE OPTIMIZATION TECHNIQUES  
(M. Sc. Thesis)

Zakirhussain FARHAD

GAZI UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2015

ABSTRACT

Due to the daily increase of energy consumption, electric energy demand increases continuously in developing world. In this case, providing uninterrupted electric energy according to certain standards to consumers has become too important. For supplying uninterrupted electric energy with fixed value of voltage and frequency the power system must be stable. As known, for electric energy production the power systems are dependent to synchronous generators. All synchronous generators must be kept in synchronism for proper system working. According to that, power system stability is related to rotor angles of synchronous generators. In this thesis, first the techniques for a generalized parameter tuning of proportional integral derivative (PID) based power system stabilizer to damp the oscillatory modes of generator connected to a single machine infinite bus (SMIB) system are presented and second the techniques for a generalized parameter tuning of power system stabilizers to damp the oscillatory modes of generators connected to a two areas four generators power system are presented. For two area-four generators power system using power system analysis toolbox (PSAT) and PSSs are installed to damp the oscillations of the system under different inputs. Eigenvalue based objective function with Firefly Algorithm (FA) is used for two bounds parameters of PID-PSS (case-1 and case-2) of SMIB system and with Artificial Bee Colony (ABC) algorithm is used for two area four generators system to solve the problem. For SMIB system the comparative performance analysis of FA-PID-PSS (case-2) (proposed), FA-PID-PSS (case-1) and BA-CPSS is achieved and eigenvalue based analysis to guarantee the robust tuning of power system stabilizer. Also for two area-four generators system, without automatic voltage regulator (AVR) and turbine governor (TG), with AVR and TG, 1 ABC algorithm based PSS, 2 ABC algorithm based PSS, 3 ABC algorithm based PSS, 4 ABC algorithm based PSS the comparative performance analysis is performed, and at the result, fast settling time and low overshoot of speed response, and the eigenvalues location in the right hand side of s-plane of 4 ABC algorithm based PSSs power system indicates the superior performance than others.

Science Code : 905.1.033

Key Words : Single machine infinite bus and two area-four machines systems, stabilizer, Firefly Algorithm and Artificial Bee Colony Algorithm

Page Number : 128

Supervisor : Lecturer .Dr.Süleyman Sungur TEZCAN

Co-Supervisor : Assist. Prof. Dr. İbrahim EKE

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocalarım Öğr.Gör.Dr.Süleyman Sungur TEZCAN'a ve Yrd. Doç. Dr. İbrahim EKE'ye sonsuz teşekkürü bir borç bilirim. Yüksek lisans eğitimim sırasında bilgi birikimimin artmasında önemli katkılara sahip olan sayın Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na, Doç.Dr. M. Timur AYDEMİR'a, Prof.Dr. İres İSKENDER'e ve Yrd. Doç. Dr. Ertuğrul AKSOY'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarına doğrudan veya dolaylı olarak katkıda bulunan çalışma arkadaşlarıma özellikle de Shah Jahan SAFİ'ye teşekkür ederim.

Maddi desteklerinden dolayı Afganistan İslami Cumhuriyet'e teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜÇ SİSTEMİ.....	9
2.1. Güç Sistemlerinde Kararlılığın Tanımı .....	9
2.2. Rotor Açısı Kararlılığı.....	11
2.2.1. Küçük işaret kararlılığı .....	13
2.2.2. Geçici hal kararlılığı .....	14
2.3. Gerilim Kararlılığı.....	22
2.4. Frekans Kararlılığı.....	23
3. SENKRON MAKİNELER .....	25
3.1. Senkron Makinenin Dinamik Modellenmesi .....	26
3.2. Senkron Makine Modelinin Basitleştirilmesi.....	28
3.2.1. Park dönüşüm matrisi .....	28
3.2.2. Rotor referans çevre dönüşümü.....	30
3.3. Tek Makine Sonsuz Güçlü Bara Sistemi.....	32
3.3.1. Salınımların klasik model aracılığı ile incelenmesi.....	32
3.3.2. Senkron jeneratörün basitleştirilmiş modeli .....	36
3.4. Otomatik Gerilim Regülâtörü ve Uyarma Sistemleri.....	41

	<b>Sayfa</b>
3.4.1. DA tipi uyarım sistem modelleri .....	42
3.4.2. ST tipi uyarım sistem modelleri .....	42
3.5. Güç Sistemi Dengeleyicisi (Power System Stabilizer PSS).....	43
3.5.1.Uyarım sisteme uygulamalı güç sistem dengeleyecisi .....	43
3.5.2. Güç sistem dengeleyicisinin çeşitleri .....	45
<b>4. ÇOK MAKİNALI GÜÇ SİSTEM ANALİZİ .....</b>	<b>47</b>
4.1. Basitleştirilmiş Bir Sistem Modeli .....	47
4.1.1. Jeneratör denklemleri ve atalet merkezi (center of inertia COI) referans ..	49
4.1.2. Doğrusal durum uzayı denklemleri .....	53
4.2. Ayrıntılı Model: Durum – 1 .....	55
4.3. Ayrıntılı Model: Durum – 2 .....	59
4.4. Yük ve SVC Dinamiklerini İçerme .....	66
4.5. Büyük Güç Sistem Modal Analiz.....	68
<b>5. OPTİMİZASYON VE SEZGİSEL ALGORİTMALAR .....</b>	<b>77</b>
5.1. Ateş Böceği Algoritması .....	77
5.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması .....	79
<b>6. BENZETİM ÇALIŞMALARI .....</b>	<b>83</b>
6.1. TMSGB Sistemi için Benzetim Çalışmaları .....	83
6.1.1. Geleneksel güç sistemi dengeleyicisi .....	83
6.1.2. PID-GSD parametre ayarı .....	84
6.1.3. Deneysel durumların oluşturması.....	86
6.1.4. Özdeğer analizi.....	87
6.1.5. Benzetim sonuçları ve hız tepkisi analizi .....	91
6.2. Dört Makine iki Bölge Sistemi için Benzetim Çalışmaları.....	96

	<b>Sayfa</b>
6.2.1. Sezgisel yöntemler ile GSD parametre ayarı.....	97
6.2.2. Çok makineli GSD parametre ayarı ve benzetim çalışmaları .....	98
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>113</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>121</b>
EK -1. Tek Makineli Sonsuz Güçlü Bara Sistemin Dataları .....	122
EK -2. Ateş Böceği Algoritması .....	123
EK -3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması .....	125
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>128</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. IEEE uyarıcı modelleri .....	39
Çizelge 6.1. Geleneksel GSD parametre aralıkları .....	81
Çizelge 6.2. Durum-1 için PID-GSD parametre aralıkları.....	81
Çizelge 6.3. Durum-2 için PID-GSD parametre aralıkları.....	81
Çizelge 6.4. GSD olmadan 1–8 elektro-mekanik modları için özdeğer, sönümlenme oranı ve salınımın frekans.....	85
Çizelge 6.5. FA ile PID-GSD parametrelerinin ayarı .....	87
Çizelge 6.6. BA ile GSD parametrelerinin ayarı .....	87
Çizelge 6.7. GSD olmadan system, FA-PID-GSD sistem ve BA-GSD sistem için özdeğer tabanlı kararsız ve kararlı işletme koşulları.....	87
Çizelge 6.8. İşletme örnek koşul 1–8 için FA-PID-GSD (durum-1, 2) ve BA-GSD elektro- mekanikal modların özdeğer, sönümlenme oranı ve salınım frekansı.....	88
Çizelge 6.9. FA-PID-GSD (durum- 1, 2) ve BA-GSD [13, 9] ile hız tepkisi için yerleşme zamanı (settling time) ve overshoot .....	94
Çizelge 6.10. ABC algoritmasında kullanılan değişkenler .....	95
Çizelge 6.11. Test için güç sistemin yük durumları .....	96

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Güç sistem kararlılığı sınıflandırılması .....	10
Şekil 2.2. İki senkron makina ve iletim hattından oluşan system .....	12
Şekil 2.3. Farklı rotor açısı davranışları.....	15
Şekil 2.4. Güç sistem yapısı.....	15
Şekil 2.5. Basitleştirilmiş güç sistem yapısı.....	16
Şekil 2.6. Vektör diyagramı .....	16
Şekil 2.7. Güç iletime karakteristiği .....	17
Şekil 3.1. Senkron makine rotor ve stator devreleri.....	24
Şekil 3.2. Senkron jeneratör d-q ekseni eşdeğer devreleri.....	28
Şekil 3.3. $X_e$ reaktansı üzerinden sonsuz baraya bağlı senkron jeneratör .....	31
Şekil 3.4. Sönümlenme ve senkronizasyon momenti etkisi.....	32
Şekil 3.5. Doğrusallaştırılmış TMSGB modeli.....	38
Şekil 3.6. GSD ve senkron jeneratör bağlantısı .....	41
Şekil 3.7. GSD parameter blok diyagramı .....	42
Şekil 4.1. çok makinalı güç sistemi diyagramı .....	46
Şekil 4.2. Eş 4.4 temsil eden bir direnç ağı.....	47
Şekil 4.3. Küçük sinyal analizi için bir elektrik şebekesi analog, (a). Azaltılmamış ağı, (b). Azaltılmış ağı .....	52
Şekil 4.4. Stator eşdeğer devresi .....	53
Şekil 4.5. Azaltılmış ağı (jeneratörün iç baralar ile).....	53
Şekil 4.6. önemli ve daha az önemli alt sistemlerinin etkileşimi.....	72
Şekil 6.1 Amaç fonksiyonu İllüstrasyon. ....	84
Şekil 6.2. Sistem konfigürasyonu ve GSD'ler ile tek makine sonsuz bara sistemi .....	85

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.3. GSD olmadan sistemin 133 işletme koşulunun özdeğerlerinin grafiği .....	86
Şekil 6.4. FA-PID-GSD olan sistemin durum-1 için 133 işletme koşulunun özdeğerlerinin grafiği.....	88
Şekil 6.5. FA-PID-GSD olan sistemin durum-2 için 133 işletme koşulunun özdeğerlerinin grafiği.....	89
Şekil 6.6. BA-GSD olan sistemin 133 işletme koşulunun özdeğerlerinin grafiği. ....	89
Şekil 6.7. Koşul-1 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD, olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi .....	90
Şekil 6.8. Koşul-2 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD, olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi .....	91
Şekil 6.9. Koşul-3 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD, olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi .....	91
Şekil 6.10. Koşul-4 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD, olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi .....	92
Şekil 6.11. Koşul-5 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD, olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi .....	92
Şekil 6.12. Koşul-6 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD, olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi .....	93
Şekil 6.13. Koşul-7 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD, olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi .....	93
Şekil 6.14. Koşul-8 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD, olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi .....	94
Şekil 6.15. Dört jeneratör iki bölgeli güç sistemi .....	95
Şekil 6.16. Durum 1 için jeneratör $G_1$ 'in rotor hız değişimi.....	97
Şekil 6.17. Durum 1 için jeneratör $G_2$ 'nin rotor hız değişimi.....	97
Şekil 6.18. Durum 1 için jeneratör $G_3$ 'ün rotor hız değişimi.....	98
Şekil 6.19. Durum 1 için jeneratör $G_4$ 'ün rotor hız değişimi.....	98
Şekil 6.20. Durum 1 için OGR ve TG olmayan sistemin özdeğerleri .....	99
Şekil 6.21. Durum 1 için OGR ve TG olan sistemin özdeğerleri .....	99

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.22. Durum 1 için 1 GSD olan sistemin özdeğerleri.....	100
Şekil 6.23. Durum 1 için 2 GSD olan sistemin özdeğerleri.....	100
Şekil 6.24. Durum 1 için 3 GSD olan sistemin özdeğerleri.....	100
Şekil 6.25. Durum 1 için 4 GSD olan sistemin özdeğerleri.....	101
Şekil 6.26. Durum 2 için jeneratör $G_1$ 'in rotor hız değişimi.....	102
Şekil 6.27. Durum 2 için jeneratör $G_2$ 'nin rotor hız değişimi.....	102
Şekil 6.28. Durum 2 için jeneratör $G_3$ 'ün rotor hız değişimi.....	103
Şekil 6.29. Durum 2 için jeneratör $G_4$ 'ün rotor hız değişimi.....	103
Şekil 6.30. Durum 2 için OGR ve TG olmayan sistemin özdeğerleri .....	104
Şekil 6.31. Durum 2 için OGR ve TG olan sistemin özdeğerleri .....	104
Şekil 6.32. Durum 2 için 1 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri.....	104
Şekil 6.33. Durum 2 için 2 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri.....	105
Şekil 6.34. Durum 2 için 3 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri.....	105
Şekil 6.35. Durum 2 için 4 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri.....	105
Şekil 6.36. Durum 3 için jeneratör $G_1$ 'in rotor hız değişimi.....	106
Şekil 6.37. Durum 3 için jeneratör $G_2$ 'nin rotor hız değişimi.....	107
Şekil 6.38. Durum 3 için jeneratör $G_3$ 'ün rotor hız değişimi.....	107
Şekil 6.39. Durum 3 için jeneratör $G_4$ 'ün rotor hız değişimi.....	108
Şekil 6.40. Durum 3 için OGR ve TG olmayan sistemin özdeğerleri .....	108
Şekil 6.41. Durum 3 için OGR ve TG olan sistemin özdeğerleri .....	109
Şekil 6.42. Durum 3 için 1 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri.....	109
Şekil 6.43. Durum 3 için 2 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri.....	109
Şekil 6.44. Durum 3 için 3 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri.....	110
Şekil 6.45. Durum 3 için 4 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri.....	110

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>D</b>	Elektriksel sönümlenme momenti katsayısı,
<b>D<sub>m</sub></b>	Mekanik sönümlenme momenti katsayısıdır.
<b>E<sub>fd</sub></b>	Uyarma gerilimi
<b>E<sub>G</sub></b>	Senkron generatörün inüklene gerilimi
<b>E<sub>M</sub></b>	Senkron motorda inüklene gerilimi
<b>E<sub>q</sub></b>	q eksenli senkron generatörün inüklene gerilimi
<b>H</b>	Atalet sabiti
<b>J</b>	Atalet momenti
<b>J</b>	Performans indeksi
<b>K<sub>1</sub>-K<sub>6</sub></b>	Senkron jeneratör doğrusal model sabitleri
<b>K<sub>A</sub></b>	Uyarıcı kazancı
<b>K<sub>D</sub></b>	Kontrolör türev katsayısı
<b>K<sub>D</sub></b>	Sönümle momenti katsayısı
<b>K<sub>GSD</sub></b>	GSD'nin kazancı
<b>K<sub>I</sub></b>	Kontrolör integral katsayısı
<b>K<sub>P</sub></b>	Kontrolör oransal katsayısı
<b>K<sub>S</sub></b>	Senkronlama momenti katsayısı
<b>L<sub>d</sub></b>	d eksenli geçici hal öncesi endüktansı
<b>L<sub>lk<sub>d</sub></sub>, L<sub>md</sub></b>	d eksenli endüktansları
<b>L<sub>lk<sub>q</sub></sub>, L<sub>m<sub>q</sub></sub></b>	q eksenli endüktansları
<b>M</b>	Eylemsizlik sabiti
<b>P<sub>E</sub></b>	Elektriksel güç
<b>P<sub>M</sub></b>	Mekanik güç
<b>r<sub>e</sub></b>	Esdeğer hat direnci
<b>T'<sub>d0</sub></b>	d eksenli geçici hal öncesi açık devre zaman sabiti
<b>T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>,</b>	GSD faz kompanzasyon filtresi zaman sabitleri
<b>T<sub>a</sub></b>	Tahrik momenti

**Simgeler****Açıklamalar**

$T_A$	Uyarıcı zaman sabiti
$T_d$	d eksenini geçici hal kısa devre zaman sabiti
$T_{d0}$	d eksenini 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 generatör uç gerilimi
$W_k$	Dönen bir kütle için kinetik enerjisi
$x'_d$	d eksenini geçici reaktansı
$X_{ds}$	$E_q$ ile $V_s$ arasındaki toplam endüktif reaktansı
$x_e$	Esdeğer hat empedansı
$X_e$	Sonsuz güçlü baraya kadar olan endüktif reaktansı
$X_g$	Senkron generatörün indüktif reaktansı
$X_h$	Hat endüktif reaktansını
$X_m$	Senkron motorun indüktif reaktansı
$X_T$	Transformatörün endüktif reaktansı
$Y_{DQ}$	D ve Q eksenini sistemin admitans
$\delta$	Rotor açısı
$\Delta T_e$	Elektriksel moment değişimi
$\Delta \delta$	Rotor açısı değişimi
$\Delta \omega$	Rotor hız değişimi
$\theta_k$	COI'ye balı rotor açısı
$\theta_m$	Statorun duran referans eksenine göre rotorun açısal konumu
$\lambda_i$	Özdeğer
$\Lambda_r$	Rotor sargılarının akı
$\Lambda_s$	Stator sargılarının akı
$\xi_i$	Sönümleme oranı

**Simgeler****Açıklamalar**

$\sigma_i$	gerçek özdeğer
$\omega$	Rotor hızı
$\omega_i$	İmaginary özdeğer
$\omega_{sm}$	Mekanik senkron açısal hızı

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>ABC</b>	Artificial bee colony
<b>AESOPS</b>	Analysis of Essentially Spontaneous Oscillations in Power Systems
<b>BA</b>	Bat algoritması
<b>BGSD</b>	Bulanık mantık tabanlı güç sistem Dengeleyicisi
<b>CA</b>	Cultural algorithmı
<b>FA</b>	Firefly algoritması
<b>GSD</b>	Güç sistem dengeleyicisi
<b>OGR</b>	Otomatik gerilim regülatörü
<b>PEALS</b>	Program for Eigenvalue Analysis of Large Systems
<b>PID</b>	Proportional integral türev
<b>PSAT</b>	Power system analysis toolbox
<b>TG</b>	Türbin governor
<b>TMSGB</b>	Tek makine sonsuz güçlü bara
<b>YSA</b>	Yapay sinir ağ

## 1. GİRİŞ

Bu bölümde, araştırmanın problem durumu, araştırmanın amacı, araştırmanın önemi, varsayımlar, sınırlılıkları, konuyla ilgili araştırmalar ve tanımlar yer almaktadır.

### Problem Durumu

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

Normal çalışma koşullarında büyük güç sistemlerine göre, izole edilmiş küçük güç sistemleri daha kararlı olmakla birlikte, sürekli artan yük ihtiyaçlarını karşılayamamakta ve bir arıza durumunda kolaylıkla çökebilmektedir. Diğer taraftan bir arıza durumunda gerekli gücü başka kaynaklardan sağlanabilmesine olanak tanıyan büyük enterkonnekte sistemleri daha güvenilir olmakla birlikte, mühim kararlılık sorunları gösterir. Güç sistemlerinin kararlılığı, bir bozucu etkiye maruz kalan sistemin, bu etki sonrasında bozucu etki öncesindeki çalışma koşullarına tekrar dönme kabiliyeti anlamındadır [1].

Güç sistemlerinin analizinde çoğunlukla senkron makinenin bir enerji iletim hattı ve bir transformatör üzerinden sonsuz büyük güçlü şebekeye bağlı olduğu varsayılır. Güç sistemlerinin doğası gereği, sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratörler çok değişken bir yük karakteristiğine sahiptirler. Bir güç sisteminde normal çalışma anında sisteme ilave yük girmesi veya sistemden yük çıkması, güç sisteminde düşük genlikli ve düşük frekanslı, (0.2 - 3.0 Hz), salınımlara sebep olur. Düşük genlikte ve frekanstaki güç salınımlarının çok uzun periyotlarda devam etmesi enterkonnekte sistemde güç iletimini sınırlayacak boyutlara varmasına hatta sistemin çökmesine neden olur [2]. Güç sistemlerinde oluşabilecek bozucu etkiler sonucu mekanik ve elektriksel güç dengesinin bozulması durumunda sistemin açılabilir kararlılığını koruyabilmesi için öncelikle yeterli senkronizasyon momentinin üretilmesi gerekir. Otomatik gerilim regülatörünün çevriminde uyarma ana elemandır, otomatik

gerilim regülatör (OGR) jeneratör uyarma alanına doğru akım sağlar. Senkronlayıcı momente katkısıyla bu salınımı söndürerek senkron makinenin senkronizmada kalmasını sağlar. Elektrik güç sistemi büyük bir bozucu tesirle karşılaştığında ise senkronlayıcı moment yetersiz kalabilir. Yeterli miktar sönüm momentinin üretilmesi için senkron makineye güç sistemi dengeleyicisi (power system stabilizer, PSS, GSD) eklenir. 1960'ların ortalarından itibaren güç sistemi dengeleyicileri, senkronlayıcı momente ek olarak sönüm momenti sağlamak amacıyla, gerilim regülatörü girişine ek bir gerilim işareti uygulamaktadır [3].

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

### Araştırmanın Amacı

Elektrik sistemlerindeki rotor açısı kararlılığı, önemli bir sorun olarak kabul edilir. Bu nedenle, rotor açısı kararlılığının iyileştirebilmesi için en uygun yöntemlerden birisi güç sistemi dengeleyicisi kullanmaktır. GSD'nın parametreleri belirli bir çalışma noktası civarında ayarlandığından bu nokta civarı için iyi bir performansa sahiptirler. Geleneksel GSD'ler bu çalışma durumu dışında en uygun başarıyı garanti etmezler. Bu nedenle, güç sistemlerinde çalışma noktasının veya bazı sistem parametrelerinin değişmesi durumunda başarı kaybına uğramayan, dayanıklı yapıya sahip güç sistemi dengeleyicisi tasarımı çalışmalarında yapay zeka kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, güç sistem kararlılığı için mevcut yöntemlerin ve modellerin açıklaması; tek makineli sonsuz güçlü bara sistemi için sezgisel ateş böceği algoritmasını (Firefly Algorithm, FA) kullanarak dayanıklı yapıya sahip oransal integral türev (Proportional Integral Derivative, PID) tabanlı güç sistemi dengeleyicisi tasarımı, 133 farklı durum için yapılması ve lag lead türü dengeleyicisi ile karşılaştırılması; çok bölgeli güç sistemi için yapay arı kolonisi (artificial bee colony, ABC) algoritması ile güç sistemi dengeleyicisi parametrelerinin ayarının yapılması ve en son küçük ölçekli ve geçici olayların simülasyonu için yazılım programı geliştirilmesidir.

### Araştırmanın Önemi

Bir güç sistemi birçok hafif elektromekanik sönümlü titreşimleri olan büyük bir enterkonnekte sistem olarak düşünülebilir. Bu salınımlar esnasında elektrik, güç şebekesine akar olarak mekanik kinetik enerjisi senkron jeneratörleri arasında değiştirilir. Çok değişkenlik göstermekte birlikte rotor hızı ve güç akımı bu salınımlar için önemlidir. Rotor hızı değişimi, santralin mekanik parçasının zorlanmasına neden olur ve sınırlandırılmalıdır. Güç akış salınımları, bir enerji hattının her noktasında olabilir. Bunlar, sabit hat akımı bindirilerek artan güvenlik marjları gerektiren transfer kapasitesini sınırlandırır. Ayrıca, kesintisiz istenen limitlerde gerilim ve frekans ihtiyacından dolayı güç sistemlerinin kararlı olarak çalışması, sistemin düzgün çalışması için en önemli koşuldur. Farklı arıza durumları (Kısa devreler, üretim birimlerinin devre dışı kalması, büyük güçlü tüketicilerin devreden çıkması vb.) senkron jeneratörlerin senkronizasyondan çıkmalarına ve kararlılık sorunlarına neden olmaktadır. Bu kararlılık durumları optimizasyon metotları kullanılarak rotor açısının kontrolü incelenecek ve kararsızlık durumu giderilmeye çalışılacaktır.

### Araştırmanın kapsamı

- Bu çalışmada yer verilen güç sistem rotor açısı kararlılığı iki model ile sınırlıdır.
- Tek makineli sonsuz güçlü bara sistemi için Heffron-Phillips modeli ve dört makineli iki bölgeli sistemi için Prabha Kundur, "Power System Stability and Control ", örnek 12.6, sayfa 813'teki modeli.
- MATLAB ve Power System Analysis Toolbox (PSAT) ortamında bu çalışma yapılmıştır.
- Tek makineli sonsuz güçlü bara sistemi için geleneksel güç sistemi dengeleyicisi ve PID tabanlı güç sistemi dengeleyicisi tasarımı.
- Sezgisel ateş böceği algoritması ile PID tabanlı parametrelerinin ayarının ve 133 farklı durumda özdeğerler elde edilip sistemin kararlılığı için incelenmesi hedeflenmiştir.
- Yarasa algoritması ile ayarlanan güç sistemi dengeleyicisinin karşılaştırılması ateş böceği algoritması ile ayarlanan PID tabanlı güç sistemi dengeleyicisi ile yapılmıştır.
- Dört makineli iki bölgeli sistemi için Lag Lead tabanlı güç sistemi dengeleyicisi tasarımı.

- Sezgisel yapay arı kolonisi (artificial bee colony, ABC) algoritması ile güç sistemi dengeleyicisi parametrelerinin ayarın yapılmış ve sonra farklı yük durumlarında özdeğerleri incelenmiştir.

#### Konuyla ilgili daha önceki araştırmalar

Güç sistemlerinde görülen bu salınımların sönümlenmesi ve güç sisteminin sürekli hal kararlılığının iyileştirilmesi için çeşitli araştırmacılar tarafından çalışmalar yapılmıştır.

*Amin Khodabakhshian, Reza Hemmati;* (2013), yılında yaptığı çalışmasında GSD'nin parametreleri ayarlamak için kültürel algoritması (cultural algorithms, CA) kullanılmıştır. Simülasyonları da iki tipik çok-makineli elektrik sistemleri hakkında yapılmıştır [4].

*Gurralla, G. and Sen;* (2008), tarafından çalışmalarının temelini oluşturan Heffron-Phillips, GSD tasarımı ve düşük genlikli salınımların senkron makinede incelenmesi için tek makine sonsuz güçlü bara (single machine infinite busbar, SMIB) sistemini önermişlerdir. Heffron-Phillips, hem doğası hem de yapısı gereği doğrusal olmayan GSD için güç sisteminin doğrusallaştırılmış modelini kullanarak güç sisteminde seçilen çalışma noktası için analizler yapmışlardır [5].

*Larsen, E. V. and Swann D.A.;* (1981), tarafından geleneksel güç sistemi dengeleyicisi tasarımı ve teorisine ilişkin yapmış oldukları çalışmalardır. İlk çalışmalarında Larsen ve Swann GSD girişlerine uygulanan parametreler, hız, frekans ve güç olarak ifade etmektedirler. Ayrıca basitleştirilmiş tek makine sonsuz güçlü bara sistemini kullanarak analizler yapmışlardır. GSD giriş sinyallerinin frekans cevap karakteristiklerini incelemişlerdir [6].

*Larsen, E. V. and Swann D.A.;* (1981), tarafından ikinci çalışmalarında ise dinamik ve sürekli hal sınır değerlerinin belirlenmesi ve salınım çeşitlerine göre GSD'nin tepkisi incelenmiştir. Ayrıca birinci çalışmada elde edilen durumlara göre GSD parametre ayarının geleneksel yöntem ile nasıl yapıldığı çalışmada yer almıştır [7].

*Larsen, E. V. and Swann D.A.;* (1981), tarafından üçüncü ve son yapılan çalışmada ise farklı sinyal girişlerinin uygulanması ve küçük bozucu giriş etkilerinin incelenmesi ile GSD

tasarımında önemli bir katkıda bulunmuşlardır [8]. Larsen ve Swann'ın bu makale GSD tasarımı için en önemli yapı taşı olmuştur. Halen bu makale önemini taşımakla birlikte diğer ardından gelen makalelere yol gösterici olmuştur.

*İbrahim EKE, M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU ve İlhan KOCAARSLAN;* (2011), tek makineli sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratörde oluşan salınımları sönümlemede güç sistemi dengeleyicisi parametrelerinin ayarlanması ile ilgili çalışmışlar. Onlar yaptığı çalışmada güç sistemi dengeleyicisi parametrelerin yeni bir yöntemle ayarlanmışlar. Dayanıklı güç sistemi dengeleyicisi tasarımı çok değişkenli optimizasyon problemi gibi formülize edilip yapay arı koloni (ABC) algoritması ile çözümü sağlanmıştır. Önerilen ABC tabanlı güç sistemi dengeleyicisinin sağlamlığını göstermek için, tek makineli güç sisteminde küçük bozucu etkilerde katılarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır [9].

*Haluk Gözde;* (2010), tarafından yapılan çalışmada Yapay Arı Kolonisi optimizasyon algoritması enterkonnekte güç sisteminin yük-frekans kontrolüne ilk kez uygulanmış; algoritmanın yük-frekans kontrol performansına ve sistem dayanıklılığına etkisi literatür ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir [10].

*Yang, T.C.;* (1997), tarafından yapılan çalışmada ise  $H_{\infty}$  optimizasyon metodu güç sistem dengeleyicisi tasarımı için uygulanmıştır. Ağırlık fonksiyonu seçimi ve çok makine güç sistemi iki bölümde incelenmiştir. İlk bölümde tek makine sonsuz güçlü bara için GSD tasarımının  $H_{\infty}$  optimizasyon probleminde uygulanabilirliği anlatılmıştır. Ayrıca yeni bir yöntem ile  $H_{\infty}$  optimizasyon ağırlık fonksiyonlarının seçimi incelenmiş olup geleneksel güç sistem dengeleyicisi tasarımı detaylıca anlatılmıştır [11].

*O. Abedinia, N. Amjady, H.R. Izadfar, H.A. Shayanfar;* (2012), tarafından çok objektifli bal arısı çiftleşme optimizasyonu (Multi-objective Honey Bee Mating optimization, MOHBMO) tekniği ile çok makineli güç sistemi salınımı sönümleme için güç sistemi dengeleyicisi parametrelerinin ayarlanması uygulanmıştır. [12].

*Chi-Jui, W. And Yuan-Yih, H.;* (1988), tarafından yapılan çalışmada kendinden ayarlamalı PID (proportional - integral - derivative) tabanlı GSD ile çok makineli güç sisteminin geniş çalışma bölgesinde sürekli hal kararlılığını sağlamak amaçlı çalışmaları farklı sistem parametre değişikliklerine karşı iyi sönümleme karakteristiği göstermiştir. Wu Chi- Jui ve

Hsu Yuan - Yih bu çalışmaları ile çok makineli güç sistemlerinde GSD ve geleneksel olmayan GSD tasarımı ile ilgili farklı bir bakış açısı getirmişlerdir [13].

*Hsu, Y.Y. and Su, C. C.;* (1988), tarafından yapılan çalışmada pompaj depolamalı santraller için GSD çalışmalarını özdeğer - özvektör analizi ile geçici durum kararlılık analizini yapılmıştır. Uygun parametre değerlerinin bulunması ve hangi güç salınım durumlarında GSD'nin iyi sönümlenme sağlayacağına dair etkin bir çalışma olmuştur [14].

*Trudnowski, D. J., Smith, J. R.;* (1991), tarafından büyük bir sisteme bağlanan düşük dereceli jeneratör modelinde GSD transfer fonksiyonunu elde etmede yeni bir metot geliştirmişlerdir. Bu metot Prony sinyal analiz olarak bilinir ve hem yerel hem de bölgelerarası elektromekanik salınımların analizini içerir. Benzetim çalışmaları 27 baralı ve 16 jeneratörlü test sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu yeni tasarım ile bölgelerarası salınımlarının GSD ile sönümlenmesine dair yeni bir görüş sunulmuştur [15].

*D.K. Sambariya, R. Prasad;* (2014), yılında yaptığı çalışmasında geleneksel bir güç sistemi dengeleyicisi (GSD) tasarımı yapılmıştır ve GSD'nin kazancını ve kutup-sıfır parametrelerini optimize etmek için yarsa algoritması (Bat Algorithm, BA) kullanılmıştır. Özdeğerleri geçişe göre objektif fonksiyonu GSD'nin parametrelerinin önerilen optimizasyonu için dikkate alınmıştır [16].

*Chao - Rong Chen ve Yuan - Yin Hsu;* (1991), tarafından yapılan çalışmada senkron jeneratörün sürekli hal kararlık analizi için yeni bir yapay sinir ağ (YSA) yapısı tasarlamışlardır. Sürekli hal kararlık analizinde önemli parametrelerden sayılan jeneratör çıkışları ve güç sistemi dengeleyicisi parametreleri YSA yapısına giriş olarak verilmiştir. YSA'nın eğitimi öncelikli olarak çevrim dışı (offline) çalışma ile yapılarak büyük bir güç sisteminde performansı denenmiştir. YSA ile yapılan bir çalışma olması itibari ile tam kararlılık göstermesi ve geleneksel sistemden ayrı olarak tasarlanan ilk çalışmalardan olması bu makaleyi önemli kılmaktadır [17].

*Zhou, E. Z., Malik, O. P. and Hope, G. S.;* (1991), yılında yapılan çalışmada çok makineli güç sistemlerinde, GSD'nin yerini belirlemede yeni bir öneri sunmuşlardır. Bu çalışmada sağ özvektör durum değişkenlerini, sol özvektör ise kontrol sinyali karakteristiklerini içerir. Bu yeni metot ile 13 makineli sistemde en iyi GSD yeri tespiti yapılabilmektedir. Zaman

domeni benzetim çalışmaları sonuçları da bu metodun uygun ve doğru olduğunu göstermiştir [18].

*B.Taşar, M.Özdemir;* (2011), yapılan çalışmada sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratörün uyarım kontrolü için güç sistem kararlayıcısı tasarımı yapılmıştır. Bulanık mantık denetim elemanının etkilerini görmek amacıyla jeneratör çalışma durumunda işletilen senkron makinenin değişik işletme şartları altında simülasyonu yapılarak, Bulanık mantık tabanlı güç sistem dengeleyicisinin (BGSD'nin), geleneksel güç sistem dengeleyicisinin (GSD'nin) ve klasik PID kontrolörün ayrı ayrı sisteme destekleyici kontrol işareti olarak uygulanmaları durumundaki sistem performansları incelenmiştir [19].

*Al-Duwaish H. N. and Al-Hamouz, Z. M.;* (2011), yılında adaptif kayan kipli kontrolör tabanlı yapay sinir ağlarını halen güncel çalışma konusu olan güç sistem dengeleyicisine uygulamışlardır. Halen güncelliğini yitirmeyen güç sistemi dengeleyicisi bu çalışmada çok bölgesel çalışma için uygulanmış ve yeterli sönümlenme sağlamıştır. Basit bir yapıya sahip geleneksel güç sistemi dengeleyicisinde sabit parametreler bulunmaktadır [20].

### Tanımlar

Bu araştırmada sıkça kullanılan bazı kısaltılmış ifadeler ve tekrarlanacak terimler, detaylı olarak anlatılmaktadır.

PID; (Oransal-Integral-Türev Kontrolör), PID kontrolör oransal, türevsel ve integral yöntemlerin birleşmesiyle oluşur. Günümüzde faaliyette olan kontrolörlerin % 90'ından fazlası PID kontrolörleridir. Daha ileri kontrol stratejilerinin gelişimine rağmen, endüstriyel kontrol sistemlerinin çoğunluğu halen PID kontrolörleri kullanmaktadır.

GSD; (Güç Sistem Dengeleyicisi) hem otomatik gerilim regülatörü (OGR) sistemine hem de türbin-yöneten sistemine ek kontrol döngüleri sağlayan bir cihazdır.

FA; (Firefly Algorithm, FA) ilk olarak 2007 ve 2008 yılında Xin-She Yang tarafından yanıp sönme modellerine (flashing patterns) ve ateş böceklerinin davranışına dayalı bir optimizasyon algoritması şeklinde Cambridge Üniversitesinde geliştirilmiştir.

ABC; (Artificial Bee Colony) algoritması 2005 yılında Karaboğa tarafından, bal arısı kolonilerinin besin bulma davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş sürü zekasına dayalı bir optimizasyon algoritmasıdır.

PSAT; (Power System Analysis Toolbox) elektrik güç sistemleri analizi ve benzetimini yapan ve birçok işletim sisteminde çalışan bir matlab uygulamasıdır. Tüm işlemler grafik arabirimi (GUI) ile görsel bir şekilde uygulanabilirken ayrıca simulink tabanlı kütüphane uygulamaları da sistem tasarımı için kolay kullanım imkanı sağlamaktadır.

## 2. GÜÇ SİSTEMİ

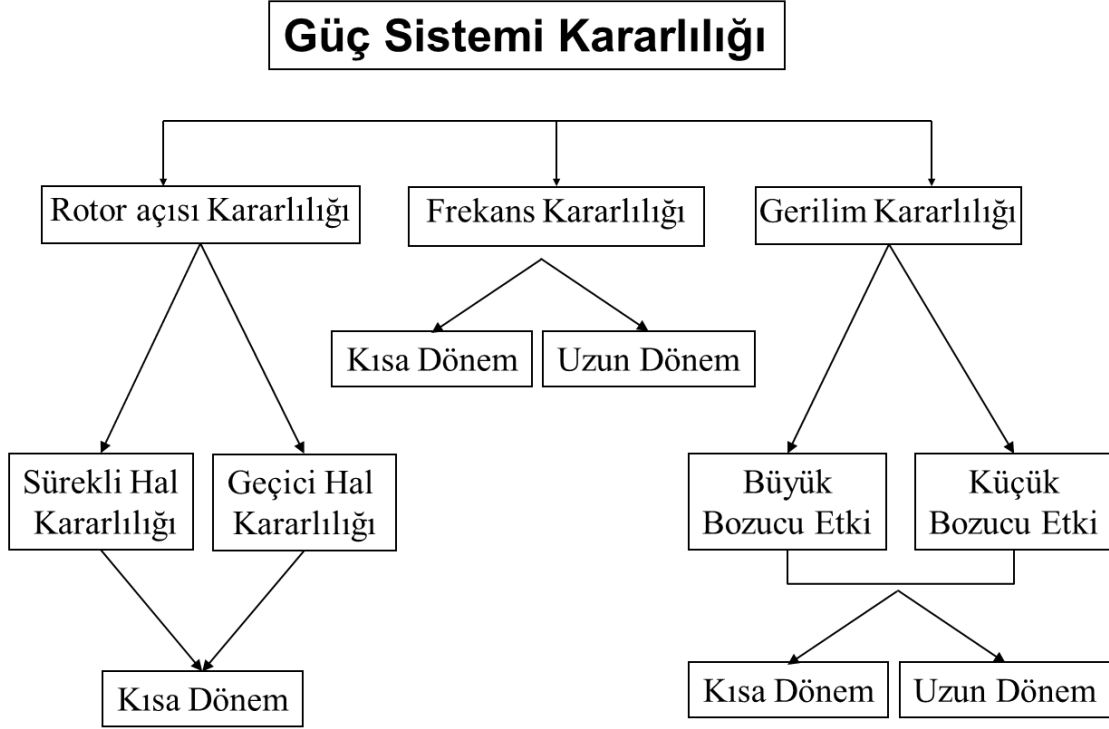
Elektrik güç sistemleri, elektrik enerjisinin üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi işlevlerini gerçekleştiren jeneratörler, iletim ve dağıtım hatları, transformatörler, yükler, reaktif güç kompanzasyon ekipmanları gibi birçok sayıda eleman içeren büyük ve karmaşık fiziksel sistemlerdir. Genel olarak tüketim merkezlerinin uzağında üretilen elektrik enerjisi, sanayi bölgeleri ve nüfus yoğunluğunun fazla olduğu bölgelere uzun yüksek gerilim hatları vasıtasıyla taşınır. Nüfusun yoğun olduğu yerlerde yoğunlaşan dağıtım sistemleri ise üretilen gerilim seviyesini tüketicilerin kullandığı seviyeye indirmek için kullanılır. Güç iletiminin güvenilirliğini ve kararlılığını artırmak için güç sistemleri genellikle birbirleri ile daha büyük sistemler kuracak şekilde birleştirilirler. Genellikle büyük coğrafi alanları kapsayan enterkonnekte güç sistemleri, farklı (hidroelektrik, rüzgar, termik, nükleer vb.) kaynaklardan güç üreten çok çeşitli güç üretim santrallerini, çeşitli uzunluklarda çok sayıda iletim hatlarını, binlerce transformatörü içerdikleri gibi milyonlarca enerji tüketicisine kararlı bir şekilde elektrik enerjisi sağlar [21-23].

### 2.1. Güç Sistemlerinde Kararlılığın Tanımı

Güç sistemi kararlılığı, güç sisteminin normal çalışma koşullarında dengeli çalışma durumunda kalması ve bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra kabul edilebilir bir denge durumuna tekrar geri dönmesi, olarak tanımlanabilir [22]. Başka bir deyişle kararlılık, bir sistemde paralel çalışan senkron jeneratörlerin tahrik momentleri ile elektriksel momentleri arasındaki kararlı denge durumu demektir. Güç sistemleri çeşitli şekillerde, büyük, küçük bozulmalara maruz kalabilirler. Bu durumda, tüm enterkonnekte sistem göz önüne alınır. Sistemde yüklerin devreye girip çıkmaları gibi yük değişimleri de sürekli olmaktadır. Bu durumlarda, sistem sürekli işletilmeli ve değişen durumlara uyum sağlayabilmelidir. Bunun yanı sıra, iletim hattında kısa devreler, büyük jeneratörlerin devre dışı kalması gibi durumlarda arıza yeri devre dışı bırakılarak, sistemde yapısal değişimler olabilmektedir.

Güç sistemi kararsızlığı, farklı şekillerde olabildiği gibi farklı faktörlerden de etkilenmektedir. Kararlılık analizi probleminde, kararsızlığa neden olan ana faktörlerin tanımlanması ve kararlı çalışmayı sağlaması için kararlılığı çeşitli sınıflara bölünerek incelenmesi son derece faydalıdır. Bu durumda güç sistemi kararlılığı; kararsızlık durumunu

oluşturan fiziksel etkinin türüne, sistemde oluşturduğu etkinin büyüklüğüne, etkilediği elemanların türüne ve etkinlik süresine göre Şekil 2.1'de yer aldığı gibi sınıflandırılmaktadırlar [22-25].



Şekil 2.1. Güç sistem kararlılığı sınıflandırılması

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

Güç sistemi ancak sisteme ilişkin mekaniksel giriş ve elektriksel çıkış güç değerleri arasında sürekli bir denge sağlanması şartıyla kararlı olarak çalışabilir. Güç sistemi, elektrik enerjisi üretimi bakımından senkron jeneratörlere bağlıdır. Sisteme ilişkin mekaniksel giriş, tahrik makineleriyle senkron jeneratörlere verilen mekanik güçtür. Elektriksel çıkış ise güç sistemindeki elektriksel yüklerdir. Elektriksel yüklerde oluşabilecek bir değişim, sisteme verilen mekaniksel güçteki karşı değişimlerle dengelenmelidir [22, 25].

Eğer güç sistemi, bir bozunum sonrası kararlı kalıyorsa, sistem yeni bir denge durumuna erişecektir. Sistemin bütününe çalışmasını ve sürekliliğinin korunması amacıyla arızalı elemanlar devre dışı bırakılarak bazı jeneratör ve yüklerin birbirleriyle bağlantılar kesilir. Enterkonnekte sistemler, bazı belli ciddi bozunumlardan dolayı kasıtlı olarak mümkün olduğunca çok üretim ve yükün korunması amacıyla iki veya daha fazla parçaya ayrılır. Bununla beraber, otomatik denetimler ve insanların müdahalesi sonucu sistem yeniden normal koşullarına dönecektir. Öte yandan, eğer sistem kararsız ise bu müdahaleler sistemi daha da kötüye götürebilir [22, 23, 25].

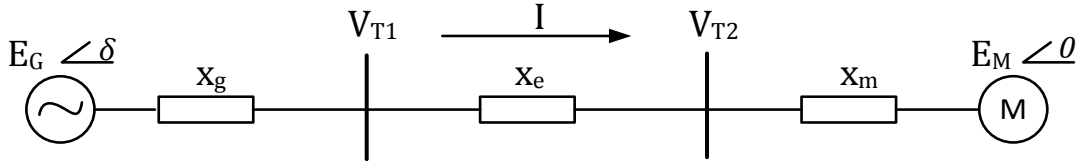
Kararlılık probleminin anlaşılmasında, kararlılığın çeşitli kategorilerle sınıflandırması büyük ölçüde yarar sağlar. Ayrıca basitleştirilmiş veya doğrusallaştırılmış modeller yani basit bir güç sistemi yapısı kullanılması da güç sistemi kararsızlıklarını daha anlaşılabilir hale getirir. Şekil 2.1’de bahsedilen kararlılık durumları incelenmiştir.

## **2.2. Rotor Açısı Kararlılığı**

Rotor açısı kararlılığı enterkonnekte sistemlerde senkron makinelerin, herhangi bir bozucu etki sonrasında senkronizasyonda kalma yetenekleri ile ilgilidir. Bu kararlılık temel olarak güç sistemindeki elektromekanik salınımları içermektedir [26]. Problemin ana ilkesi, senkron jeneratörlere ait çıkış güçlerinin rotor açısı salınımlarına bağlı olarak değişmesidir.

Senkron makinaların, uyarma ve endüvi sargıları olmak üzere iki temel elemanı vardır. Endüvi sargısı statorda, uyarma sargısı ise rotorda bulunur. Uyarma sargısı doğru akım ile beslenir. Rotor bir türbin ile döndürüldüğü zaman uyarma sargısının dönen manyetik alanı statorda bulunan üç fazlı endüvi sargısında alternatif gerilim endükler. Stator uçlarına yük bağlandığında akan akımın ve stator uçlarındaki gerilimin frekansı rotorun hızına bağlıdır. İki veya daha çok senkron jeneratör beraber çalıştığında tüm jeneratörlerin stator gerilimleri ve akımları aynı frekansa sahip olmalıdır ve her jeneratörün rotorunun hızı bu frekansla senkronizedir. Bu sebeple, sisteme bağlı tüm senkron jeneratörlerin rotor hızları senkronizme olmalıdır [22, 27].

Güç sistemi kararlılığına ilişkin önemli bir özellik de değişen güç ve rotorun açısal konumu arasındaki bağıntıdır. Bu bağıntıyı açıklamak için şek. 2.2’deki gibi senkron jeneratör, iletim hattı ve senkron motordan oluşan basit bir sistemi ele alalım.



Şekil 2.2. İki senkron makina ve iletim hattından oluşan sistem

Şekil 2.2'deki  $x_g$  ve  $x_m$  senkron makinalara ilişkin senkron reaktanslar ve  $x_e$ 'de direnci ve kapasitesi ihmal edilen iletim hattının reaktansıdır. Senkron jeneratör ve motor arasındaki güç aktarımı iki makinanın rotorları arasındaki açısal fark  $\delta$ 'ya bağlıdır. (2.1) ile de  $\delta$  ile jeneratörden motora aktarılan güç arasındaki eşitlik verilmiştir.

$$P_E = \sin \delta \frac{E_G E_M}{(x_g + x_e + x_m)} \quad (2.1)$$

(2.1)'den de görüleceği gibi elektriksel güç ile rotor açısı arasındaki bağıntı sinüzoidal şekildedir.  $\delta$  açısı 0 iken iki makine arasında bir iletim söz konusu olmaz. Açının artırılması güç iletimini artırır ve  $\delta$  açısı 90 derecede iken güç iletimi en büyük değerine ulaşır. Açının daha da artması güç iletimini azaltacaktır.

Enterkonekte sistemde, sürekli hal durumlarında jeneratörlerin mekanik giriş momenti ile elektromanyetik çıkış momenti arasında bir denge vardır ve hız sabittir. Eğer sistemde bir jeneratör diğerinden sürekli olarak hızlı ise bu jeneratörün rotorunun açısal konumu yavaş makinanın rotorunun açısal konumundan daha ileridedir. Yukarıda anlatılan güç bağıntısından da görüleceği gibi, rotorunun açısal konumu ileride olan jeneratör diğer jeneratörün yükünün bir kısmını üzerine alacaktır. Bu durumda, yükü artan hızlı jeneratör yavaşlayacak ve jeneratörlerin rotorlarının açısal farkları azalacaktır. Sonuç olarak, sistem kararlılığı, rotorların açısal konumlarındaki sapmaların, açısal farkı azaltacak senkronizasyonunda bir bozulma olmuşsa rotor ya hızlanacak veya yavaşlayacaktır. Sistem kararlılığı, rotorların açısal konumlarındaki sapmaların, açısal farkı azaltacak senkronizasyon momentini oluşturup oluşturamadıklarına bağlıdır. Yukarıda verilen bağıntı yüksek dereceden doğrusal değildir. Büyük bir bozucu etki ile belli sınırların ötesinde bir açısal fark oluşursa, yeterli senkronizasyon momenti sağlanamaz ve açısal farktaki artış güç iletiminde bir azalmaya sebep olur, bu da açısal farkı daha da artırır ve jeneratörü senkronizmadan çıkarır [22, 27].

### 2.2.1. Küçük işaret kararlılığı

Küçük işaret veya sürekli hal kararlılığı küçük bozulmalar altında güç sisteminin senkronizmayı koruyabilme yeteneğidir. Yük ve üretimdeki ufak değişimlerden dolayı bu tür bozulmalar sürekli oluşabilir. Sistemin küçük bozucular sonrasındaki davranışı, çalışma noktası, iletim hattı ve jeneratör uyarma tipi gibi bir çok faktöre bağlıdır. Küçük bozucular iki türlü sürekli hal kararsızlığına neden olabilirler. Bunlar senkronlayıcı momentin yetersiz olması sonucunda rotor açısının sürekli olarak artması ve sönümleyici momentin yetersiz olması sonucunda artan genlikli rotor salınımlarının oluşmasıdır [1, 22, 23].

Senkronizasyon momenti otomatik gerilim regülatörleri sayesinde yeterli seviyeye yükseltildiğinden, küçük işaret kararlılığında karşılaşılan genel sorun rotor açısı salınımlarının yetersiz sönümüdür. Aşağıda belirtilen salınımlar kararlılıklarla ilgili:

- Yerel modlar olan bu salınımlar güç sisteminin kalan kısmına nazaran üretimin bir birimindeki salınımlarla ilgilidir. Yerel terimi, salınımlar güç sisteminin küçük bir parçasını veya bir üretim tesisini sınırladığı için kullanılmıştır.
- Bölgeler arası modlar, sistemin diğer kısımlarındaki makinelere karşı sistemin bir kısmındaki birçok makinenin salınımlarıyla ilgilidir. Bu zayıf enterkonnekte bağlanan yakın kuplajlı makine grupları ya da iki grup tarafından oluşturulur.
- Kontrol modları, üretim birimleri ile ve diğer kontrollerle ilgilidir. Zayıf olarak ayarlı uyarımlar, hız regülâtörleri, yüksek gerilimli doğru akım (HVDC) dönüştürücüleri ve statik var kompanzâtörleri çoğunlukla bu modların kararsızlığına neden olurlar.
- Torsiyonel modlar sistemin dönen türbin-jeneratör mili ile ilgilidir. Torsiyonel modların kararsızlığı, uyarma kontrolleri, hız regülâtörleri, YGDA kontrolörler ve seri kompanzasyonlu hatlar tarafından oluşturulabilir [1, 21, 22].

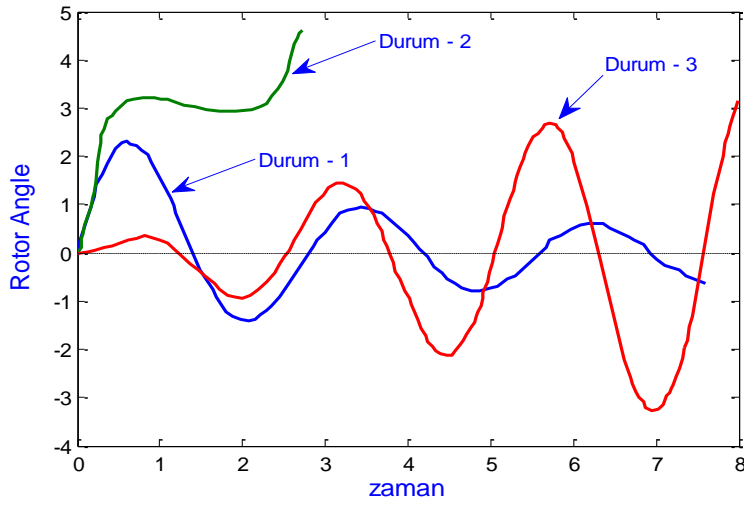
Güç sistemlerinde küçük bozucu etki sebebiyle, sisteme ait tüm durum değişkenlerinde oluşan farklar çok küçükse, sistemin bozucu etki sonrasındaki çalışma noktası başlangıç çalışma noktası yakınlarındadır. Bu durumda, doğrusal olmayan bu sistem davranışı doğrusal bir matematiksel model gibi incelenebilir. Doğrusallaştırılan sistem eşitlikleri yardımıyla A sistem matrisi elde edilir. Sistem matrisinden elde edilen özdeğerlerin imajiner eksenindeki konumları ile sistemin sürekli hal kararlılığı analiz edilir [27, 28].

### 2.2.2. Geçici hal kararlılığı

Geçici hal kararlılığı, güç sisteminin büyük bir bozucu (kısa devreler, üretim birimlerinin veya büyük güçlü tüketicilerin devre dışı kalması gibi etkiler) etkiye maruz kaldıktan sonra senkronizmayı koruma yeteneğidir. Sistemin kararlılığı, bozucu etki öncesindeki çalışma noktasına ve bozucunun şiddetine bağlıdır. Genellikle faz-toprak, iki faz-toprak ve üç faz toprak kısa devreleri ele alınır. Geçici hal kararlılığı analizinde, bozucu etkiden sonraki birkaç saniyelik süre incelenir. Bu zaman aralığında, tahrik sistemlerinin senkron jeneratöre giriş olarak verdiği mekanik gücün sabit olduğu yani zaman sabiti yüksek mekanik regülatörlerin devreye girmediği kabul edilir [27, 29]. Genellikle bozucu etki öncesindeki ve sonrasındaki sürekli hal çalışma noktası farklıdır. Geçici kararlılık analizlerinde sistemin doğrusal olmayan modeli kullanılır. Geçici hal kararlılığını etkileyen faktörler sırasıyla jeneratör ataleti, jeneratör yüklenmesi: arıza süresince jeneratör çıkışı (güç transferi), arıza temizleme zamanı, arıza sonrası iletim sistemi reaktansı, jeneratör reaktansı, jeneratör iç gerilim genliği ve sonsuz bara gerilimi genliğidir [22-24].

Enerji sistemi büyük bir bozucu etkiye maruz kaldığında, sistemdeki senkron jeneratörlerin rotor açılarının ilk salınımları oldukça önemlidir. Sistemin senkronizmada kalma yeteneği ya da kararlı olarak çalışması, ilk salınımdan sonra salınımların genliklerinin giderek azalması ile mümkündür. Bozucunun türünü, yerini ve süresini içeren darbenin etkisi, geçici olay sırasında enerji iletim sisteminin güçlü senkronizasyon yeteneği, türbin-jeneratör ve iletim sistemi parametreleri, rotor açısının ilk salınımına ilişkin geçici olayları en çok etkileyen etmenlerdir [27, 29]. Sekil 2.3’de farklı rotor açısı davranışları ele alınmıştır.

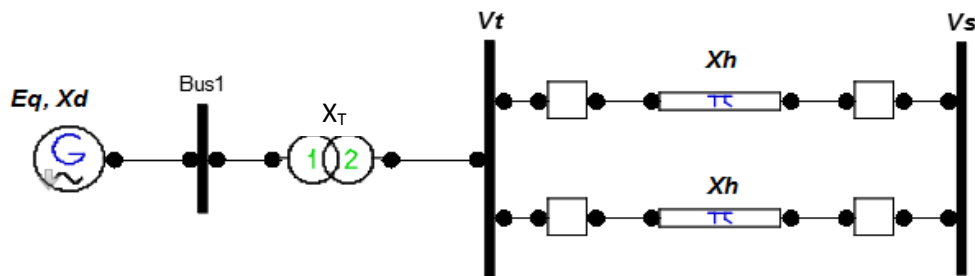
Sekil 2.3’deki birinci duruma göre rotor açısı salınımlarının genlikleri zamana bağlı olarak azalmaktadır bu sebeple birinci durum kararlı durumdur. İkinci durumda, senkronizma kaybindan dolayı rotor açısı sürekli artmaktadır. Bu duruma, ilk salınım kararsızlığı denir. İlk salınım kararsızlığı, yetersiz senkronizasyon momenti nedeniyle meydana gelir. Üçüncü durumda ise, sistem ilk salınımına göre kararlı olmasına rağmen zaman ile salınım genlikleri büyümektedir. Genellikle, en çok karşılaşılan kararsızlık üçüncü durumdaki kararsızlıktır [27].



Şekil 2.3. Farklı rotor açısı davranışları [1, 5]

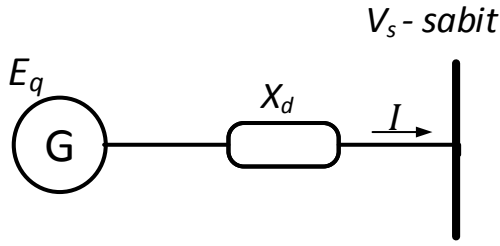
### Tek makine sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratörün güç karakteristiği

Tek makine-sonsuz bara sistemi güç sistemi incelemelerinde çok önemlidir. Burada eşdeğer devresi gösterilen sistemin Şekil 2.4’de küçük işaret kararlılığı incelenecektir. Tek makine sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratörün güç karakteristiği elde edilirken bazı kabuller yapılır. Bir senkron jeneratörün bir enerji iletim hattı veya şebeke üzerinden sonsuz güçlü şebekeyi beslediğini ve jeneratörün beslemiş olduğu şebeke gücünün, jeneratör gücünden çok daha büyük ve gerilimin de sabit olduğu kabul edilir. Senkron jeneratörün bu sonsuz güçlü şebekeye bağlandığı baranın gerilimi ve faz açısının sabit olduğu kabul edilerek bu baraya da sonsuz güçlü bara denir [23-25, 30]. Burada temel konu sonsuz şebekeyi besleyen senkron jeneratör ve iletim hattındaki olaylardan bu gerilimin etkilenmediği varsayılır.



Şekil 2.4. Güç sistem yapısı

Böyle bir güç sistem yapısının basitleştirilmiş modeli Şekil 2.5’deki gibidir.



Şekil 2.5. Basitleştirilmiş güç sistem yapısı

Şekil 2.5 ile gösterilen basitleştirilmiş modelde  $X_{ds}$  eşitliği Eş. 2.1’de verilmiştir.

Burada,

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

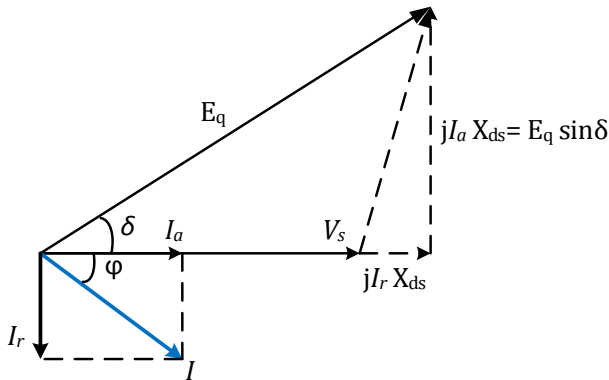
$X_T$ : Transformatörün endüktif reaktansını,

$X_e$ : Jeneratörden hatta kadar olan devrenin endüktif reaktansını,

$X_h$ : Hat endüktif reaktansını,

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

Şekil 2.5’deki basitleştirilmiş modelin vektör diyagramı Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Vektör diyagramı

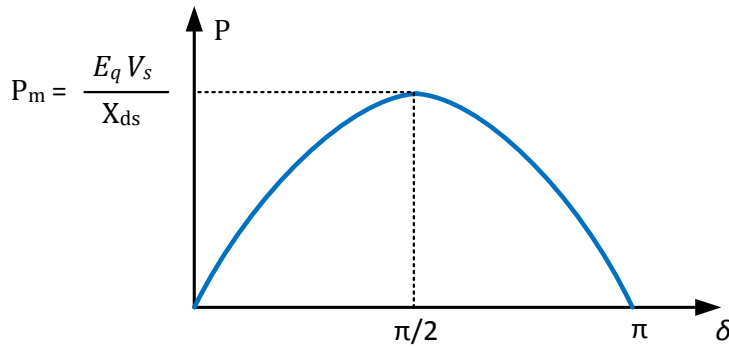
Şekil 2.6’de görüldüğü gibi aktif gücün eşitliği:

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

şeklindedir. Bu eşitliğin her iki tarafı  $X_{ds} / X_{ds}$  ile çarpılarak  $I_a X_{ds} = E_q \sin \delta$  eşitliğinden  $I_a = \frac{E_q \sin \delta}{X_{ds}}$  elde edilip Eş. 2.3'de  $I_a$  karşılığı olarak yerine konulur ise,

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

elde edilir. Eş. 2.4'deki bu ifadeye senkron jeneratörün güç karakteristiği adı verilir. Eş. 2.4'de görüldüğü gibi senkron jeneratörün güç karakteristiği  $E'_q$ ,  $V_s$ ,  $X_{ds}$  ve  $\delta$  değişkenlerine bağlıdır. Burada  $V_s$  ve  $X_{ds}$  sabit kabul edilirse değişim sadece  $E'_q$  ve  $\delta$  ile olur [2, 16-19]. Otomatik gerilim regülatörü (OGR) olmayan senkron jeneratörlerde çalışma noktasının yavaş değişiminden dolayı,  $E'_q$  sabit kabul edilir ise senkron jeneratörün güç karakteristiği ancak  $\delta$  ile değişim gösterir ve bu değişim Şekil 2.7 ile gösterilmektedir. Burada  $P_m$ , basit sistemin güç iletim sınır değeridir.



Şekil 2.7. Güç iletim karakteristiği.

### Senkron jeneratör salınım denklemi

Sürekli hal çalışma durumunda rotor eksenini ile bileşke manyetik alan arasındaki bağıl açı (konum) sabittir. Bu açı, güç açısı veya yük açısı olarak bilinmektedir. Herhangi bir bozulma durumunda, rotor senkronizmada olan hava aralığı manyetik motor kuvvetine nazaran hızlanarak ya da yavaşlayarak bağıl bir hareket başlamaktadır. Bu bağıl hareketi tanımlayan eşitlik salınım (swing) eşitliği olarak bilinir. Senkron jeneratörün kararlılığını devam ettirebilmesi bu salınım süreci sonunda rotor hızının yeniden senkron hızda kalmasına bağlıdır. Bozulma herhangi bir güç değişimi içermiyor ise yani geçici bir durum ise, rotor başlangıç konumuna döner. Eğer bozucu etki, üretim, yük veya şebeke şartlarında bir

değişiklik meydana getirir ise rotor senkron hızda dönmekte olan alanın konumuna göre yeni bir güç açısına oturur [22-25, 31, 32].

$T_e$  elektriksel momentini üreten ve  $\omega_s$  hızı ile dönmekte olan bir senkron jeneratörün salınım eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilir. Kararlı durumda kayıplar ihmal edilir ise Eş. 2.5'de olduğu gibi mekanik moment elektriksel momente eşit olacaktır.

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

Fakat bir bozucu giriş, Eş. 2.6'de olduğu gibi jeneratörü kararlı durumdan çıkaracak bir  $T_a$  momenti ile rotorun hızlanmasına ( $T_m > T_e$ ) veya yavaşlamasına ( $T_m < T_e$ ) yol açar.

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

Sürtünme ve sönümlenme momenti ihmal edilerek, jeneratör ve türbinin bileşke atalet momenti  $J$  olmak üzere, dönen kütle için Newton'un ikinci kuralına göre Eş. 2.7 yazılır.

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

Burada,  $\theta_m$  statorun duran referans eksenine göre rotorun açısal konumudur. Senkron hızı referans alarak rotor hızı dikkate alınır, açısal referans,  $\omega_{sm}$  mekanik senkron açısal hızı ile hareket eden bir referans çatıya göre seçilir. Bu durumda  $\theta_m$  Eş. 2.8'deki gibi yazılabilir.

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

Burada  $\delta_m$ ,  $t = 0$  anında bozucu öncesi senkron hızdaki referans çatıdan ölçülen rotor pozisyonudur. Eş. 2.8'nin türevi Eş. 2.9'de gösterildiği gibi rotor açısal hızını ve ikinci türevi de Eş. 2.10'da gösterildiği gibi ise rotor ivmesini verir.

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

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

Eş. 2.10 eşitliği Eş. 2.7'da yerine konularak  $\omega_m$  ile çarpılır ise Eş. 2.11 elde edilir.

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

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

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

Eylemsizlik sabiti olarak adlandırılan  $J\omega_m$  büyüklüğü, M karakteri ile ifade edilir. Dönen bir kütle için kinetik enerjisi  $W_k$ 'nin bağıntısı Eş. 2.13'de verilmektedir.

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

Eş. 2.13'de M eylemsizlik sabiti tek başına bırakılırsa Eş. 2.14 elde edilir.

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

Bu eşitlikte M eylemsizlik sabiti olarak tanımlanmasına karşın rotor hızı senkron hızdan ayrıldığında M gerçekten sabit değildir. Ancak kararlılık kaybolmadığı sürece,  $\omega_m$  çok büyük bir değişim göstermediği için Eş. 2.15'deki gibi M'nin senkron hızda olduğu yani sabit olduğu kabul edilir.

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.15)$$

Eylemsizlik sabiti cinsinden salınım eşitliği aşağıda yazılmıştır.

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

Salınım eşitliğinin elektriksel güç açısı  $\delta$  cinsinden yazılması daha yaygındır. Eğer senkron jeneratörün kutup sayısı p ise elektriksel güç açısı  $\delta$  mekanik güç açısı  $\delta_m$  ile ilişkilendirilerek

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

ya da,

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

şeklinde elektriksel hız ile mekanik hız arasındaki bağıntı yazılır. Eğer ihmal edilen sönümlenme momenti dikkate alınırsa elektriksel güç açısı ile salınım eşitliği Eş.2.19'daki gibi ifade edilir [1, 22, 31].

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

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

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

$D$ : elektriksel sönümlenme momenti katsayısı,

$D_m$ : mekanik sönümlenme momenti katsayısıdır.

Güç sistemi analizlerinin birim değerde (per unit) yapılmasından dolayı salınım eşitlikleri genelde birim değer olarak ifade edilir. Eş. 2.19  $S_B$  baz gücüne bölünerek  $M$  yerine Eş. 2.12'deki ifade kullanılır ise aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2 W_k}{\omega_{sm} S_B} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_T}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} - \frac{P_d}{S_B} \quad (2.20)$$

Eş. 2.20'deki  $W_k/S_B$  bağıntısı önemli bir büyüklük olan  $H$  sabiti olarak bilinir [2, 7, 20, 21].

$$H = \frac{\text{nominal hızda MJ kinetik enerji}}{\text{MVA makina gücü}} = \frac{W_k}{S_B} \quad (2.21)$$

$H$  sabitinin birimi saniyedir ve büyüklüğü ise jeneratörün tipine ve boyutuna bağlı olarak 1

sn ile 10 sn arasında değişmektedir. Eş. 2.20 birim değer cinsinden ve  $H$  parametresi ile bağıntısı aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2H}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{T(pu)} - P_{e(pu)} - P_{d(pu)} \quad (2.22)$$

burada  $P_{m(pu)}$ ,  $P_{e(pu)}$  ve  $P_{d(pu)}$  sırası ile birim değer cinsinden mekanik güç, elektriksel güç ve sönümleme gücüdür. Eş. 2.18'deki elektriksel açısal hız ile mekanik açısal hız ile bağıntısına uygun olarak ( $\omega_{sm} = (2/p) \omega_s$ ) salınım eşitliği,

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

olur. Burada  $P_{acc}$  net ivmeleme gücüdür. Eş. 2.23 aşağıdaki şekilde yazılıp,

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d\left(\frac{d\delta}{dt}\right)}{dt} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} - D\left(\frac{d\delta}{dt}\right) \quad (2.24)$$

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

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega = \omega - \omega_s \quad (2.25)$$

elektriksel radyan cinsinden rotor hız sapmasıdır. Bu eşitlikteki  $\Delta\omega$  terimini Eş. 2.24'de yerine yazarsak Eş. 2.26 elde edilir.

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_{T(pu)} - P_{e(pu)} - D\Delta\omega_{(pu)} \quad (2.26)$$

Eş. 2.26'de  $\omega_s$  baz hız olarak kabul edilir ise hız sapmasının birim değer olarak ifade edildiği salınım eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d\Delta\omega_{(pu)}}{dt} = \frac{1}{2H} (P_{T(pu)} - P_{e(pu)} - P_{D(pu)}) \quad (2.27)$$

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_s \Delta\omega_{(pu)}$$

Bu model basit bir yapıya sahip olduğu için doğrusallaştırma ve geçici hal kararlılığı analiz işlemleri için temel bir fikir vermek amacıyla kullanılmaktadır. Salınım eşitliği modeli olarak da isimlendirilen bu modelde, makinenin elektriksel gücü veya momenti (pu sistemlerde elektriksel güç ve elektriksel moment eşittir) değişik seviyeden modellerde belirlenir.

### 2.3. Gerilim Kararlılığı

Güç sisteminin normal çalışmasını veya bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra tüm bara gerilimlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde kalma yeteneği gerilim kararlılığı olarak tanımlanabilir. Büyük boyutta kurulmuş güç sistemleri gerilim dengesizliğine neden olabilecek mekanizmalardır ve bu mekanizmaların sistemin rotor açısı kararlılık özellikleriyle belirli bir alana bağlanmış olmalarıyla beraber dengesizlik olgusunun analizini gerçekleştirmek oldukça karmaşıktır. Gerilim kararsızlık mekanizmalarının çeşitli yönlerinin anlaşılmasını kolaylaştırmak için, genel ve kapsamlı olan “gerilim kararlılığı” kavramı, küçük ve büyük bozucu gerilim kararlılığı olarak iki alt kategoriye ayrılır. Bu iki kavram aşağıdaki gibi tanımlanırlar [33, 34]:

1. Bir güç sistemi küçük karışıklıklara maruz kaldığında, ana gerilimleri sabit değerlerle aynı veya kararlı değerlere yakın tutabiliyorsa, o güç sisteminin küçük karışıklık geriliminin kararlı olduğu söylenebilir;
2. Bir güç sistemi büyük karışıklıklara maruz kaldığında, ana gerilimleri kararlı değerlerle aynı veya kararlı değerlere yakın tutabiliyorsa, o güç sisteminin büyük karışıklık geriliminin kararlı olduğu söylenebilir.

Gerilim kararlılığı için gerek koşul, sisteme ait her baraya giren reaktif gücün artması durumunda bara geriliminin genliğinin artmasıdır. Bu durumda, gerilim-reaktif güç duyarlılığı pozitifdir. Sistemin en az bir barası için gerilim-reaktif güç duyarlılığı negatif ise gerilim kararsızlığı söz konusu olur. Gerilim kararsızlığına neden olan ana faktör, güç sisteminin reaktif güç talebini karşılayamamasıdır [22, 27].

## 2.4. Frekans Kararlılığı

Frekans kararlılığı, bir güç sisteminde üretilen ve talep edilen güç arasındaki gerekli dengesizliğe sebep olan hızlı ve büyük değişimler ardından kararlı frekansı devam ettirebilme kabiliyetidir. Frekans kararlılığı konusu, uzun dönem ve kısa dönem frekans kararlılığı olarak sınıflandırılır. Uzun dönem kararlılık, türbin gibi diğer faktörlerden etkilenir ve bozucudan sonraki birkaç dakikayı kapsar. Kısa dönem kararlılık, yük artımı, jeneratör kontrolleri ve koruma cihazlarından etkilenir ve bozucudan sonraki birkaç saniyeyi kapsar [35].



### 3. SENKRON MAKİNELER

Senkron makineler elektromıknatıslı veya küçük güçlerde sabit mıknatıslı bir rotor ile bir veya üç fazlı alternatif akım sargısı bulunan statordan oluşur. Senkron makineler, jeneratör ve motor olarak çalıştırılırlar. Bu makinalar sabit hızla dönerler. İlk defa kullanılan bir makina olarak 1885'te Nollet ve Van Malderen tarafından jeneratör olarak imal edilmiştir. Güçleri bugün 1500 MVA hatta son yıllarda 2000 MVA'ye kadar ulaşmıştır. Gerilimleri ise 6, 15, 20, 27 kV'dur. Daha çok jeneratör olarak yapılmaktadır. Senkron makine jeneratör olarak çalışırsa senkron jeneratörün rotoru, senkron devir sayısı ile tahrik edilmesi sonucunda endüvi (stator) çevresinde Eş. 3.1 ile ifade edilen senkron hız ( $n_s$ ) denilen sabit bir hız ile döner.

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (3.1)$$

Eş. 3.1'de  $f$ , stator akımlarının frekansını ve  $p$ , makinenin kutup sayısını ifade etmektedir. Senkron makinelerin motor olarak çalışma alanları, sabit dönme sayısı nedeniyle kısıtlıdır. Ancak elektrik enerjisi üretiminde, santrallerde kullanılırlar. Güçleri birkaç VA'dan 1700 MVA'ya kadar imal edilebilirler. Gerilimleri ise 6, 15, 20, 27 kV'dur. Çok büyük güçlerde imal edilmesinin nedeni güçleri arttıkça maliyetlerinin düşmesi, verimlerinin artmasıdır. Büyük güçlü bir makinenin bakımı ve kontrolü daha kolay olup bu sistem işletim güvencesini azaltır. Senkron jeneratörler yuvarlak kutuplu ve çıkık kutuplu olmak üzere, iki türden yapılırlar.

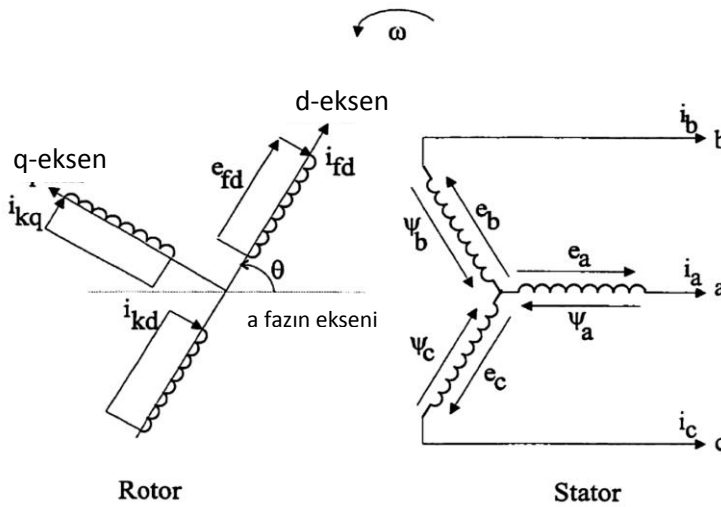
*Çıkık (Çıkıntılı) kutuplu senkron jeneratörler:* Rotor dış çevresi düzgün olmayan ve stator iç çevresi düzgün makinelerdir. Kutup sayıları büyük ve senkron hızları düşüktür. Senkron hızları küçük olduğu için rotor çapları çok büyük ve eksenel boyları küçüktür. Genellikle çıkıntılı kutuplu senkron jeneratörler, su türbinleri veya düşük devirli dizel makinelerinde döndürülür [1, 5, 30, 31].

*Yuvarlak kutuplu jeneratörler (turbojeneratörler):* Bu tür jeneratörler, dönen kısımları rotor ve sabit kısımları stator olmak üzere bunların taşıdıkları rotor ve stator sargılarından oluşur. Rotor ile stator arasında kalan hava aralığı sabittir. Kutup sayısı küçük, senkron dönme sayıları yüksektir. Güçleri çıkık kutuplu jeneratörlerden daha yüksektir. Yüksek hızlı

olduklarından rotor çapı küçük, boyları uzundur. Rotor çevresinin  $2/3$ 'üne oluklar açılarak bu oluklara rotor sargıları yerleştirilir. Büyük güçte, turbojeneratörlerin rotor sargıları, ısı ile boyutlarının değişmemesi için gümüşlü bakır alaşımından yapılır. Stator, stator gövdesi ve stator çekirdeğinden oluşur. Çekirdek, kayıpları az olan 0.5 mm kalınlığında özel silisyumlu saçlardan yapılır. Saçlara sargı için oluklar açılır. Saçlar bir araya getirilerek sıkıştırılır ve saç paketleri arasında soğutma kanalları bırakılır. Turbojeneratörler, gaz veya buhar türbinleri ile uyarılırlar. Bu nedenle termik santrallerde kullanılırlar. Yuvarlak kutuplu makineler, makine içinde basınçlı hava veya gaz dolaştırılarak soğutulur [1, 30, 32].

### 3.1. Senkron Makinenin Dinamik Modellenmesi

Senkron makinenin modellenmesinde genel olarak rotor uyarma sargısına ilave olarak  $dq$  eksenlerinde bir veya iki adet sönüm sargısı içeren, eşdeğer ideal senkron makine yapısı tercih edilir [1, 23, 36, 37].



Şekil 3.1. Senkron makine rotor ve stator devreleri

Şekil 3.1'de gösterilen senkron makinenin eşitliklerini geliştirmek için aşağıdaki kabuller yapılmaktadır [1, 23, 24, 31, 37, 38]:

- 1) Üç faz sargıları simetriktir.
- 2) Tüm sargı kapasiteleri ihmal edilebilir.
- 3) Dağıtılmış sargıların her biri yoğunlaştırılmış bir sargı ile temsil edilebilir.

- 4) Rotorun konumundan dolayı stator endüktansındaki değişim sinüzoidaldir ve yüksek harmonikler içermemektedir.
- 5) Histerisiz kayıpları ihmal edilmektedir ancak girdap akımı (nüve) kayıpları damper sargılarının modeline katılabilir.
- 6) Geçici hal ve geçici hal öncesi durumlarında rotor hızı senkron hıza yakındır.
- 7) Manyetik devreler doğrusaldır (doyma yoktur) ve endüktans değerleri akımdan bağımsızdır.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Rotor ve stator sargılarının akı bileşenlerinin eşitlikleri (Eş 3.9 ve Eş. 3.10) aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

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

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

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

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

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

eşitlikleri elde edilir. Bu eşitliklerden de açıkça görülmektedir ki  $L_{ss}$  ve  $L_{sr}$  endüktansları rotor açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Yani rotorun hız oranına bağlı olarak bu  $L_{ss}$  ve  $L_{sr}$  elemanlarının büyüklük değerleri değişmektedir. Her bir faza ait olan büyüklüklerin çözümü için Eş. 3.2 kullanıldığında zamana bağlı katsayıların hesaplanması oldukça güçtür. Akı bileşenlerinden faz akımlarını elde etmek için zamana bağlı olarak değişen endüktans matrislerinin tersini her bir zaman periyodu için hesaplamak gerekir. Her bir zaman periyodu için tersi alınan endüktans matrislerinin hesaplanması zaman kaybına neden olacağı gibi sayısal sürekli problemler oluşturabilir [1, 23, 28, 32, 38].

### 3.2. Senkron Makine Modelinin Basitleştirilmesi

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

#### 3.2.1. Park dönüşüm matrisi

Park tarafından senkron makine modeli 3 faz zamanla değişen stator niceliklerinden (gerilim, akım ve akı bağı) sürekli hal şartlarında zamanla değişmeye d-q eksen niceliklerine dönüştürülerek geliştirilmiştir. Park dönüşümü veya iki eksen dönüşümü olarak adlandırılan dq referans çatı dönüşümünün matematiksel eşitlikleri aşağıdaki gibi tanımlanır [1].

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

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

$$\begin{aligned} V_{0dq} &= PV_{abc} \\ \lambda_{0dq} &= P\lambda_{abc} \end{aligned} \quad (3.16)$$

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

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

Eş. 3.15'in tersinin aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir. Ayrıca bu dönüşüm matrisi abc referans çatı fazından rotor çatı  $d_{q0}$  eksene dönüşümü de ifade eder.

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

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

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

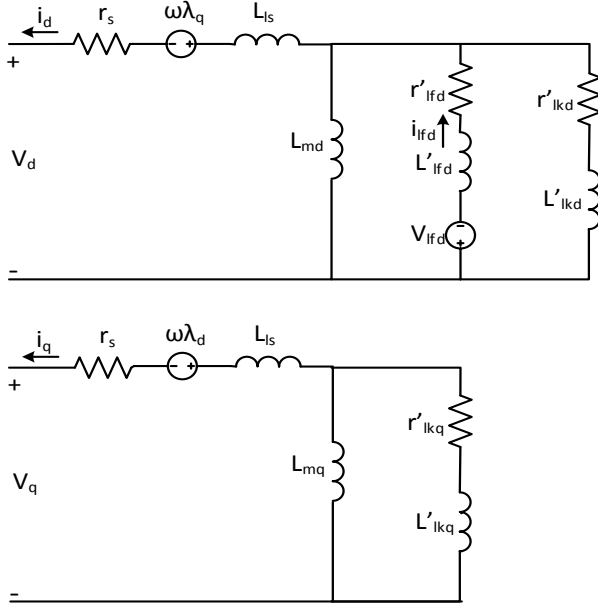
$d$  -  $q$  bileşenleri cinsinden ise,

$$P_{0dq} = P_{abc} = \frac{2}{3} (v_q i_q + v_d i_d + 2v_0 i_0) \quad (3.20)$$

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

### 3.2.2. Rotor referans çevre dönüşümü

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



Şekil 3.2. Senkron jeneratör d-q eksenli eşdeğer devreleri

Bu yüzden Eş. 3.15’de verilen Park dönüşümünün sadece stator sargılarına uygulanması yeterlidir. Stator gerilim, akım ve akı eşitlikleri için  $dq$  dönüşümü aşağıdaki gibi elde edilir [1, 22-24, 30-32,36].

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

eşitliği elde edilir. Trigonometrik ifadelerin düzenlenmesi ile

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

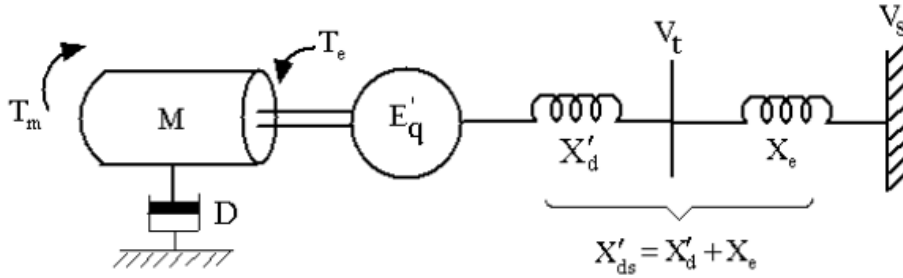
### 3.3. Tek Makine Sonsuz Güçlü Bara Sistemi

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

#### 3.3.1. Salınımların klasik model aracılığı ile incelenmesi

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

3.49 ve Eş. 3.50 ifadeleriyle verilmiştir.



Şekil 3.3.  $X_e$  reaktansı üzerinden sonsuz baraya bağlı senkron jeneratör

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

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

$\delta_0$ 'ın küçük değişimlerinde Eş. 3.49'un doğrusallaştırılmış hali Eş. 3.51 ile gösterilmiştir. Eş. 3.52'de gösterilen  $\Delta \delta$ 'nın sabiti "senkronlama moment katsayısı" olarak ifade edilir [1, 21, 23, 28].

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

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

2.26'deki eşitlik bu doğrultuda ele alınarak Eş. 3.53'deki gibi ifade edilebilir.

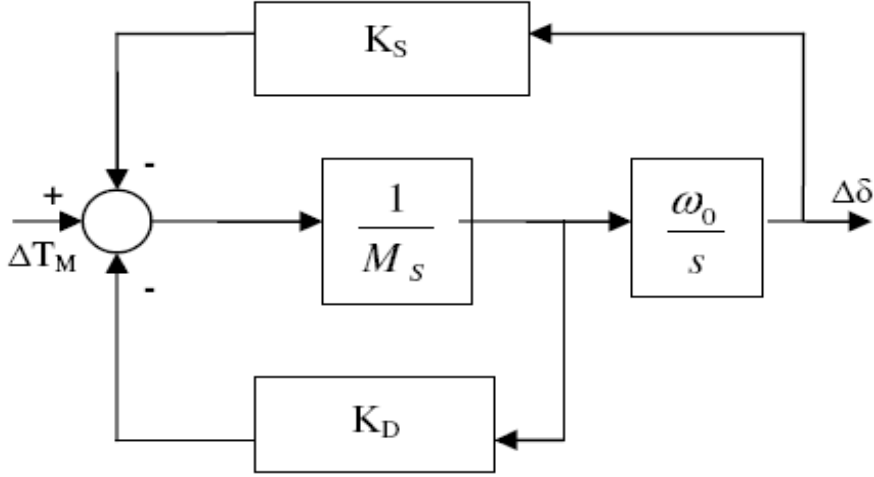
Bu eşitliklerde güç, hız ve momente ilişkin ifadeler birim değer cinsindedir.

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{H} (\Delta T_m - K_S \Delta \delta - K_D \Delta \omega) \\ \frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_s \Delta \omega \end{cases} \quad (3.53)$$

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

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

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



Şekil 3.4. Sönümlenme ve senkronizasyon momenti etkisi

Senkronlama momenti; enerji dönüşümü ile ilgili ters bir momenttir ve bu yüzden kayıpsızdır. Başka bir ifadeyle girişte  $\Delta T_m$ 'de bir değişim için cevapta ters momentin senkronlama bileşeninin oluşumu, jeneratörün ek olarak mekanik girişini elektrik enerjisine dönüştürebilir ve böylece senkronizmada kalabilir anlamındadır. Makine yeterli senkronlama momenti ile  $\Delta T_m$ 'deki bir artışı tersleyici yeteneğini kaybettiği gibi, aşırı mekanik giriş şaftı hızlandırmaya devam edeceğinden makine senkronizmayı kaybetmektedir. Bu yüzden, senkronlama momenti oluşturma yeteneği kararlılık için çok önemlidir [31].

Bu ters momentlerin ikinci çeşidi sönümlenme momenti olarak gösterilmektedir; enerji harcanımı (moment kaybı) ile ilgili ters momenttir ve rotor salınımlarının (yani  $\Delta\delta$  ve  $\Delta\omega$ 'deki salınımları) enerji harcadığına ve bu yüzden zamanla bozulduğuna emin olmak için önemlidir.

Sönümlenme momentinin tek kaynağı olarak da mekanik şaft sistemindeki sönümlenme momenti Eş. 3.55'de gösterilmiştir.

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

Şekil 3.4'deki blok diyagramından aşağıdaki ifadeye sahip olunabilir.

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

Düzenleme yapılırsa ise,

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

elde edilir. Böylece karakteristik eşitlik aşağıdaki gibi bulunur:

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

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

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

ve sönümlenme oranı ise,

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{K_D}{2H \omega_n} = \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{2H K_S \omega_s}} \quad (3.60)$$

olarak elde edilir. Senkronlama momenti katsayısı  $K_S$  arttığında doğal frekans artar ve sönümlenme oranı azalır. Sönümlenme momenti katsayısı  $K_D$  deki bir artış sönümlenme oranını artırırken, eylemsizlik sabitindeki bir artış hem  $\omega_n$  hem de  $\xi$ 'in azalmasını sağlar. Bir senkron jeneratörde sistem kararlılığı her iki momentin varlığı ile mümkündür. Zayıf senkronlama momenti rotor açısında periyodik olmayan kayma nedeni ile kararsızlığa neden olur iken zayıf sönüm momenti ise salınımda kararsızlığa yol açar [1, 22, 31, 32].

### 3.3.2. Senkron jeneratörün basitleştirilmiş modeli

Senkron jeneratörün matematiksel modelinin basitleştirilmesine dayanan literatürde birçok farklı çalışma bulunmaktadır. Ancak yaygın olarak kullanılan model rotor mekanik dinamiklerine uyarma dinamiklerinin eklendiği 3. derece modeldir [1, 31, 32]. Basitleştirmenin seviyesini, yapılan kabuller ve ihmaller belirlemektedir. Bu ihmaller ve kabuller genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir [1, 22-24, 28].

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

Birim değere sahip stator EMK'larının rotor büyüklükleri cinsinden karşılığı dikkate alındığında, akı eşitlikleri ve gerilim eşitlikleri düzenlenerek sonsuz baraya bağlı senkron jeneratörün temsil edildiği 3. derece modelin elektriksel dinamiği aşağıdaki gibi elde edilir [1, 28, 31, 32].

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= \frac{1}{2H} (T_m - T_e - D \cdot \Delta\omega) \\ \dot{\delta} &= \omega_0 \Delta\omega \end{aligned} \quad (3.67)$$

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

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

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

olarak yazılabilir. Eş. 3.68 ve Eş. 3.69  $V_\infty$  ve yük açısı  $\delta$  cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

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

Eş. 3.68 ve Eş. 3.69 ifadesi  $i_q$  ve  $i_d$  için çözümlerse,

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

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

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

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

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

Eş. 3.65 küçük değişimler için aşağıdaki gibi düzenlenir.

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

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

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

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

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

Eş. 3.61 küçük değişimler için aşağıdaki gibi düzenlenir:

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

Eş. 3.74'de verilen  $\Delta i_d$  ifadesi Eş. 3.79'da yerine yazılıp elde edilen ifade düzenlenirse,

$$T'_{d0} \frac{d\Delta E'_q}{dt} + \frac{\Delta E'_q}{K_3} = \Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta \quad (3.80)$$

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

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

stator eşitliklerinden Eş. 3.82, jeneratör uç gerilimi genlik değeri Eş. 3.83'deki gibi yazılabilir

$$\begin{cases} v_q = \omega_r \lambda_d = \omega_r L_{md} i'_f - L_d i_d \\ v_q = E'_q - x'_d i_d \\ v_d = -\omega_r \lambda_q = -\omega_r L_q i_q \\ v_d = x_q i_q \end{cases} \quad (3.83)$$

$$V_t^2 = v_q^2 + v_d^2 \quad (3.84)$$

Eş. 3.84 ifadesi küçük değişimler için

$$2V_t \Delta V_t = 2v_{q0} \Delta v_q + 2v_{d0} \Delta v_d \quad (3.85)$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 3.84 ve Eş. 3.85  $E'_q = v_q + x'_d i_d$  ve  $v_d = x_q i_q$  eşitlikleri kullanılarak aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\Delta V_t = \frac{v_{q0}}{V_t} (\Delta E'_q - x'_d \Delta i_d) + \frac{v_{d0}}{V_t} x_q \Delta i_q \quad (3.86)$$

Eş. 3.73 ve Eş. 3.74'te verilen ifadeler Eş. 3.75'te  $\Delta i_q$  ve  $\Delta i_d$  yerine yazılıp elde edilen ifade  $\Delta \delta$  ve  $\Delta E'_q$  için düzenlenirse jeneratör uç gerilim ifadesi,

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (3.87)$$

bulunmuş olur. Eş. 3.87 ifadesinde

$$K_5 = \frac{x_q}{x_e + x_q} \cdot \frac{v_{d0}}{V_t} V_\infty \cos \delta_0 - \frac{x'_d}{x_e + x'_d} \cdot \frac{v_{q0}}{V_t} V_\infty \sin \delta_0 \quad (3.88)$$

$$K_6 = \frac{x_q}{x_e + x'_d} \cdot \frac{v_{q0}}{V_t} \quad (3.89)$$

olarak tanımlanmıştır.

Bu eşitlikler Heffron-Phillips modelini temel alan doğrusallaştırılmış senkron jeneratöre ait ifadeler olup sistem kararlılığına uyartım kontrolü etkisinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılır [1, 24, 28, 39, 40]. Eşitliklerde ifade edilen  $K_1 - K_6$  sabitleri güç sistemi değişkenleri olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

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

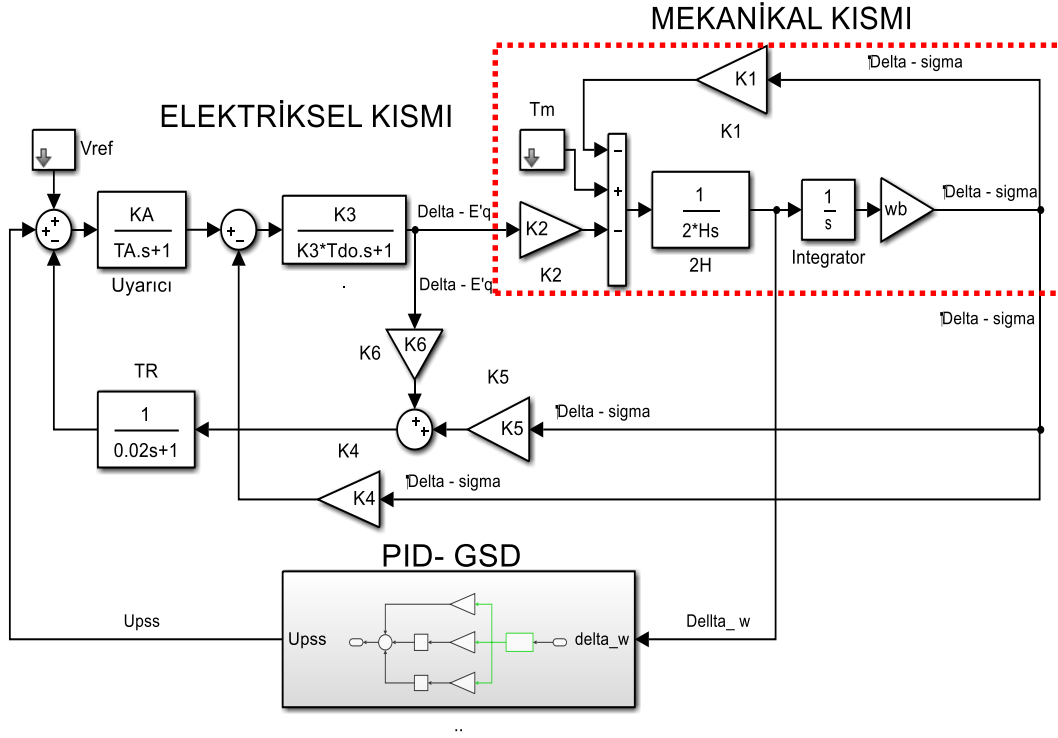
$K_2$ : Eş 3.78'de ifade edilen  $K_2$  sabiti alan akımı değişimi ile elektriksel moment değişim ilişkisini belirten bir katsayıdır. Bu katsayının çalışma durumuna bağlı olduğu açıkça görülmektedir.

$K_3$ : Eş 3.81'de ifade edilen  $K_3$  sabiti (empedans faktörü parametresi) ve  $T_3$  (yükli durumdaki alan zaman sabiti); birlikte bozucu etki-alan akı değişimi ilişkisini belirleyerek dinamik cevabı etkilerler. Çalışma durumundan bağımsız olmalarına karşın, alan akı değişiminin hızını tayin ettikleri için senkron makine için oldukça önemli parametrelerdir.

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

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

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



Şekil 3.5. Doğrusallaştırılmış TMSGB modeli

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

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

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

$$\dot{\Delta e'_q} = -\frac{K_4}{T'_{do}} \Delta\delta - \frac{1}{T'_{do} K_3} \Delta e'_q + \frac{1}{T'_{do}} \Delta E_{FD} \quad (3.91)$$

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

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

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta\omega} \\ \dot{\Delta e'_q} \\ \dot{\Delta E_{fd}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ -\frac{K_4}{T'_{do}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta e'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} u_{PSS} \quad (3.93)$$

Uyartım sistemi ve PID tabanlı PSS ilave edilmiş TMSGB sisteminin kontrolü durum uzay matrisi (Ac) Eş. 3.94'deki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & 0 & -\frac{K_2}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_4}{T'_d} & 0 & -\frac{1}{T'_d K_3} & \frac{1}{T'_d} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_A} & 0 & 0 & \frac{K_A}{T_A} \\ -\frac{K_1}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_w} & 0 \\ \frac{K_1 K_D}{MT_w} - \frac{K_1 K_P}{M} + \frac{K_2 K_4 K_D}{MT'_d} & \frac{-K_1 K_D \omega_b}{M} & \frac{K_2 K_D}{MK_3 T'_d} + \frac{K_2 K_D}{MT_w} - \frac{K_2 K_P}{M} & \frac{-K_2 K_D}{MT'_d} & \frac{K_D + (K_I T_w - K_P) T_w}{(T_w)^2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.94)$$

### 3.4. Otomatik Gerilim Regülâtörü ve Uyarma Sistemleri

Güç sisteminin kararlılığını arttırmada ve kontrolünü sağlamada genel olarak bir uyarıcı ve bir gerilim regülâtörünü içeren uyartım sistemleri kullanılır. Senkron makinelerle ilişkin uyartım sistemlerinin, elektrik sistemleri içerisinde oluşan geçici olaylar üzerinde belirgin etkisi vardır. Güç sistemlerinin sürekli hal kararlılık sınırlarının artırılmasında yüksek kazançlı ve sürekli çalışan gerilim regülâtörlerinin uygun olduğu görülmüştür. Ancak otomatik gerilim regülâtörlü (Automatic voltage regulator, AVR) sistemlerin, sistemde oluşan elektromekanik salınımların sönümlenmesine dolayısıyla sistemin sürekli hal kararlılığının iyileştirilmesine olan etkileri oldukça sınırlıdır. Bunun yanı sıra, çalışma noktasına bağlı olarak AVR'ler güç sistemine sürekli hal kararlılığını bozucu yönde etki edebilmektedir [1, 21-24].

Uyartım sisteminin görevini tam olarak yerine getirebilmesi için aşağıdaki performans gereksinimlerini sağlaması gerekmektedir [22, 23, 28];

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

IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) uyartım sistemlerini 3 sınıfa ayırmış olup bunlar DA tipi, ST tipi ve AC tipi uyartım sistem modelleridir. Çizelge 3.1’de bu sınıflandırmayı içeren 19 adet uyarıcı ve regülatörden oluşan uyartım sistem modeli gösterilmiştir. Bu modeller geçici hal ve sürekli hal kararlılık çalışmalarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir [1, 41].

Çizelge 3.1. IEEE uyarıcı modelleri

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

### 3.4.1. DA tipi uyartım sistem modelleri

Bu tip modelde uyartım sistemi güç kaynağı olarak komütatörlü DA jeneratör kullanılmaktadır. Bu sistemler günümüzde artık yerini AA ve Statik sistemlere terketmiştir. Bu uyartım sistemlerinde bir AA alternatör ve jeneratör alanı için gerekli doğru akım üretmek için sabit veya döner doğrultucular kullanılır. Bu gibi uyartım sistemlerinde yüklenme etkileri önemlidir ve jeneratör uyartım akımının bu sistemlere giriş olarak kullanılması bu etkilerin tam olarak görülmesine imkan verir. Bu sistemlerden bazıları (AA4A tipi) negatif alan kuvveti sağlayabilirken birçoğu negatif alan akımı sağlayamazlar [1, 21, 36, 41].

### 3.4.2. ST tipi uyartım sistem modelleri

Burada senkron makina, uyartım için gereken gücü bir uyartım trafosu ve tristörlü AA/DA dönüştürücüsü üzerinden alır. Gerilimi (bileşik sistemlerde aynı zamanda akımı), uygun bir değere dönüştürmek için bir transformatör kullanır. Doğrultucular jeneratör alanı için gerekli doğru akımı sağlamak üzere kontrollü veya kontrolsüz olabilirler. Bu sistemlerin çoğundan negatif alan gerilimi elde edilebilir, buna karşılık negatif alan akımı elde edilemez. Bunun için daha detaylı modeller gerekmektedir. Statik sistemlerin çoğunda uyartım gerilimi çok yüksek değerlere çıkabilir. Bu yüzden uyartım sistemini ve jeneratör rotor sargılarını korumak için ilave alan akım sınırlama devreleri kullanılır. Bu gibi ek devreler blok diyagramlarında gösterilmemiştir [1, 21, 36, 41].

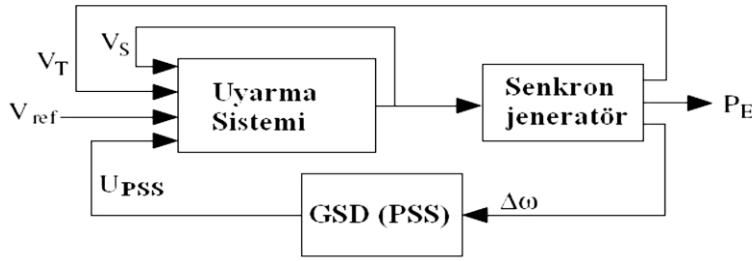
### 3.5. Güç Sistemi Dengeleyicisi (Power System Stabilizer PSS)

Bir güç sistemi dengeleyicisi (GSD), hem otomatik gerilim regülatörü (OGR) sistemine hem de türbin-yöneten sistemine ek kontrol döngüleri sağlayan bir cihazdır [42].

#### 3.5.1. Uyarım sisteme uygulamalı güç sistem dengeleyicisi

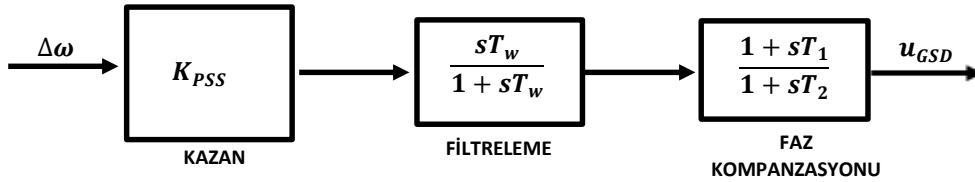
Senkron jeneratör OGR sistemine ek kontrol döngüleri eklenmesi, küçük sinyal kararlılığı ve büyük sinyal (geçici hal) kararlılığı güçlendirdiğinden en yaygın kullanılan yollardan birisidir. Böyle ek kontrol döngüler eklenmesi büyük bir dikkatle yapılmalıdır. OGR (Ek kontrol döngüleri olmadan), amortisör ve alan sargıları tarafından sağlanan sönümlemeyi zayıflatabilir. Sönümleme torkunun bu tür azalması, rotor devrelerinde gerilim regülasyonu etkilerinden dolayı indüklenen aşırı akımlara karşı rotor hız sapmalarıyla indüklenen akımları neden olmasına sebep olur [42].

Senkron jeneratör uyarım kontrolü, güç sistem kararlılığı ve elektriksel güç kalitesinin sağlanmasında çok önemli rol oynar. Uyarım sistemleri normalde, yüksek kazanç ve küçük zaman sabitine sahip sistemlerdir. Yani, farklı işletme koşullarında sistemde çok çabuk kompanzasyon ve sönümleme yapabilecek kapasiteye sahiptirler. Yüksek kazançlı uyarım kontrolü genellikle geçici hal kararlılığı sağlar fakat kontrolörün ani cevabında kalıcı düşük frekans salınımları oluşur. Bu da diğer makinelerle arasında dinamik kararsızlık oluşmasına yol açar. Güç sistemlerinde oluşabilecek bozucu etkiler sonucu mekanik ve elektriksel güç dengesinin bozulması durumunda, sistemin açılabilir kararlılığını koruyabilmesi için öncelikle yeterli senkronizasyon momentinin üretilmesi gerekir. Senkronizasyon momentini güçlendirmek adına jeneratörlerin uyarım sistemine etkileyen otomatik gerilim regülatörleri kullanılır. Ancak senkronizasyon momenti kararlılığı tek başına sağlanamaz. Rotor açısının referans değerine göre değişimi karşılayan senkronizasyon momenti, rotor açısının kayma yapmasını engeller. Ancak, rotor açılma hızındaki değişimi karşılayan sönüm momentinin eksikliği söz konusu olursa rotor açısı salınımlarının genlikleri azaltılamaz ve kararlılık sağlanamaz. Bu probleme geleneksel çözüm yaklaşımı, jeneratörün uyarımına ek yardımcı işaretler üreten ve bu şekilde jeneratörde oluşan elektromekanik salınımların söndürülmesine yardımcı bir eleman olan güç sistemi dengeleyicisini (Power System Stabilizer PSS) Şekil 3.6'da olduğu gibi eklemektir [1, 22-25, 31, 32, 38-41, 43].



Şekil 3.6. GSD ve senkron jeneratör bağlantısı

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



Şekil 3.7. GSD parametre blok diyagramı

### Kazanç

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

### Filtreleme

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

### Faz kompanzasyonu

Rotor açısı salınımlarını söndürebilmek için, güç sistemi dengeleyicisi sebebiyle senkron jeneratör rotoruna etkiyen elektriksel momentin, rotor hızı değişimiyle aynı fazda olması gerekir. Kullanılan faz kompanzasyon filtresi uyarma girişi ile elektriksel moment arasındaki kapasitif faz farkını kompanze etmek için kullanılır. Eğer faz kompanzasyonunun derecesi küçük istenirse, birinci dereceden tek bir blok yeterli olur. Güç sistemi dengeleyicisinin yerel ve bölgesel salınımlarda sönümlenme yapması gerektiğinden geniş bir frekans aralığında sönümlenme yapacak şekilde tasarlanır [1].

### Sınırlandırıcı

Güç sistemi dengeleyicisi sınırlandırıcısı, dengeleyici pozitif çıkış sınırı, büyük salınımlara, yüksek düzeyde etki etmesi için büyük bir bağıl değer olan 0.1 – 0.2 pu aralığında ayarlanır. Negatif yönde ise  $-0.05 - (-0.1)$  pu sınırları uygun olup, dinamik cevap için yeterli kontrol aralığı sağlar [1].

### **3.5.2. Güç sistem dengeleyicisinin çeşitleri**

Güç sistemi dengeleyicisi giriş sinyalinin farklılıklarına göre gruplara ayrılabilir. Pratikte de kullanılan temel dengeleyici çeşitleri aşağıda verilmiştir.

#### $\Delta\omega$ tabanlı GSD

Hidrolik santrallerde 1960'lardan beri kullanılan  $\Delta\omega$  güç sistemi dengeleyicilerinde en büyük sıkıntı hız sapmalarını ölçecek aletin tasarımında milin kaçması gibi etkenlerden kaynaklanan gürültünün en aza indirilmesidir. Bu düzey gürültü frekansına bağlı olup, 5 Hz'in altındaki gürültülerin oranı % 0.2'den çok olmamalıdır. Çünkü uyarma gerilimindeki düşük frekanslı değişimler terminal geriliminde önemli değişimlere neden olur. Mil dönme hızı frekansı ve mil kaçması, burada en önemli gürültü bileşenlerini oluşturur. Bu tip düşük frekans gürültüleri, geleneksel elektrik filtreleriyle yok edilemezler. Milin etrafında birkaç turdan alınan sonuçların toplanması yani hız işaretini ölçme yöntemi ile bu sorun giderilir. Termal ünitelerin çoğunda, bazı sınırlamalar olmasına rağmen mil hızının doğrudan ölçülmesine dayanan dengeleyiciler kullanılır. Burulma filtresine ihtiyaç göstermeleri

başlıca dezavantajlarıdır. Dengeleyici işaretlerin burulma bileşenlerini azaltmak üzere kullanılan bu filtre, düşük frekanslarda fazın geri kalmasını sağlayarak, kabul edilebilir dengeleyici kazancını sınırlandırır. Genelde bu çok sınırlayıcı olduğundan, dengeleyicinin sistem salınımlarını sönmülemeye etkisini azaltır.  $\Delta P_e - \Delta \omega$  dengeleyicilerle bu sınırlamalar giderilmiş olur.

### $\Delta \omega$ ve $P_e$ tabanlı GSD

Eş. 3.95 ivmelendirme gücünden, rotor hız sapmalarıyla orantılı işaretin nasıl üretileceğini göstermektedir. Burada  $M$  atalet sabitini,  $P_m$  mekanik giriş gücündeki değişimi,  $P_e$  elektriksel çıkış gücündeki değişimi ve  $\omega_{eq}$  eşdeğer hız sapmasını ifade eder.

$$\Delta \omega_{eq} = \frac{1}{M} \int (\Delta P_m - \Delta P_e) dt, \frac{rad}{sn} \quad (3.95)$$

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

### Frekans tabanlı GSD

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

### Dijital GSD

Özellikle uyarma sistemlerinin de dijital olarak kontrol edilmesi sonucu, yukarıda anlatılan dengeleyiciler bilgisayar yazılımı ile kontrol edilecek şekilde tasarlanmıştır.

## 4. ÇOK MAKİNALI GÜÇ SİSTEM ANALİZİ

Çok makinalı güç sisteminin küçük sinyal analizi bu bölümde incelenmiştir. Sistem modelinin formülasyonu için yöntemler, ayrıntılı bir biçimde gösterilmektedir. Büyük sistemlerin analizi, mutlaka salınım kritik modları (tipik olarak bölgeler arası mod) üzerine konsantre olmaktadır ve bu önemlidir [44].

### 4.1. Basitleştirilmiş Bir Sistem Modeli

Bir sistemin elektromekanik modları sadece jeneratörlerin klasik modelleri ile vurgulanır. Buna ek olarak, aşağıdaki varsayımlar, analizi basitleştirir.

1. İletim hatlarında kayıpları ihmal edilir.
2. Gerilim genlikleri tüm baralarda sabittir.
3. Tüm yükler statiktir.

Tüm bara gerilimleri sabit varsayıldığı için, sadece aktif güç akışı denklemlerinin dikkate alınması gerekir. Herhangi bir  $j$  barasında, (jeneratörün dahili barası olmadığı halde), enjekte edilen güç  $P_j$  Eş. 4.1'deki gibi verilmiştir [44].

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

Eş 4.1'de ifade edilen  $n_j$   $j$  baraya bağlı yük baraların seti,  $m_j$  de  $j$  barasına bağlı jeneratörün (dahili) baralarının seti.  $P_{lj}$   $j$  baraya bağlı yükün tükettiği güçtür.  $x_{ij}$   $i$  ve  $j$  baralara bağlı hat reaktansdır.  $x'_{dk}$   $k$  jeneratörün (direkt ekseninde) geçici reaktansdır. Analizde çıkık kutuplu özelliği ihmal edilmektedir,

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

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

Eş 4.3'de  $g_{ij} = \frac{V_i V_j \cos \delta_{ij}}{x_{ij}}$ .

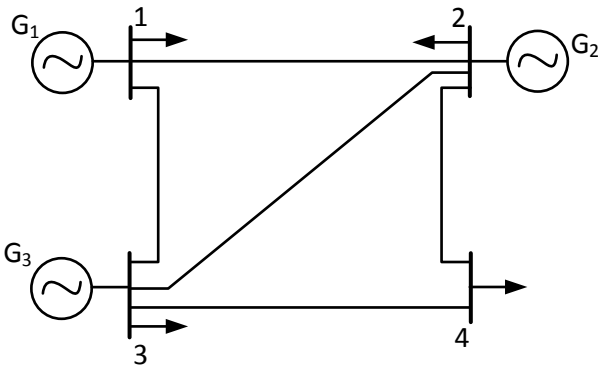
$\Delta P$  ile mevcut akım ve  $\Delta\delta$  ile gerilim düşümü karşılaştırılması olduğundan, doğrusallaştırılmış denklemler (4.1 ve 4.2), bir doğrusal dirençli ağını temsil edilmektedir.

$$[G] \begin{bmatrix} \Delta\delta_g \\ \Delta\delta_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

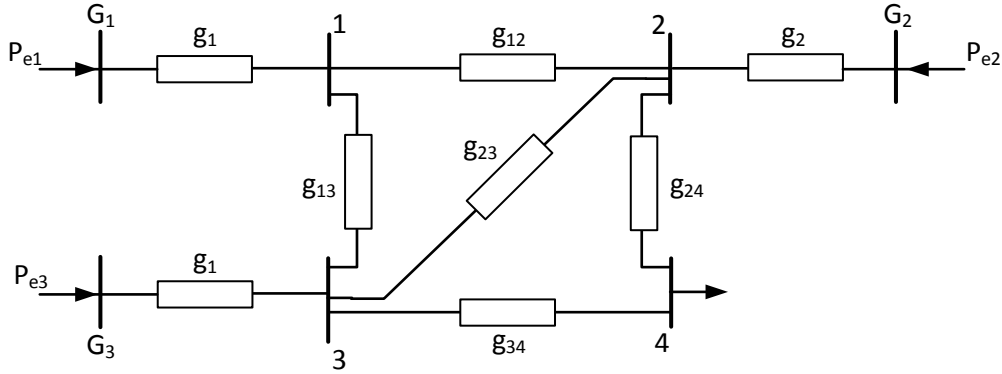
Eş. 4.4'de ifade edilen  $\Delta\delta_g$ , m (jeneratörlerin sayısı) dahili baralara ilgili rotor açısı sapmasının bir vektörüdür.  $\Delta\delta_l$  diğer bara açısı sapmalarını temsil etmektedir.  $\Delta P_e$  jeneratörlerin elektrik çıkış gücünde sapmaların vektörüdür. Eş. 4.4'deki sağ tarafta ikinci giriş sıfır, yük baralarında sabit gerilimi olduğu zaman aktif yükleri sabit kabul edilir.

[G] matrisinin tekil olduğunun görülmesi zor değildir. Bu toprağa bağlantısı olmayan bir ağın belirsiz iletkenlik matrisini temsil eder. Örnek olarak Şek 4.1.'deki gibi 3 jeneratör, 4 bara sistemi düşünebiliriz. Doğrusallaştırılmış güç akış denklemleri Şek 4.2.'deki gibi bir direnç 7 baralı ağını temsil etmektedir. Bu ağ için [G] matrisi Eş 4.5 ile verilir

$$[G] = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 & -g_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & 0 & 0 & -g_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_3 & 0 & 0 & -g_3 & 0 \\ -g_1 & 0 & 0 & (g_1 + g_{12} + g_{13}) & -g_{12} & -g_{13} & 0 \\ 0 & -g_2 & 0 & -g_{12} & (g_{12} + g_{23} + g_{24} + g_2) & -g_{23} & -g_{24} \\ 0 & 0 & -g_3 & -g_{13} & -g_{23} & (g_3 + g_{13} + g_{23} + g_{34}) & -g_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{24} & -g_{34} & (g_{24} + g_{34}) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$



Şekil 4.1. Çok makinalı güç sistemi diyagramı



Şekil 4.2. Eş. 4.4 temsil eden bir direnç ağı

[G] matrisinin her satır ya da sütun sıfıra kadar ekler. Süperpozisyon teoreminden, biz  $\Delta P_{ek}$  için Eş 4.5'teki gibi bir ifade elde edebiliriz

$$\Delta P_{ek} = \sum_{j=1}^m G_{kj}^R \Delta \delta_j \quad (4.6)$$

Eş. 4.6'da ifade edilen  $G_{kj}^R$  jeneratörün  $j$  ve  $k$  baralar arasındaki kısa devre transfer admitansdır. Eğer tüm açılı sapmaları eşitse yani  $\Delta \delta_j = \Delta \delta, j = 1, 2, \dots, m$ , böylece  $\Delta P_{ek} = 0$  biz Eş. 4.7'deki gibi elde edebiliriz ki,

$$\sum_{j=1}^m G_{kj}^R = 0 \quad (4.7)$$

$G_{kj}^R$  azaltılmış iletkenlik  $[G^R]$  matrisinin unsurudur ve jeneratörün iç baraları haricindeki tüm baraları giderildikten sonra  $[G]$ 'den elde edebilir. Bunun Eş. 4.4' ten takip edebiliriz.

#### 4.1.1. Jeneratör denklemleri ve atalet merkezi (center of inertia, COI) referans

Jeneratörlerin klasik modeli kullanılarak,  $k$  jeneratör için salınım denklemleri Eş. 4.8'deki gibi ifade edebilir

$$M_k = \frac{d^2 \delta_k}{dt^2} + D'_k \frac{d \delta_k}{dt} = P_{mk} - P_{ek}, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.8)$$

Burada  $M_k = \frac{2H_k}{\omega_B}$ ,  $D'_k = \frac{D_k}{\omega_B}$ , Eş. 4.7'de ifade edilen  $D_k$  birim sönümlemedir. Basitleştirmek için, bu sönümlemenin homojen olduğu, yani

$$\frac{D'_k}{M_k} = \frac{D_k}{2H_k} = \text{sabit} = \alpha$$

olduğu varsayılacaktır.

Atalet merkezi (COI) tanımlaması, bunu açılı  $\delta_0$  Eş. 4.8'deki gibi tanımlanmıştır.

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \left( \sum_{k=1}^m M_k \delta_k \right) \quad (4.9)$$

Eş. 4.8'de  $M_T = \sum_{k=1}^m M_k$  toplam ataleti. COI için denklemleri Eş. 4.10'de verilmiştir

$$M_T(p+\alpha)\tilde{\omega}_0 = \sum_{k=1}^m P_{mk} - \sum_{k=1}^m P_{ek} = P_{COI} \quad (4.10)$$

Burada  $\tilde{\omega}_0 = \frac{d\delta_0}{dt}$  ve  $p = \frac{d}{dt}$  olarak verilmektedir.

Elektriksel ağında,

$$\sum_{k=1}^m P_{ek} = \sum_{j=1}^n P_{lj} + P_{loss} \quad (4.11)$$

olmaktadır.

Sabit aktif yükü ve kayıpsız ağı için, mekanik güçleri sabit olduğu zaman  $P_{COI}$  de sabittir.

Eş. 4.10' u Eş. 4.12'deki gibi yazabiliriz

$$M_T(p^2 + \alpha p)\delta_0 = P_{COI} \quad (4.12)$$

Eş. 4.12'inciye Eş 4.8'de koyarak, Eş 4.13'ü elde ederiz

$$M_k(p^2 + \alpha p)\theta_k = P_{mk} - P_{ek} - \frac{M_k}{M_T} P_{COI}, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.13)$$

Eş. 4.13'de ifade edilen  $\theta_k$ , COI'ye bağlı rotor açısıdır ve Eş. 4.14 ile tanımlanır.

$$\theta_k = \delta_k - \delta_0 \quad (4.14)$$

$\theta_k$ 'nin yukarıdaki tanımından, böyle COI ile ilgili tüm açıların bağımsız olduğu ve aşağıdaki ilişki geçerli olduğu gösterilebilir.

$$\sum_{k=1}^m M_k \theta_k = 0 \quad (4.15)$$

Ayrıca,

$$\theta_i - \theta_j = \delta_i - \delta_j \quad (4.16)$$

Eş. 4.13'yi doğrusallaştırılır, ( $P_{COI}$ 'yi sabit olarak varsayarak)

$$M_k p^2 \Delta \theta_k + \alpha M_k p \Delta \theta_k = -\Delta P_{ek}, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4.17)$$

elde ederiz. Eş 4.6 ve 4.7'yi kullanılarak ve Eş 4.18'deki gibi olabilir

$$\Delta P_{ek} = \sum_{j=1, j \neq k}^m -G_{kj}^R (\Delta \delta_k - \Delta \delta_j) = \sum_{j=1, j \neq k}^m -G_{kj}^R (\Delta \theta_k - \Delta \theta_j) \quad (4.18)$$

Eş. 4.18'nin elde edilmesinde Eş. 4.16 de kullanılmıştır. Eğer  $\alpha = 0$ , doğrusallaştırılmış sistem denklemleri Eş 4.20'deki gibi matris formunda yazılabilir.

$$[M]p^2 \Delta \theta = -[G]^R \Delta \theta \quad (4.19)$$

skalar denklemine ilave olarak

$$M_T p^2 \Delta \delta_0 = 0 \quad (4.20)$$

Eş. 4.19'da ifade edilen  $[G]^R$  azaltılmış (jeneratör dahili baralara)  $G^R(j, k) = G_{kj}^R = G_{jk}^R$  unsurları olan simetrik matristir. Bu matrisin seviyesi  $(m - 1)$ 'den az veya ona eşittir.

### Açıklamalar

1. Kayıpsız ağ ve sabit aktif güç yükleri için  $\Delta P_{COI} = 0$  olur. Bu durumda, ayrıca (sıfır sönümlenme haline)  $[M]p^2 \Delta \delta = -[G]^R \Delta \delta$  meydana gelir.
2. Eş 4.14'e göre COI referans çerçevesi üzerindeki bağımsız açı değişkenlerinin sayısı sadece  $m$ 'ye kadar azaltılır, yani  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m-1}$  ve  $\delta_0$ .
3.  $n$  sayısı sistemini açıklayan ikinci dereceden diferansiyel denklemler vardır. Böylece  $2n$  sistem özdeğerleri vardır ve bunların dışında iki tanesi sıfırdır (sıfır sönümlenme için) aşağıdaki verilen ifadeler bu nedenle

$$p \Delta \delta_0 = \Delta \tilde{\omega}_0$$

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

haline gelir. Eğer  $\alpha \neq 0$ , o zaman özdeğerlerinden biri,  $-\alpha$  olur.

4. Bile  $\Delta P_{COI} \neq 0$ , bu gösterir ki

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

olur ve sistem denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta \dot{y} = [G] \Delta y$$

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

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

[A] matrisinin özdeğerleri,  $[A_{11}]$  ve  $[A_{22}]$  matrislerinin özdeğerleridir. İkincisi

$$[A_{22}] = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

şeklinde yazılır. Bu gösteriyor ki COI referans tabanlı sistem denklemleri, sistemin yapısını ortaya çıkarmak gibi bir avantaja sahiptir.

5. Üniform sönümleme hakkında varsayım için, iki set halinde sistem denklemlerinin ayrıştırılması gereklidir.

#### 4.1.2. Doğrusal durum uzayı denklemleri

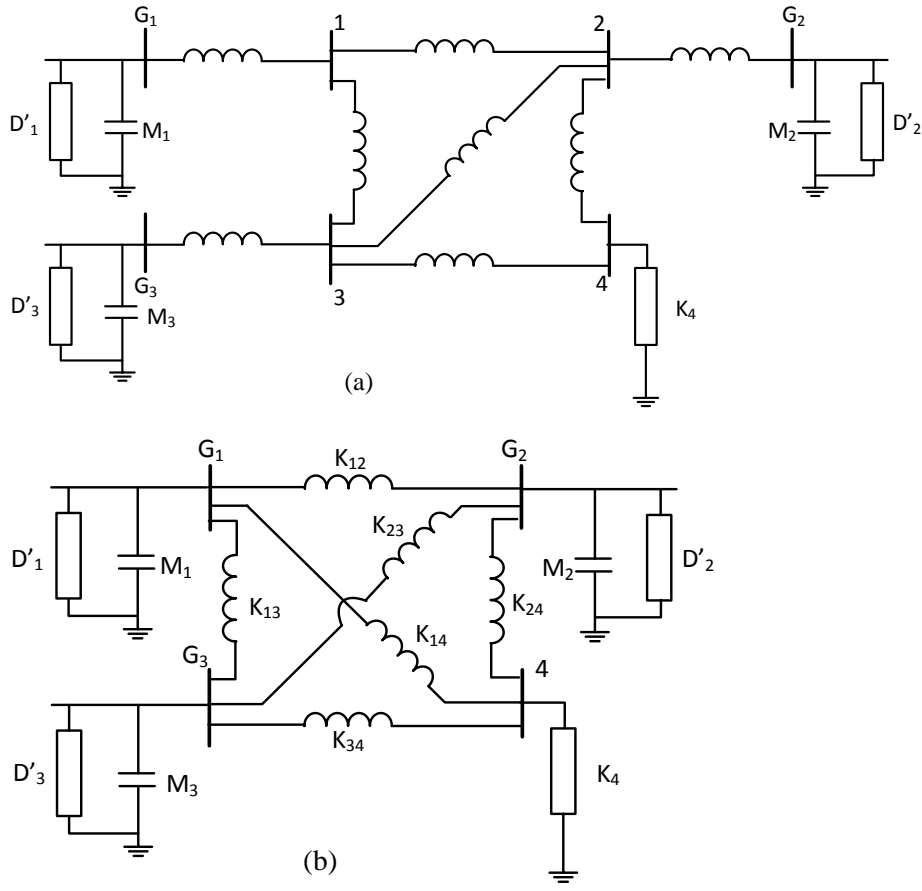
Güç sistemi için doğrusallaşmış durum uzayı denklemleri, ağın benzerliğinden yani voltaja benzer  $\Delta\omega$  ( $p\Delta\delta$ ) ve akıma benzer  $\Delta P$  ile elde edilebilir. GLC elemanlarından oluşan ağ da; yani C (kondansatör) yerine atalet (M), G (iletkenlik) yerine sönümleme (ya da frekansa bağımlı yükler) ve L (indüksiyon) yerine karşılıklı  $G_{ij}$  kullanılır. Örnek olarak, Şek. 4.1.'de güç sistemi için benzer ağ gösterilmiştir. Dördüncü barada frekans yükü olduğu varsayılmıştır.

Şek. 4.3(a)'da azaltılmamış şebeke gösterilmiştir. Şek. 4.3(b)'de azatılmış şebeke vardır, bu şebekeden 1, 2 ve 3'üncü baraları çıkarılmıştır.  $K_{12}$ ,  $K_{13}$ ,  $K_{14}$ ,  $K_{23}$ ,  $K_{24}$  ve  $K_{34}$  indüktansların karşılıklı elemanlarıdır (bunları  $[G^R]$  azaltılmış matrisin elemanlarına özdeştir ve bu matrisinde  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  ve 4 baraları içindedir).  $\Delta\delta$  değişkeni bağlantı akıya benzerdir. Şek. 4.3(b)'deki gösterilen ağ için denklemleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$M_1 \frac{d}{dt} \Delta\omega_1 + D_1' \Delta\omega_1 = -\Delta P_{e1}$$

$$M_2 \frac{d}{dt} \Delta\omega_2 + D_2' \Delta\omega_2 = -\Delta P_{e2}$$

$$M_3 \frac{d}{dt} \Delta\omega_3 + D_3' \Delta\omega_3 = -\Delta P_{e3}$$



Şek. 4.3. Küçük sinyal analizi için bir elektrik şebekesi analog, (a). Azaltılmamış ağı, (b). Azaltılmış ağı

$$\frac{d}{dt}\Delta\delta_{12} = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_2$$

$$\frac{d}{dt}\Delta\delta_{13} = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_3$$

$$\frac{d}{dt}\Delta\delta_{14} = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_4$$

$$\Delta P_{e1} = K_{12}\Delta\delta_{12} + K_{13}\Delta\delta_{13} + K_{14}\Delta\delta_{14}$$

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

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

$$K_4\Delta\omega_4 = K_{14}\Delta\delta_{14} + K_{24}(\Delta\delta_{14} - \Delta\delta_{12}) + K_{34}(\Delta\delta_{14} - \Delta\delta_{13})$$

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

$$\dot{x} = [A]x$$

gibi ifade edilir, bu ifadede

$$x^T = [\Delta\omega_1 \ \Delta\omega_2 \ \Delta\omega_3 \ \Delta\delta_{12} \ \Delta\delta_{13} \ \Delta\delta_{14}].$$

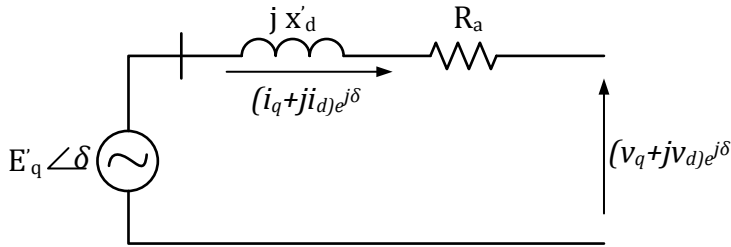
olmaktadır.

#### 4.2. Ayrıntılı Model: Durum – 1

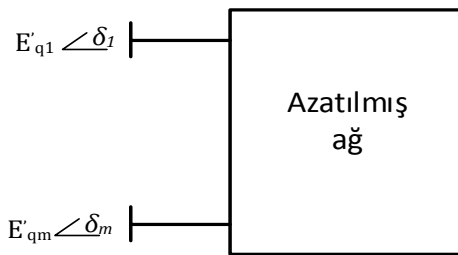
Bir önceki bölümde, basitleştirilmiş bir sistem model olarak kabul edilmekte ve jeneratörleri klasik modeller ile temsil edilmektedir. Bu bölümde, amortisör sargıları ihmal edilerek senkron makineler için 1. model varsayılır. Ayrıca, aşağıdaki varsayımlar basitlik amacıyla yapılır.

- 1) Yükler sabit empedans ile temsil edilmektedir.
- 2)  $x_q = x'_d$  dikkate alınarak geçici çıkıntı ihmal edilir
- 3) Mekanik güç sabit olarak kabul edilir.

Çıkıntı ihmal edilirken, bir senkronize makinenin statoru Şek 4.4'teki eşdeğer devre ile temsil edilmektedir. Burada bunun ile klasik model arasındaki tek fark,  $E'_q$  ifadesinin alanı uyarma sistemi ile etkileyen durum değişkeni olarak işlem görmesidir.



Şek. 4.4. Stator eşdeğer devresi



Şek. 4.5. Azaltılmış ağı (jeneratörün iç baralar ile)

Birinci (1) varsayımdan, yük baraları ihmal edilebilir ve ağ sadece jeneratörün iç baralarına indirgenir. (Şek. 4.5.'e bakınız) k jeneratörün elektrik güç çıkışı

$$P_{ek} = \sum_{j=1}^m E'_{qk} [G_{jk} \cos \delta_{kj} + B_{jk} \sin \delta_{kj}] E'_{qj} \quad (4.21)$$

ile verilir.  $\delta_{kj} = \delta_k - \delta_j$ ,  $(G_{jk} + j B_{jk})$  ağın, indirgenmiş admitans matrisin bir elemanıdır.

*Jeneratör denklemleri; Makina denklemleri (k'inci makina için)*

$$pE'_{qk} = \frac{1}{T'_{d0k}} [-E'_{qk} + (x_{dk} - x'_{dk})i_{dk} + E_{fdk}] \quad (4.22)$$

$$p\delta_k = \omega_B (S_{mk} - S_{mk0}) \quad (4.23)$$

$$pS_{mk} = \frac{1}{2H_k} [-D_k (S_{mk} - S_{mk0}) + P_{mk} - P_{ek}] \quad (4.24)$$

Kolaylık sağlamak için,  $T_{mk}$  ve  $T_{ek}$  yerine  $P_{mk}$  ve  $P_{ek}$ 'yi kullanılmaktadır. Aslında  $P_{ek}$  ve  $T_{ek}$ 'in arasında hiçbir fark yoktur, çünkü ağ hesaplamasında frekans değişimleri ihmal edilir. Jeneratörün iç barasında, karmaşık güç

$$\begin{aligned} P_{ek} + jQ_{ek} &= E'_{qk} (i_{qk} - j i_{dk}) \\ &= E'_{qk} i_{qk} - j E'_{qk} i_{dk} \end{aligned} \quad (4.25)$$

ile verilir. Böylece  $i_{dk}$

$$i_{dk} = \frac{-Q_{ek}}{E'_{qk}} \quad (4.26)$$

ile ifade edilir. İfade edilen  $Q_{ek}$ , Eş. 4. 27 ile elde edilir.

$$Q_{ek} = \sum_{j=1}^m E'_{qk} [G_{jk} \sin \delta_{kj} + B_{jk} \cos \delta_{kj}] E'_{qj} \quad (4.27)$$

Eş. 4.27'deki ifadesinin doğrusallaştırılmasından,

$$\Delta i_{dk} = \frac{Q_{ek0}}{(E'_{qk0})^2} \Delta E'_{qk} - \frac{\Delta Q_{ek}}{E'_{qk0}} \quad (4.28)$$

elde edilir. Eş. 4.22'den Eş. 4.24'e kadar doğrusallaştırılır, ve tüm jeneratörler için denklemler birleştirilir.

$$\dot{X}_g = [A_g]X_g + [B_g]\Delta S_e + [E_g]\Delta E_{fd} \quad (4.29)$$

Eş. 4.29'da ifade edilen

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

$$[A_g] = \text{Diag}[A_{g1} \ A_{g2} \ \dots \ A_{gm}]$$

$$[B_g] = \text{Diag}[B_{g1} \ B_{g2} \ \dots \ B_{gm}]$$

$$[E_g] = \text{Diag}[E_{g1} \ E_{g2} \ \dots \ E_{gm}]$$

$$\Delta S_e^t = [\Delta P_{e1} \ \Delta Q_{e1} \ \dots \ \Delta P_{ek} \ \Delta Q_{ek} \ \dots \ \Delta P_{em} \ \Delta Q_{em}]$$

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

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

Eş. 4.21 ve 4.27'deki ifadeler doğrusal olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta S_e = [F_1]\Delta E'_q + [F_2]\Delta \delta \quad (4.30)$$

$[F_1]$  ve  $[F_2]$ ,  $(2m \times m)$  matrislerdir.  $[F_2]$ 'nin tekil bir matris olduğunu görmek zor değildir, çünkü tüm sütunları sıfıra kadar eklenebilir.  $P_{ek}$  ve  $Q_{ek}$  içinde ifadeleri sadece rotor açılarındaki değişimlere bağlı olduğu için, bu söz konusudur. Böylece, durum uzay açıklaması durum vektörü dikkate alınarak aşağıdaki gibi başitleştirilir.

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

Burada,  $\Delta \delta_{km} = \Delta \delta_k - \Delta \delta_m$  ve açı değişkenlerden biri vazgeçilmiştir. Sistem denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{X}_G = [A_G]X_G + [B_G]\Delta S_e + [E_G]\Delta E_{fd} \quad (4.31)$$

Burada,  $[A_G]$  ifadesi  $(3m - 1) \times (3m - 1)$  matris,  $[E_G]$  ifadesi  $(3m - 1) \times 2m$  matris ve  $[B_G]$  ifadesi  $(3m - 1) \times m$  matristir. Bunlar  $[A_g]$ ,  $[B_g]$  ve  $[E_g]$ 'den farklıdır:

- $[A_{gm}]$ ,  $[B_{gm}]$  ve  $[E_{gm}]$  için girişleri farklı ve
- $[A_G]$  matrisinin son sütunu  $\Delta \delta_{mk}$ 'ye karşı gelen satırında girişleri sahiptir, onların herbirinin  $-\omega_B$ 'ye eşittir.

$[A_{gm}]$ ,  $[B_{gm}]$  ve  $[E_{gm}]$  aşağıdaki denklemler ile verilir

$$[A_{gm}] = \begin{bmatrix} a_m & 0 \\ 0 & -\frac{D_m}{2H_m} \end{bmatrix}, \quad [B_{gm}] = \begin{bmatrix} 0 & b_m \\ -\frac{1}{2H_m} & 0 \end{bmatrix}, \quad [E_{gm}] = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{T'_{d0m}}{0} \end{bmatrix}$$

Mutlak açılar yerine göreceli açılar kullanılarak, Eş. 4.30 Eş. 4.32'ye basitleştirilir.

$$\Delta S_e = [F_1]\Delta E'_q + [F_2]\Delta \delta' \quad (4.32)$$

Eş 4.33'te ifade edilen  $[F_2]$  ( $2m \times m - 1$ ) matristir ve  $\Delta \delta'$  göreceli açılarının bir vektörüdür ki burada  $(\Delta \delta_k - \Delta \delta_m) = \Delta \delta_{km}$  onun k'inci unsurudur.

Nihai sistem denklemleri Eş. 4.31'de Eş. 4.32 değiştirilmesi ile elde edilir,

$$\dot{X}_G = \{[A_G] + [B_G][F]\}X_G + [E_G]\Delta E_{fd} \quad (4.33)$$

$$\text{Eş 4.33'te } [F] = [F_1][C_1] + [F_2][C_2]$$

$$\begin{aligned}
[C_1] &= \text{diag}[C_{11} \dots C_{1k} \dots C_{1m}] \\
[C_2] &= \text{diag}[C_{21} \dots C_{2k} \dots C_{2(m-1)}] \\
C_{1k} &= [1 \ 0 \ 0], \ C_{2k} = [0 \ 1 \ 0] \\
C_{1m} &= [1 \ 0] \\
C_{2(m-1)} &= [0 \ 1 \ 0 \ 0]
\end{aligned}$$

Eğer uyarma kontrolörleri dikkate alınır, o zaman, sistem matrisine kontrol dinamiği kısmı da eklenir. Bu durumda,  $\Delta E_{fd}$  uyarma denetleyicileri çıktı değişkenlerinin bir vektörüdür ve kontrolörlerin durum değişkenleri açısından ifade edilebilir [44].

### 4.3. Ayrıntılı Model: Durum – 2

Sabit empedansları olarak yükler hakkında varsayım kısıtlayıcıdır, eğer doğrusal olmayan yük karakteristikleri veya yük dinamikleri halinde dikkate alınır. statik var kompensatör (SVC) veya yüksek gerilim doğru akım (YGDA) denetleyicilerin dinamikleri yük dinamiğın parçası olarak görülebilir yani SVC ve YGDA dönüştürücü baraları yük baraları olarak kabul edilir gibi. Elbette, kontrolörün dinamikleri indüksiyon motorları gibi tipik yüklerden özgün ve farklıdır.

*Jeneratör denklemler:* Güç sistemi ağ yapısını koruyabilmek için, (yük baraları istinat), önceki bölümde verilen jeneratör temsilinin biraz değiştirilmesi gerekir. Jeneratör denklemleri Eş. 4.34'teki gibi ifade edilir.

$$\dot{x}_g = [A_g]x_g + [B_g]\Delta V_g + [E_g]u_c \quad (4.34)$$

Eş. 4.34'te ifade edilen  $u_c$  jeneratör kontrolörlerinin giriş referans değişkenlerinde küçük pertürbasyonlar ( $\Delta V_{ref}$  ve  $\Delta T_m$  veya  $\Delta \bar{\omega}_{ref}$ ) vektörüdür.  $V_g$  jeneratör uç geriliminin küçük sapmalarıdır ve aşağıdaki verilen ifadeler ile polar ya da dikdörtgen koordinatlarda belirtilmiştir

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

$$\Delta V_g^r = \begin{bmatrix} \Delta V_{Qg} \\ \Delta V_{Dg} \end{bmatrix}$$

$$\Delta V_g^p = \frac{1}{V_{g0}} \begin{bmatrix} -V_{Dg0} & V_{Qg0} \\ V_{Qg0} & V_{Dg0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{Qg} \\ \Delta V_{Dg} \end{bmatrix}$$

$[P]^{-1} = [P]$  olduğunu anlamak kolaydır.

Jeneratörün çıkış değişkenleri güç çıkışı ya da akımlarında küçük sapmalar olabilir (Crohn referans çerçevesine anılacaktır). Akımlar kullanıldığında, Eş 4.35'teki ifade elde edilir

$$\Delta I_g = \begin{bmatrix} \Delta I_{Dg} \\ \Delta I_{Qg} \end{bmatrix} = [C_g]x_g + [D_g]\Delta V_g \quad (4.35)$$

*Örnek:* Eğer senkron makine 1.1 modeli ile temsil edilirse, prime-mover dinamikleri ihmal edildiğinde ve sadece tek zaman sabiti olan bir uyarıcı dikkate alındığında durum değişkenleri aşağıdaki gibi olabilir:

$$x_g^t = [\Delta\delta \quad \Delta S_m \quad \Delta E'_q \quad \Delta E'_d \quad \Delta E_{fd}]$$

$[A_g]$  matrisin sıfırdan farklı elemanları aşağıda verilmektedir

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

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

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

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

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

$$A_g(3, 1) = -\frac{(x_d - x'_d)}{T'_{d0} x'_d} V_{g0} \sin(\delta_0 - \theta_{g0})$$

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

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

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

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

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

Benzer şekilde,  $[B_g]$  ve  $[E_g]$  matrislerinin sıfırdan farklı elemanları da aşağıda verilmektedir:

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

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

$$B_g^p(3,1) = \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d T'_{d0}} \sin(\delta_0 - \theta_{g0})$$

$$B_g^p(3,2) = \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d T'_{d0}} \cos(\delta_0 - \theta_{g0})$$

$$B_g^p(4,1) = \frac{(x_q - x'_q)}{x'_q T'_{d0}} \cos(\delta_0 - \theta_{g0})$$

$$B_g^p(4,2) = \frac{(x_q - x'_q)}{x'_q T'_{d0}} \sin(\delta_0 - \theta_{g0})$$

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

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

$[E_g]$  bir sütun vektörüdür, bu durumda  $u_c$  bir skaler olarak  $\Delta V_{ref}$ 'e eşittir.  $K_E$  ve  $T_E$  uyarma sisteminin kazanç ve zaman sabitidir. İfadelerde elde edilen zaman armatür direnci ihmal edilir. Üstüdis  $p$  kutupsal koordinatların kullanıldığını gösterir.

$[C_g]$  ve  $[D_g]$  matrislerin sıfırdan farklı elemanları aşağıda verilmektedir

$$C_g(1, 1) = I_{Qg0} + \frac{V_{g0} \sin \delta_0 \cos(\delta_0 - \theta_{g0})}{x'_q} - \frac{V_{g0} \cos \delta_0 \sin(\delta_0 - \theta_{g0})}{x'_d}$$

$$C_g(1, 3) = -\frac{\cos \delta_0}{x'_d}$$

$$C_g(1, 4) = \frac{\sin \delta_0}{x'_q}$$

$$C_g(2, 1) = V_{g0} \left[ \frac{\sin \delta_0 \sin(\delta_0 - \theta_{g0})}{x'_d} - \frac{\cos \delta_0 \cos(\delta_0 - \theta_{g0})}{x'_q} \right] - I_{Dg0}$$

$$C_g(2, 3) = \frac{\sin \delta_0}{x'_d}$$

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

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

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

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

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

Eğer  $x'_d = x'_q = x'$ , sonra da yukarıda verilen bazı ifadeleri basitleştirilirdir. Bunları aşağıda

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

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

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

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

$[B_g^r]$  ve  $[B_g^p]$  matrisleri aşağıdaki gibi olabilir

$$[B_g^r] = [B_g^p] [P]$$

$$[D_g^r] = [D_g^p] [P]$$

Üst simge r dikdörtgen koordinatlar kullanıldığı anlamına gelmektedir.

*Ağ denklemleri:* Doğrusal olan ağ denklemleri ya admitans matrisi (ve DQ değişkenleri) kullanılarak ya da Jakobiyen matrisi (güç dengesi denklemlerinden elde edilen) kullanılarak ifade edilebilir. Eskilerini kullanarak, Eş. 4.36'daki şekilde yazılabilir

$$[Y_{DQ}] \Delta V_{DQ} = \Delta I_{DQ} \quad (4.36)$$

Eş. 4.36'da  $[Y_{DQ}]$  ifadesinin her elemanı bir  $2 \times 2$  matristir.

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

$\Delta V_{DQ}(i)$  ve  $\Delta I_{DQ}(i)$  aşağıda verilen unsurlar ile vektörüdür

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

Gerilimler  $\Delta V_{Qi}$  ve  $\Delta V_{Di}$  ile gösterilir,  $\Delta V_{Qi}$  önce ve  $\Delta V_{Di}$  sonra yazılır. Diğer yandan, akımlar  $\Delta I_{Di}$  önceki  $\Delta I_{Qi}$  ile gösterilir yani önce  $\Delta I_{Di}$  gelir. Bu kasıtlı olarak yapılır, böylece matris  $[Y_{DQ}]$  gerçek bir simetrik matris haline gelir (eğer faz kayma transformatörleri kabul edilmezse).

$$[J] \Delta V^P = \Delta S \quad (4.37)$$

Burada  $J$  Jakobiyen matrisidir ve aşağıda tanımlanmıştır

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

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

$P_i$  ve  $Q_i$  bara  $i$ 'de güç enjeksiyonu,  $\theta_i$  ve  $V_i$  bara  $i$ 'de gerilimin açısı ve büyüklüğüdür.

Kutupsal koordinatların yerine dikdörtgen koordinatlarını kullanmak da mümkündür. Bu durumda, Jakobiyen matrisi yukarıda verileden farklıdır.

Eş. 4.36'yı admitans matrisi olarak kullanmak daha uygun olur, çünkü bu admitans matrisi çalışma noktasında değişikliği ile değişmez. Diğer yandan, Jakobiyen matrisi çalışma noktası ile bağlıdır.

Yük dinamikleri ihmal ediliyorsa, statik yüklerin etkisi  $[Y_{DQ}]$  matrisinin diyagonal girişleri değiştirmesi olarak kabul edilir. Benzer şey, sadece kararlı durum kontrol karakteristikleri dikkate alındığı zaman, statik var kompensatör (SVC) etkisi için de geçerlidir.

*Sistem denklemlerinin elde edilmesi:* Sistemdeki jeneratörler sayısı  $m_g$ , yükler sayısı  $m_l$  ve statik var kompensatörleri sayısı  $m_s$  olsun. Ağda baraların sayısı  $n$  olsun. Eş. 4.36'yı yeniden yeniden Eş. 4.38'deki gibi yazılabilirler

$$[Y_{DQ}]\Delta V_{DQ} = [P_G] \Delta I_G - [P_S] \Delta I_S - [P_L] \Delta I_L \quad (4.38)$$

Eş. 4.38'de ifade edilen  $P_G (2n \times 2m_g)$  matristir ve onun unsurları aşağıda verilmiştir. Eğer  $j$  jeneratörü  $i$  baraya bağlıysa,

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

aksi halde

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

olur. Yukarıdakine benzer şekilde  $[P_S]$  ve  $[P_L]$  tanımlanabilir. SVC ' $j$ ' (veya yük  $j$ )  $i$  baraya bağlı olduğu zaman  $P_S(i, j)$  veya  $P_L(i, j)$  2 boyutlu bir birim matristir. Aksi halde,  $P_S(i, j)$  ya da  $P_L(i, j)$  boş bir matristir. SVC ve yük akımlarının akışı bara tarafından (yük hakkında sözleşmede) kabul ediliyorsa, bunun için dikkat edin ki  $\Delta I_S$  ve  $\Delta I_L$  ile ilgili işaret negatiftir.

Her iki  $\Delta I_S$  ve hem  $\Delta I_L$  Eş. 4.39 ve 4.40'taki verilen şekilde ifade edilebilir

$$\Delta I_S = [Y_S] \Delta V_S \quad (4.39)$$

$$\Delta I_L = [Y_L] \Delta V_L \quad (4.40)$$

Eş. 4.39 ve 4.40'ta ifade edilen  $[Y_S]$  ve  $[Y_L]$  blok dyagonal matrislerdir.  $\Delta V_S$  ve  $\Delta V_L$  aşağıda verilmiştir

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

Jeneratör akım vektörü  $\Delta I_G$   $\Delta I_{g1}$ ,  $\Delta I_{g2}$ , ...  $\Delta I_{gm}$  miktarlardan oluşan bir koleksiyondur ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\Delta I_G = [C_G] X_G - [Y_G] \Delta V_G \quad (4.41)$$

Burada,

$$X_G^t = [x_{g1}^t \ x_{g2}^t \ \dots \ x_{gm_g}^t]$$

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

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

$$[C_G] = \text{Diag} [C_{g1} \ C_{g1} \ \dots \ C_{gm_g}]$$

$$[Y_G] = \text{Diag} [-D_{g1}^r \ -D_{g2}^r \ \dots \ -D_{gm_g}^r]$$

olarak verilmektedir.

Eş. 4.38'de bazı değişiklikler yapıldıktan sonra, Eş. 4.42'deki ifade edilebilir

$$[Y'_{DQ}] \Delta V_{QD} = [P_G] [C_G] X_G \quad (4.42)$$

$$\text{Burada, } [Y'_{DQ}] = [Y_{DQ}] + [P_G \ Y_G \ Y_G^t] + [P_S \ Y_S \ Y_S^t] + [P_L \ Y_L \ Y_L^t].$$

Düzeltilmiş admitans matrisidir. Aslında modifikasyonu jeneratör, yük veya SVC'ye bağlı

olan baralara karşı gelen sadece diyagonal elemanları etkiler. Bunun elde edilmesi için, Eş. 4.43'ü de kullanılır

$$\Delta V_G = [P_G]^t \Delta V_{QD} \quad (4.43)$$

Eş. 4.42'de  $\Delta V_{QD}$ 'yi elde edilmekten sonra,  $\Delta V_G$  Eş. 4.44'teki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta V_G = [P_G]^t [Y'_{DQ}]^{-1} [P_G] [C_G] X_G \quad (4.44)$$

Tüm jeneratör denklem koleksiyonu Eş. 4.45 ile verilmiştir

$$\dot{X}_G = [A_G] X_G + [B_G] \Delta V_G + [E_G] U_c \quad (4.45)$$

Burada,

$$[A_G] = \text{Diag} [A_{g1} \ A_{g1} \ \dots \ A_{gm_g}]$$

$$[B_G] = \text{Diag} [B_{g1}^r \ B_{g2}^r \ \dots \ B_{gm_g}^r]$$

$$[E_G] = \text{Diag} [E_{g1} \ E_{g1} \ \dots \ E_{gm_g}]$$

$$U_c^t = [u_{c1}^t \ u_{c2}^t \ \dots \ u_{cm_g}^t]$$

Eş. 4.44'ü Eş. 4.45'te kullanarak Eş. 4.46'yı elde edilir

$$\dot{X}_G = [A_T] X_G + [E_G] U_c \quad (4.46)$$

burada,  $[A_T] = [A_G] + [B_G][P_G]^t [Y'_{DQ}]^{-1} [P_G] [C_G]$ .

#### 4.4. Yük ve SVC Dinamiklerini İçerme

SVC ve yükün dinamikleri (indüksiyon motoru) Eş. 4.47 ve Eş. 4.48'de verilen denklemler ile dahil edilebilir

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_s &= [A_s] x_s + [B_s] \Delta V_s + [E_s] u_{cs} \\ -\Delta I_s &= [C_s] x_s + [D_s] \Delta V_s \end{aligned} \right\} \quad (4.47)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_l &= [A_l]x_l + [B_l]\Delta V_l + [E_l]u_{cl} \\ -\Delta I_l &= [C_l]x_l + [D_l]\Delta V_l \end{aligned} \right\} \quad (4.48)$$

$$\Delta I_S^t = [\Delta I_{S1}^t \ \Delta I_{S2}^t \ \dots \ \Delta I_{sm_s}^t]$$

$$\Delta I_L^t = [\Delta I_{l1}^t \ \Delta I_{l2}^t \ \dots \ \Delta I_{lm_l}^t]$$

Dikkat edin, Eş. 4.47 ve Eş. 4.48 jeneratör denklemlerine yapı olarak benzerdir ama, akımlarla ilgili işaret değişikliği olduğu zaman benzer değildir.

Sistem denklemler önceki bölümde anlatılan benzer bir yöntem kullanılarak elde edilebilir.

Eş. 4.42'deki denklemi Eş. 4.49'daki gibi oluyor

$$[Y'_{DQ}]\Delta V_{DQ} = [P_G][C_G]X_G + [P_S][C_S]X_S + [P_L][C_L]X_L \quad (4.49)$$

burada  $[Y'_{DQ}]$ , daha önce tarif edilene benzer değiştirilmiş bir admitans matristir. Bu durumda,  $[Y_S]$  ve  $[Y_L]$  aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$[Y_S] = \text{Diag}[-D_{s1} \ -D_{s2} \ \dots \ -D_{sm_s}]$$

$$[Y_L] = \text{Diag}[-D_{l1} \ -D_{l2} \ \dots \ -D_{lm_l}]$$

Jeneratör, SVC ve yük denklemlerin toplanması ile ifade edilebilir.

$$\left. \begin{aligned} \dot{X} &= [A]X + [B]\Delta V + [E]U_c \\ \Delta I &= [C]X + [D]\Delta V \end{aligned} \right\} \quad (4.50)$$

Burada

$$[A] = \text{Diag}[A_G \ A_S \ A_L]$$

$$[A_S] = \text{Diag}[A_{s1} \ A_{s2} \ \dots \ A_{sm_s}]$$

$$[A_L] = \text{Diag}[A_{l1} \ A_{l2} \ \dots \ A_{lm_l}]$$

$$[B] = \text{Diag}[B_G \ B_S \ B_L]$$

$$[B_S] = \text{Diag}[B_{s1} \ B_{s2} \ \dots \ B_{sm_s}]$$

$$[B_L] = \text{Diag}[B_{l1} \ B_{l2} \ \dots \ B_{lm_l}]$$

$$\begin{aligned}
[C] &= \text{Diag}[C_G \ C_S \ C_L] \\
[C_S] &= \text{Diag}[C_{s1} \ C_{s2} \ \dots \ C_{sm_s}] \\
[C_L] &= \text{Diag}[C_{l1} \ C_{l2} \ \dots \ C_{lm_l}] \\
[E] &= \text{Diag}[E_G \ E_S \ E_L] \\
[E_S] &= \text{Diag}[E_{s1} \ E_{s2} \ \dots \ E_{sm_s}] \\
[E_L] &= \text{Diag}[E_{l1} \ E_{l2} \ \dots \ E_{lm_l}] \\
\Delta V^t &= [\Delta V_G^t \ \Delta V_S^t \ \Delta V_L^t] \\
\Delta V_S^t &= [\Delta V_{s1}^t \ \Delta V_{s2}^t \ \dots \ \Delta V_{sm_s}^t] \\
\Delta V_L^t &= [\Delta V_{l1}^t \ \Delta V_{l2}^t \ \dots \ \Delta V_{lm_l}^t]
\end{aligned}$$

$\Delta V$  Eş. 4.51'deki gibi ifade edilebilir

$$\Delta V = \begin{bmatrix} P_G^t \\ P_S^t \\ P_L^t \end{bmatrix} \Delta V_{QD} = [P]^t \Delta V_{QD} \quad (4.51)$$

Burada,  $[P] = [P_G \ P_S \ P_L]$

Eş. 4.49 ve 4.51'den, Eş. 4.53 elde edilir

$$\Delta V = [P]^t [Y'_{DQ}]^{-1} [P][C]X \quad (4.52)$$

Eş. 4.53'ün elde edilmesi için Eş. 4.50'de  $\Delta V$  yerine Eş. 4.52 yazılır

$$\dot{X} = [A_T]X + [E]U_c \quad (4.53)$$

Burada

$$[A_T] = [A] + [B][P]^t [Y'_{DQ}]^{-1} [P][C]$$

#### 4.5. Büyük Güç Sistem Modal Analiz

Geniş güç sistemleri özdeğer analizi için bilgisayar programları geliştirilmiştir. Bunların

arasında en önemlileri aşağıdaki verilenlerdir

1. AESOPS (Analysis of Essentially Spontaneous Oscillations in Power Systems) veya (Güç Sistemleri Esas olarak Kendiliğinden salınımları Analizi) [44, 45],
2. PEALS (Program for Eigenvalue Analysis of Large Systems) veya (Büyük Sistemlerin Özdeğer Analizi Programı) [44, 46].

İlk program ABD'de Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Institute, EPRI) sponsorluğunda geliştirilmiş ve 2000 baraları, 3600 hatları ve 350 jeneratörlere kadar olan sistemleri kullanabilme kabiliyetine sahiptir. İkinci program 12,000 baraları ve 1000 jeneratörlere kadar sahip sistemlerin işleme kapasitesi sahip olduğu iddia edilmiştir.

Her iki programın temel amacı, düşük frekanslı elektromekanik (rotor) modları hesaplamadır. Bu açıktır ki, büyük bir sistemde, sadece tüm özdeğerler ilgi çekmekte değildir. Ayrıca, tüm özdeğerlerin hesaplanması için çok büyük bir miktarda bilgisayar zamanı gerekiyor. Özdeğer hesaplanması için gerekli hesaplamaların sayısını  $n^3$  ile orantılıdır, burada  $n$  matrisin boyutudur. Bu nedenle sadece kritik özdeğerleri (imaginary eksenine yakın olan ve sistem çalışma koşulları, değiştirildiği zama sağ pozisyona geçmeye muhtemel olan) tespit edilmesi gerekmektedir.

Bir özdeğerin hesaplanması ve  $[A_T]$  matrise ait vektörü, doğrusal olmayan denklem setinin çözüm olarak görülebilir, ve Eş. 4.54'te verilmiştir

$$[A_T - \lambda_i I_n]v_i \quad (4.54)$$

Burada  $\lambda_i$  özdeğeridir ve  $v_i$  ona ilgili özvektörüdür.  $[I_n]$   $n$  order olan bir birim matrisidir.  $n$  tane denklemi,  $n$  bilinmeyenli  $\lambda_i$  ve özvektörün  $(n - 1)$  unsurları vardır. ( $v_i$  vektörün sıfırdan farklı bir unsur, 1.0 gibi keyfi olarak seçilebilir). Böylece, Eş. 4.54'in çözümü  $\lambda_i$  ve  $v_i$ 'yi belirler ve bu yük akışını çözümü ile denktir. Durum değişkenleri (ve özdeğerler) binlerce olsa da sadece birkaç kritik modların hesaplanması lazım olabilir.

Güç sistemlerinde sistem matrisin  $[A_T]$  oluşumu, aşağıdaki verilen genel denklemde durum dışı değişkenler  $Z$  ortadan kaldırılması olarak görülebilir

$$\dot{X} = [A]X + [B]Z \quad (4.55)$$

$$\underline{0} = [C]X + [D]Z \quad (4.56)$$

Bu denklemleri, sistemin karmaşıklığı bağımsız olduğu halde geçerlidir. Matrisler,  $[A]$ ,  $[B]$  ve  $[C]$  diagonal bloktur ve her bir blok bireysel dinamik cihazlarına karşılık gelir. Matrisi  $[D]$  ağ admitans  $[Y]$  'den elde edilir ve genellikle seyrektrir. Sistem matrisi  $[A_T]$  Eş. 4.55 ve 4.56'den Eş. 4.55'teki gibi elde edilir.

$$[A_T] = [A] - [B][D]^{-1}[C] \quad (4.57)$$

$[A_T]$  matrisi, Eş. 4.55 ve 4.56'nın sağ taraftaki seyrek olduğu matrislerine rağmen genellikle tamdır. Bir Özdeğeri ve özvektörü belirlenmesi için Eş. 4.58'deki gibi, denklemlerin ifade edilmesi uygundur.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A - \lambda_i I_n] & [B] \\ [C] & [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

burada  $X_i$   $\lambda_i$ 'ye ilgili özvektördür.

*Özdeğerin hesaplaması için iteratif şeması;*  $[A]$  matrisi diagonal bloktur. Eğer bir blokta kökeni olan bir özdeğerin hesaplaması isterseniz (dinamik bir cihaza bağlı, bir jeneratör demek), o zaman matris olarak bölünebilir

$$[A] = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_R \end{bmatrix}$$

burada R blokların kalanı (rest of the blocks) gösterilmiştir. Dikkat edin ki,  $[A_R]$  aynı zamanda  $[A]$  matrisine göre bir blok azaltılmış blokların sayısı ile diyagonal bir matrisidir. Eğer  $[A_I]$  klasik modeli bir jeneratöre ilgili ise, o zaman iki durum değişkenleri ( $\Delta S_{m1}$  ve  $\Delta \delta_1$ ) vardır ve  $[A_I]$  Eş. 4.9'daki gibi ifade edilebilir

$$[A_1] = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{2H_1} & -\frac{K_1}{2H_1} \omega_B \\ \omega_B & 0 \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

$$[B'] = [0][B_1], \quad [C'] = \begin{bmatrix} [0] \\ [C_1] \end{bmatrix}$$

bunlarını tanımlarken

$$[D'(\lambda_i)] = \begin{bmatrix} A_R - \lambda_i I_{nr} & B_2 \\ C_2 & D \end{bmatrix}$$

burada  $[B_1]$ ,  $[B_2]$ ,  $[C_1]$  ve  $[C_2]$  aşağıdaki verilen ifadelerinden tanımlanılır

$$[B] = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \quad [C] = [C_1 \quad C_2]$$

$\lambda_i$ 'yi Eş. 4.60'taki denklemin çözümü olarak ifade edilmesi mümkündür

$$\det[A_1 - B'D'^{-1}(\lambda_i)C' - \lambda_i I_{n_1}] = 0 \quad (4.60)$$

burada *det* determinant anlamını verir,  $I_{n_1}$ ,  $n_1$ (yani  $[A_1]$  boyutu aynı) tartibi (order) birim matrisidir. Ayrıca

$$n = n_1 + n_r$$

Eş. 4.60'yı  $\det[D'\lambda_i] \neq 0$  varsayımına dayalıdır.

Eş. 4.60'ın türetilmesi bölümlenmiş matrisler için Schur'un formülüne göre kaynaklanır, buna göre

$$\det[F] = \det[D] \cdot [A - BD^{-1}C] = \det[D - CA^{-1}B] \quad (4.61)$$

burada

$$[F] = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (4.62)$$

Schur'un formülü Eş. 4.58'de tanımlanan matrisi üzere tatbik edilir ve Eş. 4.63'teki gibi düzeltilmiş

$$\begin{bmatrix} A_1 - \lambda_i I_{n_1} & B' \\ C' & D'(\lambda_i) \end{bmatrix} \quad (4.63)$$

Eş. 4.58'i Eş. 4.64'e kadar azaltılabilir (yukarıdaki matrisi kullanılarak)

$$\lambda_i X_{i1} = [A_1 - B' D'^{-1}(\lambda_i) C'] X_{i1} \quad (4.64)$$

Eş. 4.64'te ifade edilen  $X_{i1}$  blok 1'de ( $A_1$ ) tanımlanan durum değişkenlerine ilgili  $X_i$  kümesinin alt kümesidir. İteratif teknik  $\lambda_i$  ve  $X_{i1}$ 'in ( $n_1 - 1$ ) elemanların çözümü için Eş. 4.64'te kullanılabilir. Özel bir durumda ( $n_1 = 1$ ), Eş. 4.63'teki denklemi Eş. 4.65'te skalar denkleme azaltılmış olarak ifade edilir

$$\lambda_i = A_1 - B' D'^{-1}(\lambda_i) C' \quad (4.65)$$

Yukarıdaki denklemi çözümlenin bir yolu, sabit bir noktası iterasyonun kullanılmasıdır

$$\lambda_i^{k+1} = A_1 - B' D'^{-1}(\lambda_i^k) C' \quad (4.66)$$

burada  $k$  iterasyonun sayısını gösterir. İlk tahmini  $\lambda_i$  ile başlayarak; tahmin iyileştirmek için yakınsamayı elde edilene kadar Eş. 4.66 kullanılabilir. Daha iyi bir iteratif şeması Newton yöntemine dayanmaktadır. Referans [47]'de Eş. 4.65'nin iteratif çözümü için AESOPS ve PEALS programlarında verilen özdeğerleri hesaplandığında sezgisel yaklaşımları yakınlştırılmasının Newton tipi algoritması dayalı olduğu gösterilmiştir. Daha iyi algoritmaları hızlı yakınsaması daha iyi yaklaşımlar temelinde mümkündür [44, 45].

*Selektif modal analiz* [48-50]: Selektif Modal Analiz (SMA) büyük güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılık analizi için seçilen modları çalışması için bir çerçevedir. Göz önünde modları, düşük frekanslı (0.1-2 Hz) salınımları içeren swing (rotor) modlarıdır.

SMA seçilen modlarda bağlı olarak sadece ilgili durum değişkenleri tutma ve kalanını (rest) ortadan kaldırma ile modeli azalma içerir. Örneğin, eğer sadece swing modları dikkate alınırsa, o zaman tüm makineler için kalıcı değişkenleri  $\delta$  (rotor açısı) ve  $S_m$  (kayma) vardır. Genel olarak, indirgenmemiş bir sistemi Eş. 4.67'deki gibi modellenebilir

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ z \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

burada vektör,  $r$  tutulan değişkenlerin vektörüdür. Bu özel durumda,

$$r^t = [\Delta\delta^t \quad \Delta S_m^t] \quad (4.68)$$

Eş. 4.67'yi Şek. 4.5'de gösterilen blok diyagramı ile temsil edilmektedir. Bu iki alt sistemleri, bir önemli ve diğer daha az önemli ve bunların etkileşimi gösterir. Daha az önemli dinamiklerin transfer fonksiyonu matrisi, Eş. 4.69 ile verilir

$$[H(s)] = A_2[sI - A_4]^{-1} A_3 \quad (4.69)$$

SMA prosedürü, tekrarlanan bir sistem modeli indirgenmesini içerir, az azaltılmış model ile başlar

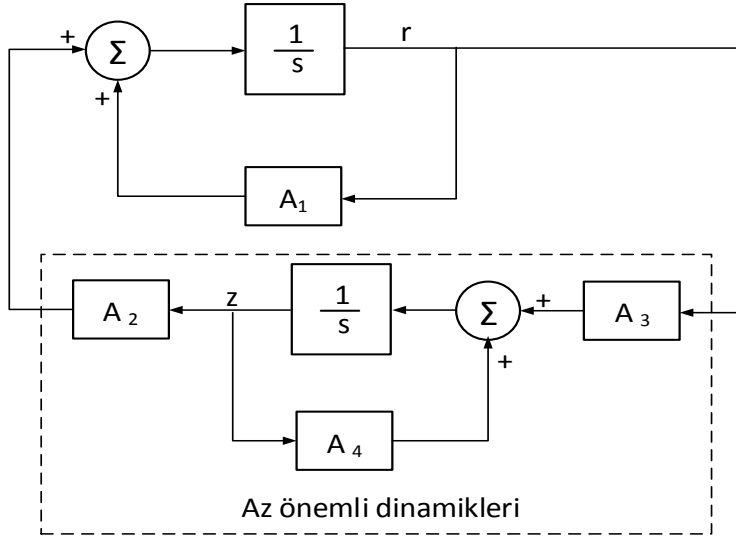
$$\dot{r} = [A_1]r = [A_r^0]r \quad (4.70)$$

İterasyonu  $k$  aşamada, dinamik bloğu  $[H(s)]$ , bir sabit kazanç matrisi  $[m^{k+1}]$  ile değiştirilir. Bu azaltılmış modelinde sonuçlanır,

$$\dot{r} = [A_1 + M^{k+1}]r = [A_r^{k+1}]r \quad (4.71)$$

$[M]$  başlangıç değeri boş matristir. Eğer  $m$ , azaltılmış modelinde ( $m \leq n_r$  burada  $n_r$ ,  $r$  vektörün boyutudur) kalan modların sayısı olsa, o zaman  $[M^{k+1}]$  Eş. 4.72'de sağlayabilmek için seçilir

$$[M^{k+1}][v_{r1}^k \quad v_{r2}^k \quad v_{rm}^k] = [H(\lambda_1^k)v_{r1}^k \quad \dots \quad H(\lambda_m^k)v_{r1}^k] \quad (4.72)$$



Şek. 4.6. Önemli ve daha az önemli alt sistemlerinin etkileşimi

burada  $v_{ri}$ , özdeğer  $\lambda_i$  ilgili sağ taraftaki özdeğervektörüdür. durum değişkeni vektör  $r$  ile tutulur. Eğer  $m=1$ , o zaman

$$[M^{k+1}]v_{r1}^k = [H(\lambda_1^k)v_{r1}^k]$$

bu ifade eder ki

$$[M^{k+1}] = [H(\lambda_1^k)] \text{ for } m = 1 \quad (4.73)$$

Özvektörleri bağımsız olduğu halde  $[M^{k+1}]$  için çözüm genel olarak var.  $m < n_r$  için sonsuz sayıda çok çözüm vardır. Bu durumlarda, çözüm  $[M^{k+1}]$  ve

$$[H(\lambda_i^k)], \quad i = 1, 2, \dots, m \text{ için}$$

arasında hataların normları toplamını en aza azaltılmış şekilde seçilebilir.

SMA prosedürün yakınsamayı önemli değişkenlerin seçimine bağlıdır. Bu göz önünde modu için değişkenlerin katılım (participation) faktörlerine dayalı olabilir.  $i$ 'inci modu, onun özdeğeri  $\lambda_i$  ve ilgili sağ ve sol özvektörler sırasıyla  $v_i$  ve  $w_i$  ile belirtilmiş olsun. Vektörler aşağıdaki şekilde normalize edilir:

$$\omega_i^t v_i = 1$$

Sistem modeli yanıtı;

$$\dot{x} = [A]x$$

şeklinde olur ve Eş. 4.74'deki gibi elde edilir

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i e^{\lambda_i t} \quad (4.74)$$

burada  $\alpha_i$ ,  $x(0)$  ile belirlenen sabitlerdir. Eş. 4.74'te denkleminin her iki tarafını  $\omega_i^t$  ile çarparak Eş. 4.75 elde edilir

$$\omega_i^t x(t) = \alpha_i (\omega_i^t v_i) e^{\lambda_i t} = \left( \sum_{k=1}^n [\omega_i(k) v_i(k)] \right) e^{\lambda_i t} \quad (4.75)$$

$\omega_i(t)$  ve  $v_i(t)$ ,  $i$ 'inci aşamında sağ ve sol özdeğer vektörün  $k$ 'inci girişleridir.  $i$ 'inci modunda  $k$ 'inci durum değişkeninin katılım faktörü  $P_{ki}$  Eş. 4.75 ile ifade edilir.

$$P_{ki} = \omega_i(k) v_i(k) \quad (4.76)$$

Yukarıda tanımlandığı özvektör normalleştirmenin bir sonucu olarak katılım faktörleri, durum değişkenleri arasında ve modları arasında her ikisi birlik olduğu için toplanır. Matematik olarak katılım faktörü  $P_{ki}$ ,  $\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}}$  hassasiyetidir, burada  $a_{kk}$   $[A]$  matrisinin  $k$ 'inci diagonal elemanıdır.

Katılım oranı  $\rho_i$ ,  $i$ 'inci modunda Eş. 4.77'deki gibi tanımlanır

$$\rho_i = \frac{\sum_r P_{ki}}{\sum_z P_{ki}} \quad (4.77)$$

burada numeratör ve denominatör toplamları,  $r$  ve  $z$  vektörlerin durum değişkenlerin katılım faktörlerini içerir.



## 5. OPTİMİZASYON VE SEZGİSEL ALGORİTMALAR

Verilen şartlar altında bir problemin en iyi değerinin elde edilme işlemine optimizasyon denir. Bir başka ifade ile ise,  $f(x)$  fonksiyonunun en büyük veya en küçük değerini, verilen şartları da sağlayarak elde etmektir. Oluşturulan bu probleme optimizasyon problemi denir. Optimizasyon problemleri temel olarak iki ana gruba ayrılır. Bunlar sürekli optimizasyon ve ayrık optimizasyondur. Sürekli optimizasyonda karar değişkenleri arama uzayında herhangi bir değeri alabilirler. Ancak ayrık optimizasyonda karar değişkenleri arama uzayında önceden tanımlanmış değerler alabilirler [51].

Doğrusal olmayan fonksiyonların optimizasyonunda kullanılan klasik matematiksel yöntemler, gerçekleşmesinde yazılımsal ve donanımsal bazı zorlukları da beraberinde taşıyan türev ifadeleri içerir. Optimizasyon hesapları içinde türev ifadelerinden kaçınmak ve nispeten daha basit ve kısa yazılımla, daha kısa sürede sonuca yakınsamak için ekosistemdeki canlıların doğal seçim davranışlarından esinlenen iterasyona dayalı optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Önceleri daha çok mutasyon, çaprazlama ve yeniden üreme gibi evrimsel bir takım operatörler içeren bu yöntemler daha sonra yerini, canlıların besin bulma davranışlarından yola çıkan popülasyon tabanlı, sürü zekasına dayalı optimizasyon algoritmalarına bırakmaya başlamıştır. Aşağıda, son yıllarda ortaya çıkan popülasyon tabanlı Ateş Böceği (Firefly Algorithm, FA) ve Yapay Arı Kolonisi algoritmaları açıklanmıştır.

### 5.1. Ateş Böceği Algoritması

Ateş böceği algoritması (firefly algorithm, FA) ilk olarak 2007 ve 2008 yılında Xin-She Yang tarafından yanıp sönme modelleri (flashing patterns) ve ateş böceklerinin davranışı dayalı bir optimizasyon algoritması şeklinde Cambridge Üniversitesinde geliştirilmiştir [52-54]. Esas olarak, FA'da şu üç idealize edilen kuralları kullanır:

- Ateşböceği unisexdir, böylece bir ateşböceği cinsiyeti ne olursa olsun kendine diğer ateş böceklerini çekebilir.
- Çekicilik, parlaklıkla orantılıdır ve aralarındaki mesafe arttıkça azalır.
- Böylece, her iki yanıp söner ateş böcekleri için, daha az parlak ateş böceği daha parlak

ateş böceği tarafına hareket edecek. Eğer daha parlak kimse yoksa, o zaman rastgele hareket edecek.

- Ateşböceğinin parlaklığı amaç fonksiyonun düzenlenmesi ile belirlenir.

Ateşböceği çekiciliği ışık şiddetine orantılı olduğu için yakın ateş böcekleri tarafından görülebilir. Çekiciliğinin değişimi  $\beta$  mesafe  $r$  Eş. 5.1 ile tanımlayabilir

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (5.1)$$

burada ifade edilen  $\beta_0$ ,  $r = 0$  olduğu halde çekiciliğidir.

daha çekici (parlaklı) ateşböceği  $j$  tarafına bir  $i$ 'inci ateşböceğin çekiciliğinin hareketi Eş. 5.2'deki gibi belirlenir

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j^t - x_i^t) + \alpha_t \epsilon_i^t \quad (5.2)$$

burada ikinci terim cazibesi nedeniyle olur. Üçüncü terim randomizasyon parametresi  $\alpha_t$  ile randomizasyondur ve  $\epsilon_i^t$  t zamanında bir Gauss dağılımı veya bir tekdüze dağılımdan çekilmiş rastgele sayıların vektörüdür.  $\beta_0 = 0$  ise, rastgele yürüyüş basit bir hale gelir. Diğer yandan,  $\gamma = 0$  ise, bu parçacık sürü optimizasyonunun bir varyantına azaltılır [52,53]. Ayrıca, randomizasyon,  $\epsilon_i^t$  kolayca L'evy uçuşları gibi diğer dağıtımlara uzatılabilir [52,53].

*Parametrelerin ayarlarını;*  $\alpha_t$  esasen rastgeleliği kontrol eder, bunun için iterasyon sırasında bu parametre ayarlanır, böylece yineleme sayacı t ile değişebilir. Yani  $\alpha_t$  ifade etmek için iyi bir yol Eş. 5.3'ün kullanılmasıdır.

$$\alpha_t = \alpha_0 \delta^t, \quad (0 < \delta < 1) \quad (5.3)$$

Burada  $\alpha_0$  başlangıç rastgele ölçekleme faktörü ve  $\delta$  esas bir soğutma faktördür. Bir çok uygulamalar için,  $\delta = 0,95 - 0,97$  kullanabilir [52,53].

Başlangıç  $\alpha_0$  ile ilgili olarak, simülasyonları gösterir ki: FA  $\alpha_0$ 'nın ilişki tasarım değişkenlerinin ölçeklemesi ile uygun olduğu halde daha verimli olacaktır.  $L$  ilgilenilen

sorunun ortalama ölçeği olsun, o zaman başlangıçta  $\alpha_0 = 0,01L$  ayarlanabilir. Faktörün 0,01 olması ile bu rastgele yürüyüşler hedefe ulaşmak için adımları dizi şeklinde olmalıdır [52, 54, 55].

Parametre  $\beta$  çekiciliğini kontrol eder, ve parametrik çalışmalar gösterir ki,  $\beta_0 = 1$  bir çok uygulama için kullanılabilir. Ancak, aynı zamanda  $\gamma$  ölçekleme  $L$  ile ilgili olmalıdır. Genel olarak,  $\gamma = 1/\sqrt{L}$  olarak ayarlanabilir. Ölçekleme değişimleri önemli değilse, o zaman  $\gamma = O(1)$  ayarlanabilir.

Çoğu uygulamalarda, popülasyon büyüklüğünü  $n = 15 - 100$ 'e kadar kullanabilir ve en iyi dizi  $n = 25 - 40$ 'a kadardır [52-54].

## 5.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Yapay arı kolonisi algoritması 2005 yılında Karaboğa tarafından, bal arısı kolonilerinin besin bulma davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş sürü zekasına dayalı bir optimizasyon algoritmasıdır [10, 56]. Algoritmada arılar, arama uzayındaki konumları ile ifade edilir. Arama uzayının boyutunu, çözüm içinde optimize edilecek parametrelerin sayısı belirler. Her bir arı, arama uzayında bir besin kaynağına bağlı olarak çalışır. Arıların buldukları konumlar, yani besin kaynakları aynı zamanda problemin olası çözümleridir. En iyi besin kaynağı, o besin kaynağının nekte miktarının ölçülmesi ile yani bir maliyet fonksiyonu kullanılarak uygunluk değerinin hesaplanması ile belirlenir. Arılar yeni konumlarını, bir önceki konumlarını ve önceki diğer en iyi besin kaynaklarının konumlarını dikkate alarak değiştirirler. Arama uzayında, arılar tarafından bulunan en uygun besin kaynağının konumu problemin çözümü olarak atanır.

Yapay arı kolonisini üç grup arı oluşturur. Bunlar; besin kaynaklarını tutan işçi arılar, besin kaynaklarını seçmek üzere işçi arıların dansını izleyen gözcü arılar ve rastgele arama yapan kaşif arılardır. İşçi arılar, belirlenen (limit) iterasyon sayısında değişme olmaz ise kaşif arılara dönüşür. Bu kaşif arılar, arama uzayında rastgele bir başlangıç konumuna geri döner ve arama işlemine bu konumda işçi arı olarak yeniden başlarlar. Popülasyonun yarısını işçi arılar, diğer yarısını da gözcü arılar oluşturur. Algoritmanın başlangıcında, işçi arılar yeni besin kaynakları bulurlar ve buldukları besin kaynaklarının uygunluklarını belirlemek üzere

maliyet fonksiyonu ile nektar miktarlarını ölçerler. Ardından, buldukları besin kaynağının komşuluklarında daha uygun yeni bir besin kaynağı aramaya başlarlar. Bir işçi arı, daha uygun yeni bir besin kaynağı bulduğu takdirde önceki kaynağı gözcü arılara devreder ve kendisi bu yeni besin kaynağını tutmaya başlar. Belli bir iterasyon sayısı kadar daha uygun yeni bir besin kaynağı bulamayan işçi arı bulunduğu besin kaynağını da bırakarak kâşif arıya dönüşür ve arama uzayında rastgele arama yapmaya başlar.

Gözcü arıların işçi arılardan besin kaynaklarını devralması, genel olarak olasılığa dayalı bir seçim işlemi ile gerçekleştirilir. Algoritmada, işçi arılar ve gözcü arılar yerel arama yaparken, kâşif arılar global arama yapar. Bu sayede, Yapay Arı Kolonisi algoritmasında yerel ve global arama yetenekleri birleştirilerek optimum sonuca yakınsama hızı artırılır. Yapay Arı Kolonisi algoritmasının algoritma adımları aşağıda belirtilmiştir.

*Başlangıç parametrelerinin belirlenmesi*

*Tekrarla*

*İşçi arıları besin kaynaklarına gönder ve nektar miktarlarını hesapla*

*Gözcü arıları besin kaynaklarına gönder ve nektar miktarlarını hesapla*

*Rastgele yeni besin kaynakları bulmaları için kâşif arıları gönder*

*O ana kadarki en iyi besin kaynağını hafızada tut*

*Kadar (Durdurma kriteri sağlanana kadar)*

Yapay Arı Kolonisi algoritmasında öncelikle başlangıç parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Algoritmanın avantajlarından birisi de parametre sayısının az olmasıdır. Başlangıçta belirlenmesi gereken üç adet parametre vardır. Bunlar;

- Besin kaynağı sayısı (İşçi arı sayısı): Her bir besin kaynağında yalnızca bir adet işçi arı bulunmaktadır. Dolayısı ile bu parametre toplam arı sayısının yarısını oluşturmaktadır.
- Limit: İşçi arıların kâşif arı olması için gerekli, gelişme olmayan iterasyon sayısıdır.
- İterasyon sayısı: Algoritmanın en fazla kaç adım çalıştırılacağını belirleyen parametredir.

Yapay Arı Kolonisi algoritması genel olarak dört işlem safhasından oluşur. Bunlar; başlangıç safhası, işçi arı safhası, gözcü arı safhası ve kâşif arı safhasıdır [10, 56, 57]. Bu

safhalar aşağıda açıklanmıştır.

*Başlangıç safhası*; Başlangıç safhasında işçi arılar rastgele olarak besin kaynaklarına gönderilir. Bu işlem, S adet besin kaynağı içeren  $X_{ij}$  matrisinin elemanlarının Eş. 5.4 ile rastgele atanmasıyla temsil edilir.

$$X_{ij} = X_j^{min} + \text{rand}(0,1) \cdot (X_j^{max} - X_j^{min}), \quad i = 1,2, \dots, S \text{ ve } j = 1,2, \dots, n \quad (5.4)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $i$  besin kaynağı indisini,  $j$  besin kaynağını yani çözümü oluşturan parametre indisini,  $X_j^{max}$  parametrelerin üst sınırını ve  $X_j^{min}$  ise parametrelerin alt sınırını göstermektedir [10, 56, 57].

*İşçi arı safhası*; Arılar, işçi arı safhasının başında  $X_{ij}$  matrisi ile belirtilen besin kaynaklarında bulunurlar. Bu safhada işçi arılar buldukları besin kaynaklarının komşuluğunda yeni besin kaynakları aramak ve bu kaynakların nektar miktarlarını ölçmekle yani uygunluk değerlerini hesaplamakla görevlendirilmişlerdir. Algoritmada, yeni besin kaynakları Eş. 5.5 ile tanımlanan  $V_{ij}$  matrisi ile belirtilmiştir. Eşitlikte  $X_{kj}$  rastgele seçilen bir besin kaynağını,  $j$  rastgele seçilen parametre indisini ve  $\varphi_{ij}$  [-a, a] aralığında rastgele seçilen adım katsayısını belirtmektedir.

$$V_{ij} = X_{ij} + \varphi_{ij}(X_{ij} - X_{kj}) \quad (5.5)$$

$V_{ij}$  matrisinin oluşturulmasının ardından, probleme göre tanımlanmış bir maliyet fonksiyonu ile bu yeni besin kaynaklarına ait uyum değerleri hesaplanır. Uyum değerleri, maliyet fonksiyonu ile belirlenen  $f_i(x_i)$  maliyet değeri kullanılarak Eş. 5.6 ile hesaplanır. İşçi arı safhasının sonunda, uyum değerleri hesaplanan besin kaynakları “açgözlü seçim (greedy selection)” adı verilen olasılıksal bir seçim işlemi ile gözcü arılara devredilir [10, 56, 57].

$$Uym_i(X_i) = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i(X_i)} & \text{eğer } f_i(X_i) \geq 0 \\ \frac{1}{1 + |(f_i(X_i))|} & \text{eğer } f_i(X_i) < 0 \end{cases} \quad (5.6)$$

*Gözcü arı safhası*; İşçi arıların dışında kalan iki grup arı vardır. Bu arılar gözcü arılar ve

kaşif arılardır. İşçi arılar, besin kaynaklarının nektar miktarlarını yani uyum değerlerini belirledikten sonra bu kaynakların konum ve nektar miktarı bilgilerini kovanda bekleyen gözcü arılarla paylaşırlar. Bu işlemin ardından gözcü arılar, işçi arıların paylaştığı konum ve nektar bilgilerine dayanarak, olasılıksal bir hesaplama ile kendilerine bir besin kaynağı seçerler. Bu seçme işlemi, işçi arılar tarafından sağlanan uyum değerlerini kullanarak hesaplanan olasılık değerlerine bağlı olarak yapılır. Bu amaçla, algoritmada rulet tekerleği seçim yöntemi kullanılmıştır (Eş. 5.6).

$$h_i = \frac{Uym_i}{\sum_{j=1}^{SN} Uym_j} \quad (5.7)$$

Eş. 5.7’de  $h_i$  gözcü arı tarafından besin kaynağının seçilme olasılığıdır. Uygunluk değerinin toplam uygunluk değerine oranı ile  $i$ ’inci besin kaynağının seçilme olasılığı belirlenmiş olur. Bir besin kaynağı gözcü arı tarafından seçilirken, 0 ile 1 arasında algoritma tarafından rastgele bir sayı üretilir. Besin kaynağının olasılığı bu değerden büyükse, o besin kaynağı gözcü arı tarafından seçilir. Küçükse, sıradaki besin kaynağına bakılır. Bu şekilde gözcü arıların tamamı bir besin kaynağı seçene kadar işlemlere devam edilir [10, 56, 57].

*Kâşif arı safhası*; Algoritma boyunca bazı besin kaynaklarının konumları o besin kaynağını bağlı olan işçi arılar tarafından geliştirilemez. Eğer bir besin kaynağı limit parametresi kadar iterasyonda geliştirilememiş ise bu besin kaynağındaki işçi arı kâşif arıya dönüşür ve arama uzayında rastgele bir başlangıç konumuna geri döner. Arama işlemine bu konumdan işçi arı olarak yeniden başlarlar [10, 56, 57].

## 6. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Benzetim çalışmaları iki model için yapılmıştır, ilk olarak tek makineli sonsuz güçlü bara TMSGB sistemi için ve ikinci olarak dört makineli iki bölgeli güç sistemi için.

### 6.1. TMSGB Sistemi için Benzetim Çalışmaları

Benzetim çalışmaları için esas alınan doğrusallaştırılmış güç sistem modelindeki  $K_1$ -  $K_6$  sabitlerinin hesaplanması Bölüm 3.3.2'deki eşitliklerde (Bkz. Eş. 3.77-3.88) verilmiştir. Bu çalışmada geleneksel güç sistemi dengeleyicisi ve PID tabanlı güç sistemi dengeleyicisi parametrelerinin optimizasyon için kullanılacak geleneksel güç sistemi dengeleyicisi parametre ( $K_{GSD}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_w$ ) ve iki durum için PID tabanlı güç sistemi dengeleyicisi parametre ( $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ ,  $T_w$ ) aralıkları Çizelge 6.1, 6.2 ve 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. geleneksel GSD parametre aralıkları

GSD Parametreleri	$K_{GSD}$	$T_1$	$T_2$	$T_w$
Alt Değer	1	1	0.2	0
Üst Değer	50	1,5	0,15	50

Çizelge 6.2. Durum-1 için PID-GSD parametre aralıkları

PID-GSD Parametreleri	$K_P$	$K_I$	$K_D$	$T_w$
Alt Değer	0	0	0	0
Üst Değer	50	50	20	50

Çizelge 6.3. Durum-2 için PID-GSD parametre aralıkları

PID-GSD Parametreleri	$K_P$	$K_I$	$K_D$	$T_w$
Alt Değer	0	0	0	0
Üst Değer	300	500	100	50

#### 6.1.1. Geleneksel güç sistemi dengeleyicisi

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

*Aşama 1:* Karakteristik eşitlikte bütün sönümlenmeleri  $\zeta_n = 0$  ihmal edersek

$$Ms^2 + \omega_b K_1 = 0 \quad (6.1)$$

Eş. 6.1'in çözümü

$$s = \pm \omega_n \quad (6.2)$$

ile doğal frekans elde edilir. Eş. 6.2'de

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\omega_b K_1}{M}} \quad (6.3)$$

olarak ifade edilir.

*Aşama 2:* Güç sistem dengeleyicisi işareti ile  $E'_q$  arasındaki faz gecikmesi Eş. 6.4 ile hesaplanır:

$$G_E = \frac{K_A K_3}{(1 + sT_A)(1 + sT'_{d0} K_3) + K_A K_3 K_6} \quad (6.4)$$

*Aşama 3:*  $\Delta\omega$  kontrol sinyali olarak kullanılır ise Eş. 6.5'in fazı ile Eş. 6.4'deki  $G_E$ 'nin faz açısı toplamı sıfırı vermelidir ( $\angle G_C + \angle G_E = 0$ ).

$$G_C = \left( \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^P \quad (6.5)$$

*Aşama 4:* Güç sistem dengeleyicisi kazancını hesaplayabilmek için Eş. 6.6 kullanılır:

$$K_{PSS} = \frac{2\zeta_n \omega_n M}{K_2 |G_C(j\omega_n)| |G_E(j\omega_n)|} \quad (6.6)$$

### 6.1.2. PID-GSD parametre ayarı

#### Amaç fonksiyonu

Çalışma koşulları ve güç sisteminin konfigürasyonu geniş bir aralığı üzerinde bir sistemin sönümünü artırmak için sağlam bir ayarlama yapılması gerekmektedir. Bu yüzden, GSD tasarımı bir özdeğer tabanlı amaç fonksiyonu ile edilmiştir. İki alt objektif fonksiyonunun özdeğerinin gerçek kısmı azaltılır ve sönümlenme faktörünün en yüksek değer alması sağlanır [4]. Bunları Eş. 6.7 ve 6.8 ile verilmiştir.

$$J_1 = \min[\text{gerçek}(\lambda_i): \lambda_i \in \text{salınımlı modları}] \quad (6.7)$$

$$J_2 = \max[\xi_i: \xi_i \in \xi \text{ of salınımlı modları}] \quad (6.8)$$

Burada  $\text{gerçek}(\lambda_i)$   $i$ 'inci elektromekanik modu özdeğerinin gerçek kısmı ve  $\xi_i$   $i$ 'inci elektromekanik modu özdeğerinin sönümlenme oranıdır.  $i$ 'inci kritik modunun sönümlenme oranı  $\xi_i$  Eş. 6.9 ile verilmiştir

$$\xi_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (6.9)$$

burada dikkate alınan özdeğeri  $\lambda_i = \sigma_i \pm \omega_i$  ile verilir. Bu nedenle, amaç fonksiyonu Eş. 6.10 ve 6.11 ile temsil edilebilir

$$J_1 = \sum_{i=1}^n (\sigma_0 - \sigma_i)^2 \quad (6.10)$$

$$J_2 = \sum_{i=1}^n (\xi_0 - \xi_i)^2 \quad (6.11)$$

burada  $\sigma_i \leq \sigma_0$  ve  $\xi_i \geq \xi_0$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Şek. 6.1 (a ve b)'de  $J_1$  ve  $J_2$  etkisi sırasıyla gösterilmiştir.  $\sigma_0$  ve  $\xi_0$  değerleri Ek-1'de verilmiştir. Birleşik amaç fonksiyonu  $J = J_1 + \alpha J_2$  ve aşağıdaki gibi ifade edilir.  $\alpha$  değeri 10 olarak kabul edilir.

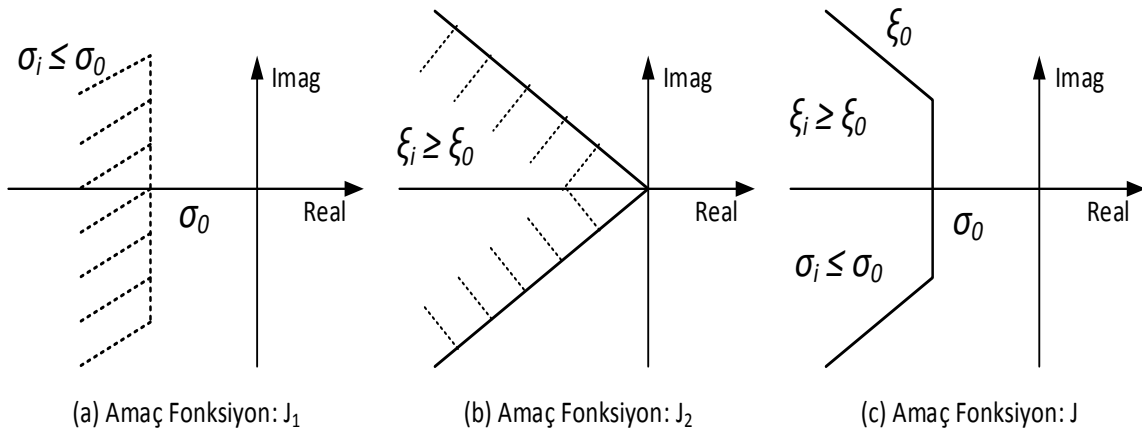
*Minimum* ( $J = J_1 + \alpha J_2$ )

$$K_P^{min} \leq K_P \leq K_P^{max}$$

$$K_I^{min} \leq K_I \leq K_I^{max} \quad (6.12)$$

$$K_D^{min} \leq K_D \leq K_D^{max}$$

$$T_w^{min} \leq T_w \leq T_w^{max}$$



Şek. 6.1 Amaç fonksiyonu İllüstrasyon.

Eş.5.12’de  $J = J_1 + \alpha J_2$  değerleri güç sistemine uygulanan bozucu (Tmech) etkilerinin algoritmada etkili olabilmesi için 5’inci saniyede eklenmiştir.

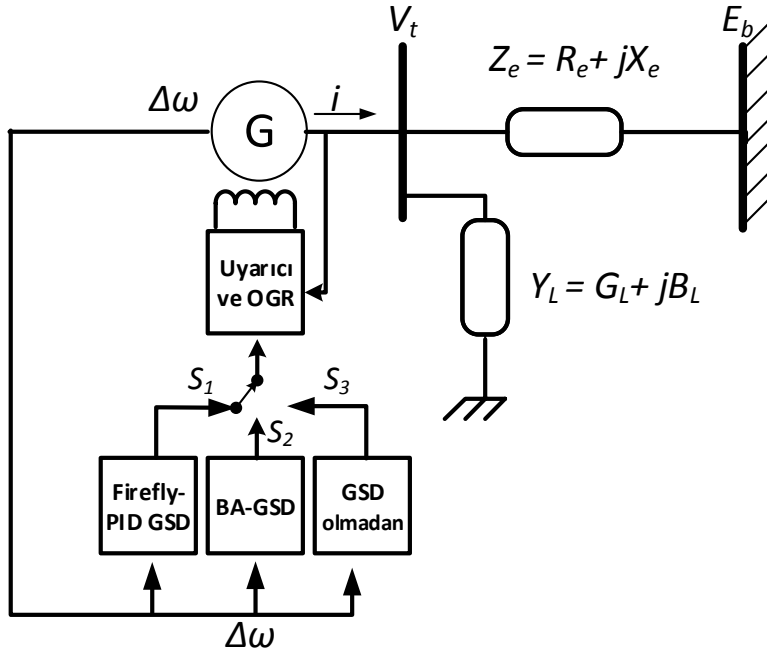
### 6.1.3. Deneysel durumların oluşturması

Tek makineli sonsuz güçlü bara sistemin modeli Şek. 3.5’teki gibidir ve sistemin dataları Ek-1’de verilmiştir. Jeneratör hızı GSD’nin girişi ve GSD’nin çıkışı OGR’ye referans gerilimin bağlantı noktasında giriş olacaktır. Test güç sistemi, gerçek gücün ( $P$ ) aralığı içinde ve Şek. 6.2’de olduğu gibi iletim hattının reaktansının aralığı içinde çalıştırılır. Bunları Eş. 6.13 ve 6.14’te verilmiştir.

$$0,4 \leq P_{g0} \leq 1,3 \quad (6.13)$$

$$0,2 \leq X_e \leq 0,5 \quad (6.14)$$

Güç sisteminin çalışma noktası yukarıdaki gibi tüm pratik çalışma koşullarını kapsar ve 133 farklı çalışma koşulların kümesi oluşturmaktadır. Burada, güç sistem analizi için, 133 koşuldan sadece 8 koşul Çizelge 6.4’te gösterildiği gibi zamana bağlı analiz için seçilmiştir. Çizelge 6.4’te bu sekiz koşulun; aktif güçleri, hat reaktansı (p.u.), ilgili Özdeğerleri, sönümleme oranları ve salınım frekansları verilmiştir. Kararlılık koşulu olduğu için tercih edilen sönümleme oranı  $> 0,1$  [58] ve özdeğeri s-düzleminin sol tarafında olmalıdır. Bu nedenle, 6-8 koşulları güç sisteminin kararsız durumunu temsil eder [59].



Şek. 6.2. Sistem konfigürasyonu ve GSD'ler ile tek makine sonsuz bara sistemi

Çizelge 6.4. GSD olmadan 1–8 elektro-mekanik modları için özdeğer, sönümlenme oranı ve salınımın frekans.

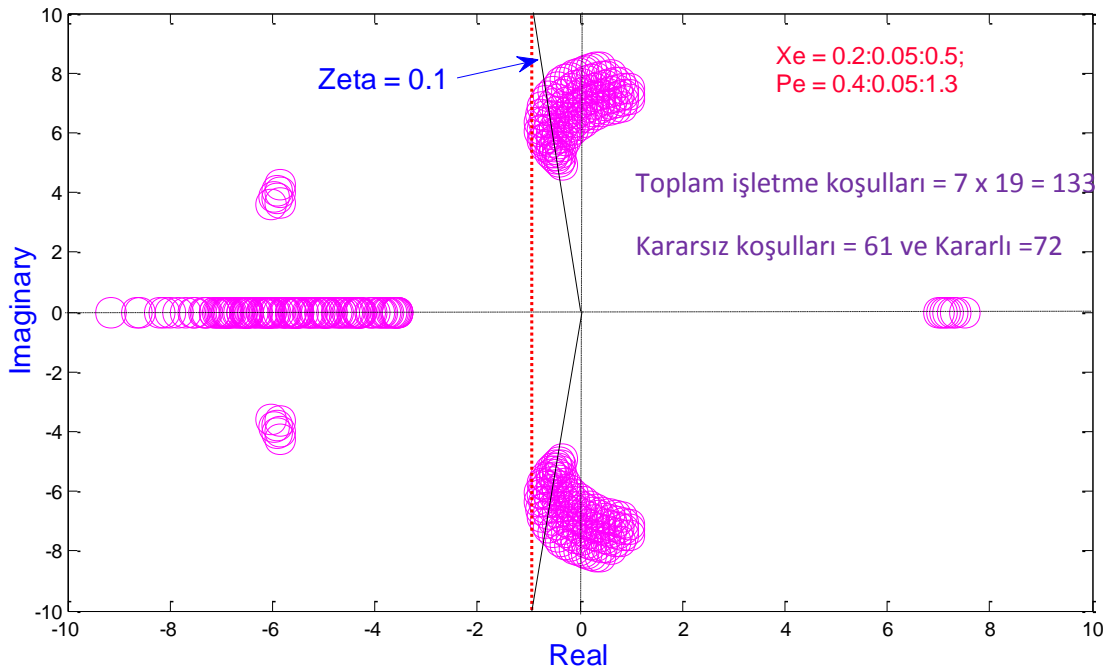
güç sistem modları	Aktif Güç	Hat Reaktans	Özdeğer	sönümlenme oranı	Frekans (Hz)
Koşul-1	0,50	0,20	$-0,7868 \pm 6,3423i$	0,1231	1,017
Koşul -2	0,50	0,40	$-0,4881 \pm 5,5579i$	0,0875	0,888
Koşul -3	0,75	0,20	$-0,5246 \pm 7,3978i$	0,0707	1,18
Koşul -4	0,75	0,40	$-0,1728 \pm 6,5099i$	0,0265	1,036
Koşul -5	1,0	0,20	$-0,1073 + 7,9336i$	0,0135	1,262
Koşul -6	1,0	0,40	$0,3906 + 7,0415i$	-0,0554	1,122
Koşul -7	1,2	0,40	$0,9185 + 7,8742i$	-0,1180	1,163
Koşul -8	1,3	0,20	$0,3979 + 8,2132i$	-0,0484	1,308

#### 6.1.4. Özdeğer analizi

##### GSD olmadan test sistemi

Bu bölümde, TMSGB güç sisteminin (133) koşullarının doğası gereği s-düzlemi üzerinde özdeğer grafiği kullanılarak analizi edilmesi gerekir. 0.05 adım büyüklüğü olduğunda Eş. 6.13 ve 6.14 ile tanımlanan toplam koşullar, sonuç olarak 133 olur. Açık döngü altında (GSD olmadan) bu koşullar için ilgili özdeğer Şek. 6.3'te gösterilmiştir.  $X_e$ 'nin değeri artırıldıkça ilgili özdeğer s-düzlemin sağ tarafa yerleştirir ve ayrıca güç artışından dolayı ilgili özdeğer de s-düzlemin sağ tarafına yerleştirir. Bu durumda, 61 koşullar nedeniyle ilgili özdeğeri s-

düzlemin sağ tarafında ve 72 koşullar nedeniyle ilgili özdeğeri s-düzlemin sol tarafındadır, yani bu gösterir ki 61 koşulları kararsız ve 72 koşulları kararlıdır. Kararsız ve kararlı operasyonu için detaylı işletme koşulları Çizelge 6.7’de kaydedilmiştir. Bir sistemin kararlılığı, elektromekanik modun özdeğeri S-düzlemin D-şekilli sektörüne yerleştirdiği zaman garanti edilebilir [16]. Bu nedenle, arzu edilen haritayı (grid) 0,1 gibi sönümleme oranı için ve maksimum özdeğer konumu şekilde çizilmiştir. Şek. 6.3’te gösterilmiş ki 61 koşulları kararsızdır çünkü, s-düzlemin D-şekilli sektöründe yer almadılar.



Şekil 6.3. GSD olmadan sistemin 133 işletme koşulunun özdeğerlerinin grafiği

#### FA ile PID-GSD ayarlı olan test sistemi

GSD olmadan test sistemi bölümünde açıklanmıştır, GSD olmadan 72 işletme koşulları kararlılığı sağlar ama, D-şekil sektöründe olmadığı için kararlılık kriterlerini garantili değildir. Bu nedenle, test sisteminin jeneratörüne PID tabanlı güç sistemi dengeleyicisi eklenmiştir ve FA ile parametrelerini özdeğer dayalı objektif fonksiyonu kullanılarak ayarlanmıştır. Optimize edilmiş kontrol birimi (Çizelge 6.5’teki gibi) ile donatılmış TMSGB sistemin özdeğer grafiği iki durum için Sek. 6.4 ve 6.5’te gösterilmiştir. Durum-1 için, 126 koşulların özdeğer grafikleri s-düzlemi D-şekilin sektöründe yer almıştır ve durum-2 için toplam 133 koşulların özdeğer grafikleri s-düzlemi D-şekilin sektöründe yer almıştır., FA-PID-GSD olan sistemin ikinci durum için modifiye edilmiş özdeğer, sönümleme oranı ve

frekans örnek koşullar (Çizelge 6. 4 'teki gibi koşul birden sekize kadar) için Çizelge 6.8'de verilmiştir. Bu açıktır ki, ne özdeğer gerçek kısmı pozitifdir ne de sönümlenme oranı  $<0,1$ , ayrıca, D-şekil sektöründe garantisine kararlılık şartı da sağlanmıştır.

Çizelge 6.5. FA ile PID-GSD parametrelerinin ayarı

Kontrolör	$K_P$	$K_I$	$K_D$	$T_w$
FA-PID-GSD, durum-1	22,0607	30,4979	4,0506	27,8732
FA-PID-GSD, durum-2: önerilen	198,0827	477,561	28,422	39,5729

### BA-GSD ile test sistemi

DK Sambariya, R Prasad tarafından önerilen BA-GSD olan test sistemi gerçekleştirilmiştir [16], ve özdeğer grafiği Şek. 6. 6'da gösterilmiştir. Test performansında, s-düzleminin sağ tarafında bulunan yedi koşulların özdeğeri yer almıştır, bunlar  $(3,7699 + 0,0000i, 3,7878 + 0,0000i, 3,8235 + 0,0000i, 3,7499 + 0,0000i, 3,7881 + 0,0000i, 3,8243 + 0,0000i$  and  $3.8583 + 0,0000i$  ile ilgili  $X_e = 0,4:0,05:0,5$  pu,  $P = 1,15: 0,05: 1,3$  pu), operasyonun kararsız modunu gösterir. Operasyon koşulların en az sayısı s-düzleminin D-şekil sektöründe yer almamıştır. Seçilen 8 örnek koşulların olduğundan BA-CPSS ile elde edilmiş özdeğer, sönümlenme oranı ve frekansı Çizelge 6.8'de gösterilmiştir. Çok sayıda sönümlenme faktörleri 0,1'den büyüktür ama 0,1'den küçük de vardır. Bu yüzden, FA-PID-GSD durum-2 (önerilen) olan TMSGB sistemin performansı BA-GSD olan TMSGB sistemin performansından daha iyidir [16].

Çizelge 6.6. BA ile GSD parametrelerinin ayarı: D.K. Sambariya, R. Prasad [16].

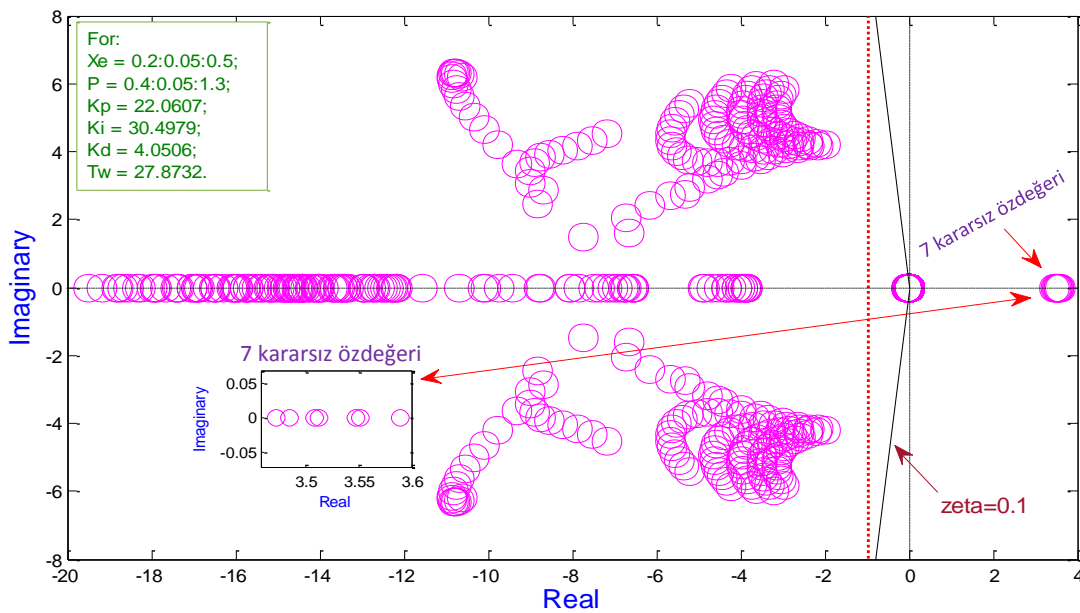
Kontrolör	Kazanç: $K_{GSD}$	Zero: $T_1$	Pole: $T_2$	$T_w$
BA-GSD: [16].	20,1405	0,3017	0,0200	10

Çizelge 6.7.GSD olmadan sistem, FA-PID-GSD sistem ve BA-GSD sistem için özdeğer tabanlı kararlı ve kararlı işletme koşulları

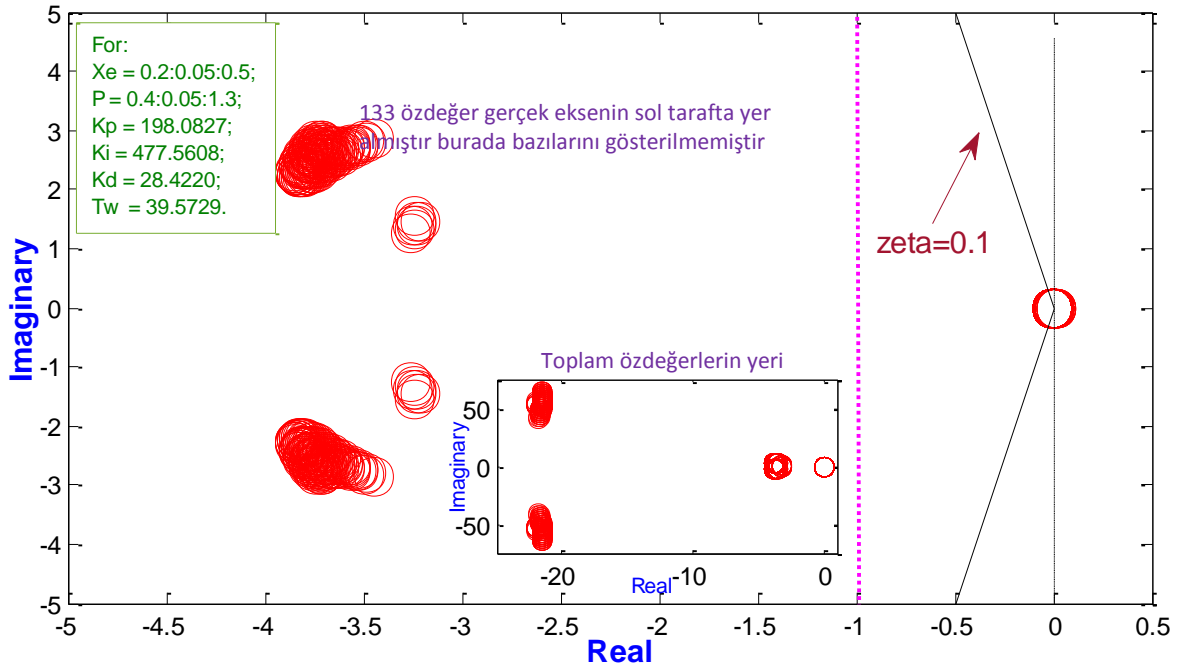
Xe	GSD olmadan TMSGB		BA-GSD [16]		TMSGB		FA-PID-GSD (durum-1) TMSGB		FA-PID-GSD (durum-2) TMSGB	
	Kararlı P	Kararsız P	Kararlı P	Kararsız P	Kararlı P	Kararsız P	Kararlı P	Kararsız P	Kararlı P	Kararsız P
0,20	0,40:0,05:1,05	1,10:0,05:1,3	hepsi	yük	hepsi	yük	hepsi	yük	hepsi	yük
0,25	0,40:0,05:0,95	1,10:0,05:1,3	hepsi	yük	hepsi	yük	hepsi	yük	hepsi	yük
0,30	0,40:0,05:0,90	0,95:0,05:1,3	hepsi	yük	hepsi	yük	hepsi	yük	hepsi	yük
0,35	0,40:0,05:0,85	0,90:0,05:1,3	hepsi	yük	hepsi	yük	hepsi	yük	hepsi	yük
0,40	0,40:0,05:0,80	0,85:0,05:1,3	0,40:0,05:1,25	1,3	0,40:0,05:1,251	1,3	hepsi	yük	hepsi	yük
0,45	0,40:0,05:0,75	0,80:0,05:1,3	0,40:0,05:1,20	1,25:0,05:1,3	0,40:0,05:1,20	1,25:0,05:1,3	hepsi	yük	hepsi	yük
0,50	0,40:0,05:0,75	0,80:0,05:1,3	0,40:0,05:1,10	1,15:0,05:1,3	0,40:0,05:1,10	1,15:0,05:1,3	hepsi	yük	hepsi	yük
<b>koşulları</b>	<b>72</b>	<b>61</b>	<b>126</b>	<b>07</b>	<b>126</b>	<b>07</b>	<b>133</b>	<b>0</b>		

Çizelge 6.8. İşletme örnek koşul 1–8 için FA-PID-GSD (durum-1, 2) ve BA-GSD [16] elektro- mekanikal modların özdeğer, sönümleme oranı ve salınım frekansı

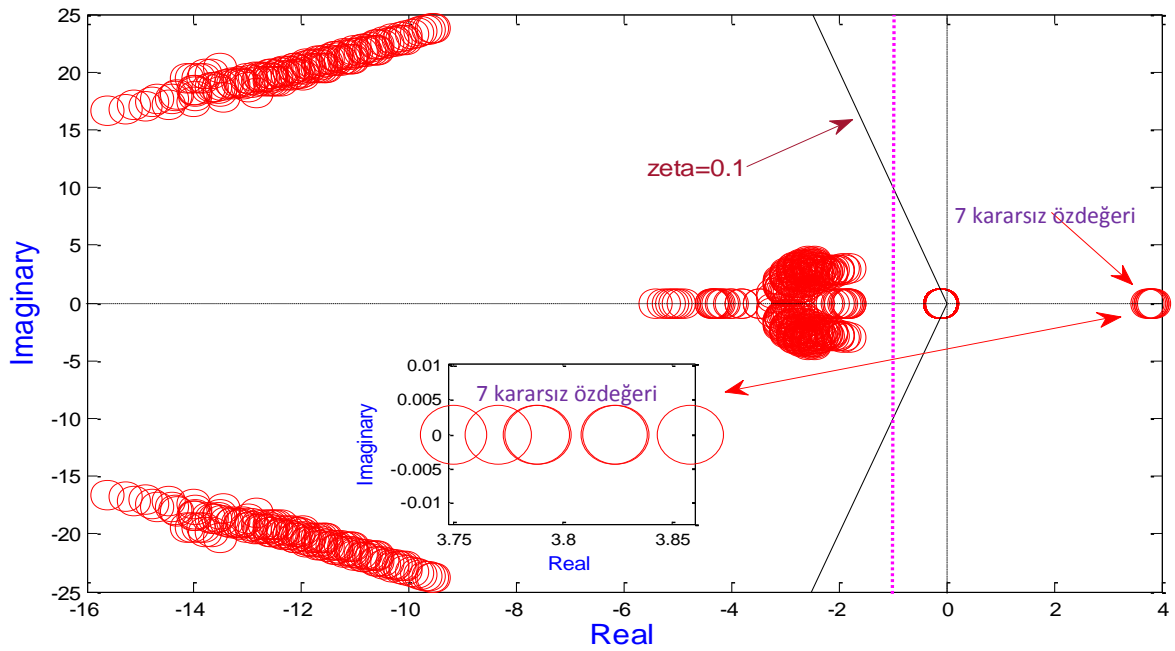
Güç system Model	GSD Model	Özdeğer	Sönümleme Factor	Frekans, Hz
Koşul-1	FA-PID-GSD (durum-1)	$-6,6519 \pm 1,6219i$	0,9715	0,2581
	FA-PID-GSD (durum-2)	$-3,7521 \pm 2,2929i$	0,8533	0,3649
	BA-GSD	$-11,9730 \pm 19,9935i$	0,5138	3,1821
Koşul -2	FA-PID-GSD (durum-1)	$-2,8679 \pm 4,1851i$	0,5653	0,6661
	FA-PID-GSD (durum-2)	$-3,6043 \pm 2,6572i$	0,8049	0,4229
	BA-GSD	$-13,9794 \pm 18,257i$	0,6079	0,4101
Koşul -3	FA-PID-GSD (durum-1)	$-10,3483 \pm 5,0280i$	0,8995	0,8002
	FA-PID-GSD (durum-2)	$-3,8116 \pm 2,2164i$	0,8645	0,3528
	BA-GSD	$-10,6369 \pm 22,3621i$	0,6492	2,9057
Koşul -4	FA-PID-GSD (durum-1)	$-3,7428 \pm 4,5367i$	0,6364	0,7220
	FA-PID-GSD (durum-2)	$-3,7095 \pm 2,5946i$	0,8194	0,4129
	BA-GSD	$-12,5598 \pm 19,823i$	0,5352	3,7348
Koşul -5	FA-PID-GSD (durum-1)	$-10,8513 \pm 6,1431i$	0,8702	0,9777
	FA-PID-GSD (durum-2)	$-3,8410 \pm 2,2321i$	0,8646	0,3552
	BA-GSD	$-9,9509 \pm 23,3392i$	0,3922	3,1549
Koşul -6	FA-PID-GSD (durum-1)	$-3,9757 \pm 5,2319i$	0,6050	0,8327
	FA-PID-GSD (durum-2)	$-3,7533 \pm 2,6496i$	0,8169	0,4217
	BA-GSD	$-11,8569 \pm 20,3102i$	0,5042	3,2325
Koşul -7	FA-PID-GSD (durum-1)	$-3,9671 \pm 5,2309i$	0,6043	0,8325
	FA-PID-GSD (durum-2)	$-3,7527 \pm 2,6507i$	0,8168	0,4219
	BA-GSD	$-11,8649 \pm 20,306i$	0,5045	3,2318
Koşul -8	FA-PID-GSD (durum-1)	$-10,6095 \pm 6,1806i$	0,8641	0,9837
	FA-PID-GSD (durum-2)	$-3,8532 \pm 2,3083i$	0,8578	0,3674
	BA-GSD	$-9,5374 \pm 23,7947i$	0,3720	3,7870



Şekil 6.4. FA-PID-GSD olan sistemin durum-1 için 133 işletme koşulunun özdeğerlerinin grafiği.



Şekil 6.5. FA-PID-GSD olan sistemin durum-2 için 133 işletme koşulunun özdeğerlerinin grafiği



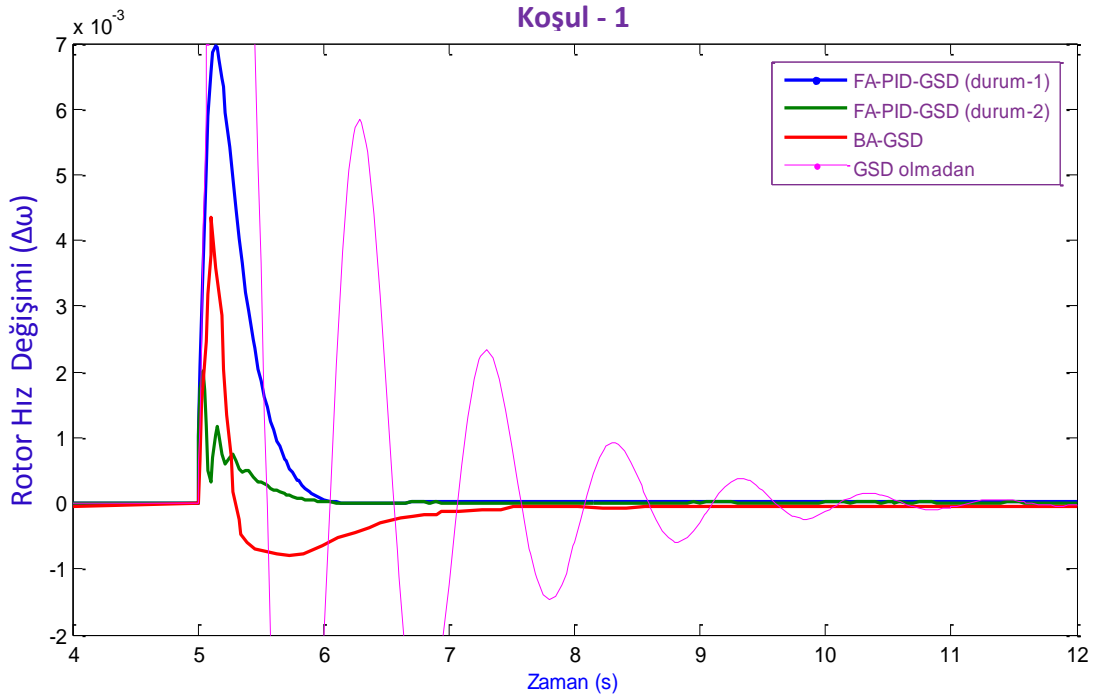
Şekil 6.6. BA-GSD olan sistemin 133 işletme koşulunun özdeğerlerinin grafiği.

### 6.1.5. Benzetim sonuçları ve hız tepkisi analizi

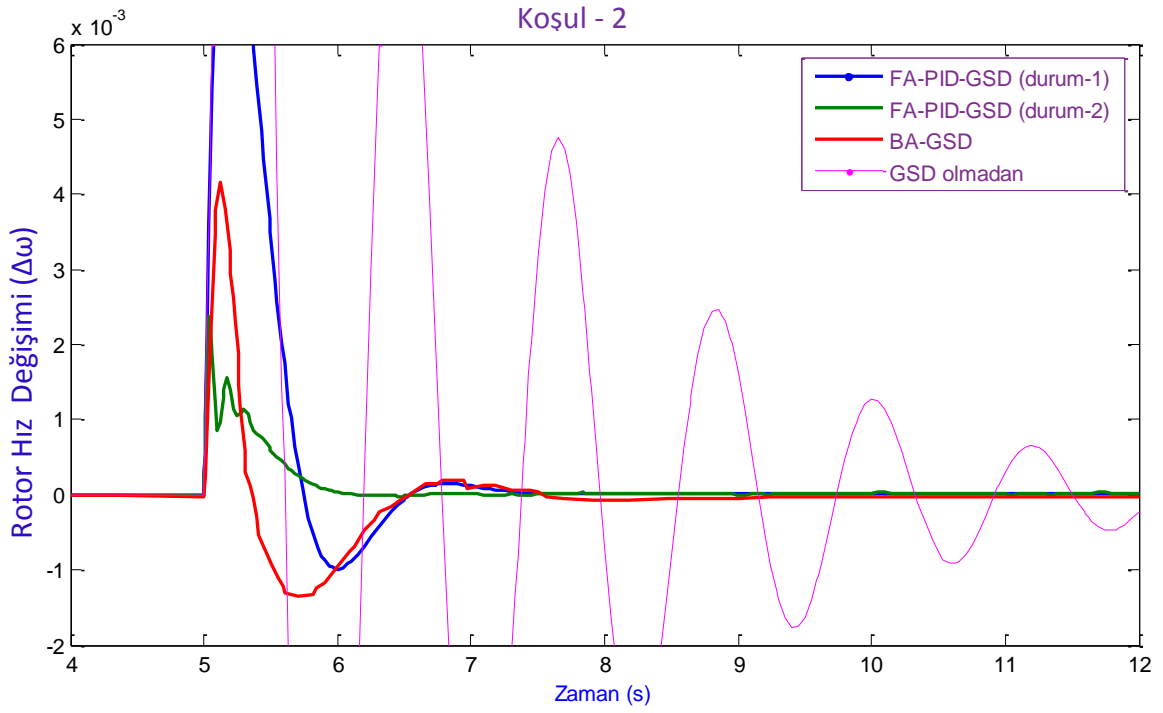
Sekiz, seçilen işletme koşulları için TMSGGB sisteminin hıza olan tepkisi benzetim ile belirlenir ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

1. GSD olmadan jeneratör.
2. BA-GSD ile donatılmış jeneratör [16]'taki gibi.
3. FA-PID-GSD ile donatılmış jeneratör, durum-1.
4. FA-PID-GSD ile donatılmış jeneratör, durum- 2.

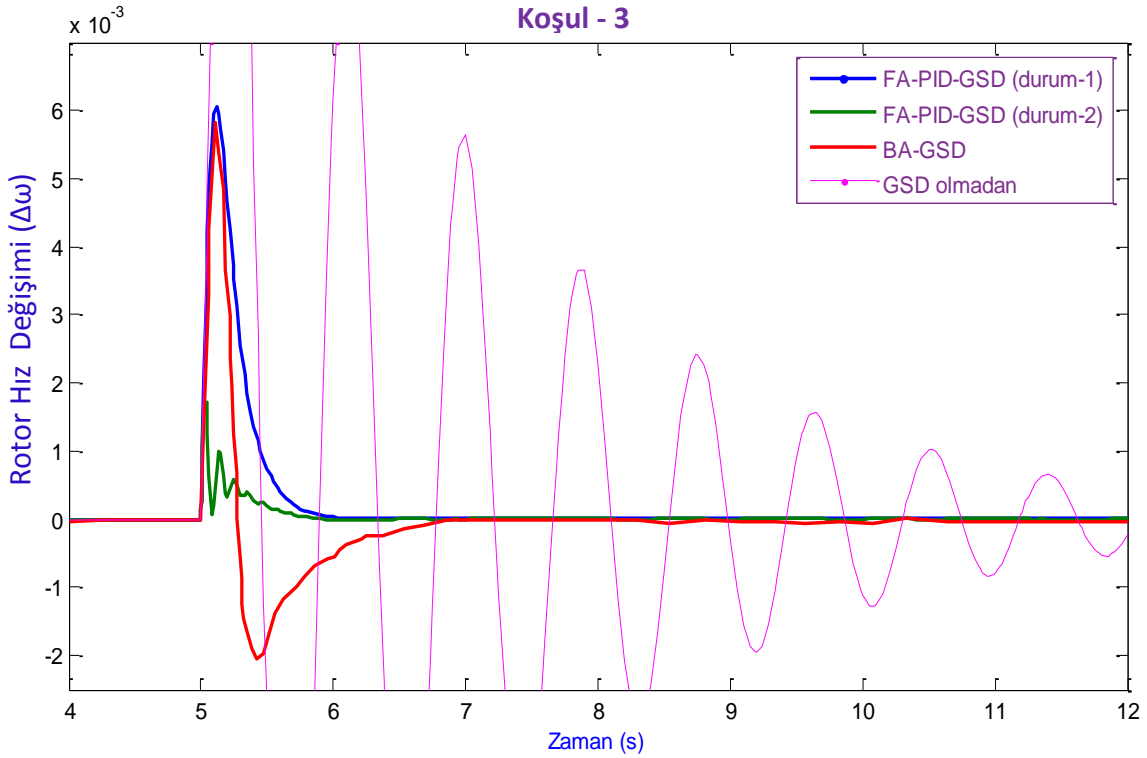
Seçilen işletme koşullarında (işletme koşulları 1-8) dört test sistemi için hız tepkilerinin karşılaştırılması sonuçları Şek. 6.7-6.14'te gösterilmektedir. Buna göre, BA-GSD tabanlı TMSGB sistemi tüm işletme koşulları için hız tepkisi kararlılığı karşı yeteneğine sahiptir. Fakat FA-PID-GSD durum-1 ve 2'ye göre yüksek değer aşımı (overshoot) ve uzun yerleşme zamanı (settling time) olduğu gözlenmiştir. Sadece işletme örnek koşul 7'inci halde FA-PID-GSD durum-1 hız tepkisine karşı kararsızdır. Dört test sistemi için elde edilmiş yerleşme zamanı ve değer aşımı Çizelge 6.9'da verilmiştir. FA-PID-GSD (durum-2) olan sistemin salınımları tüm işletme koşullar için diğer test sistemlerine göre daha hızlı söndürülür ve diğerlerine göre hız sapması eğrisinin değer aşımı daha azdır. Özdeğer analizine göre, 7 kararsızlık işletme koşullarından dolayı, sonuçlar BA-GSD ile ve hemde FA-PID-GSD (durum-1) ile gösterilmiştir ama FA-PID-GSD (durum-2) ile hiçbir kararsızlık yoktur.



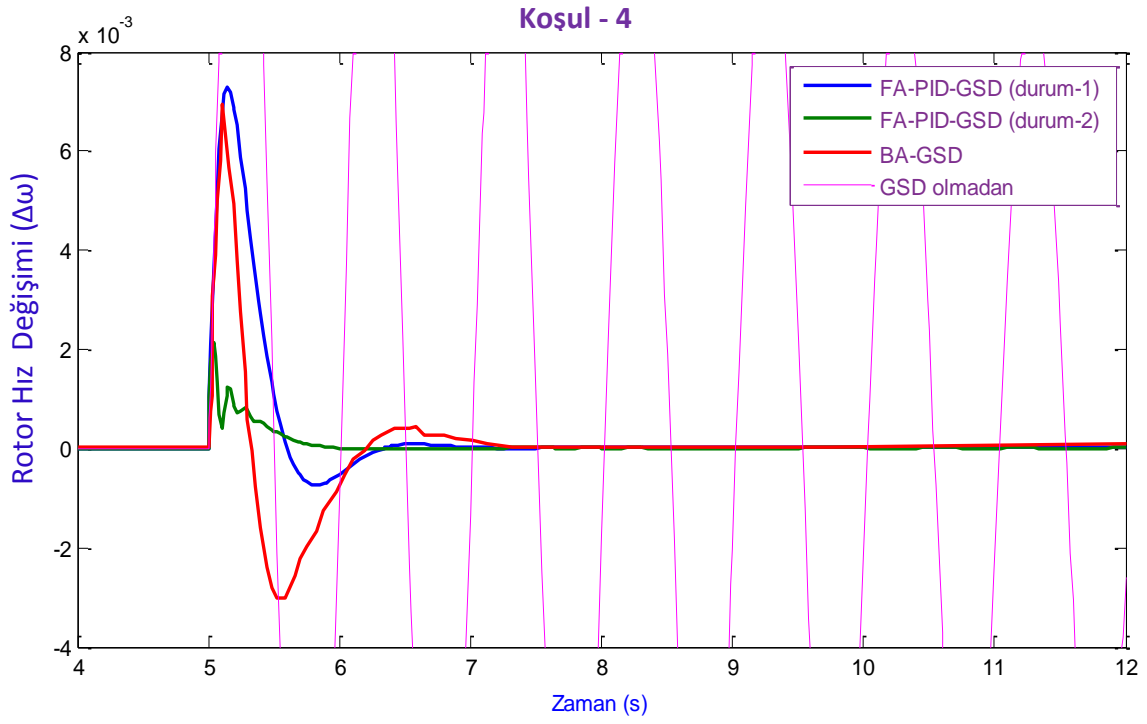
Şekil 6.7. Koşul-1 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi.



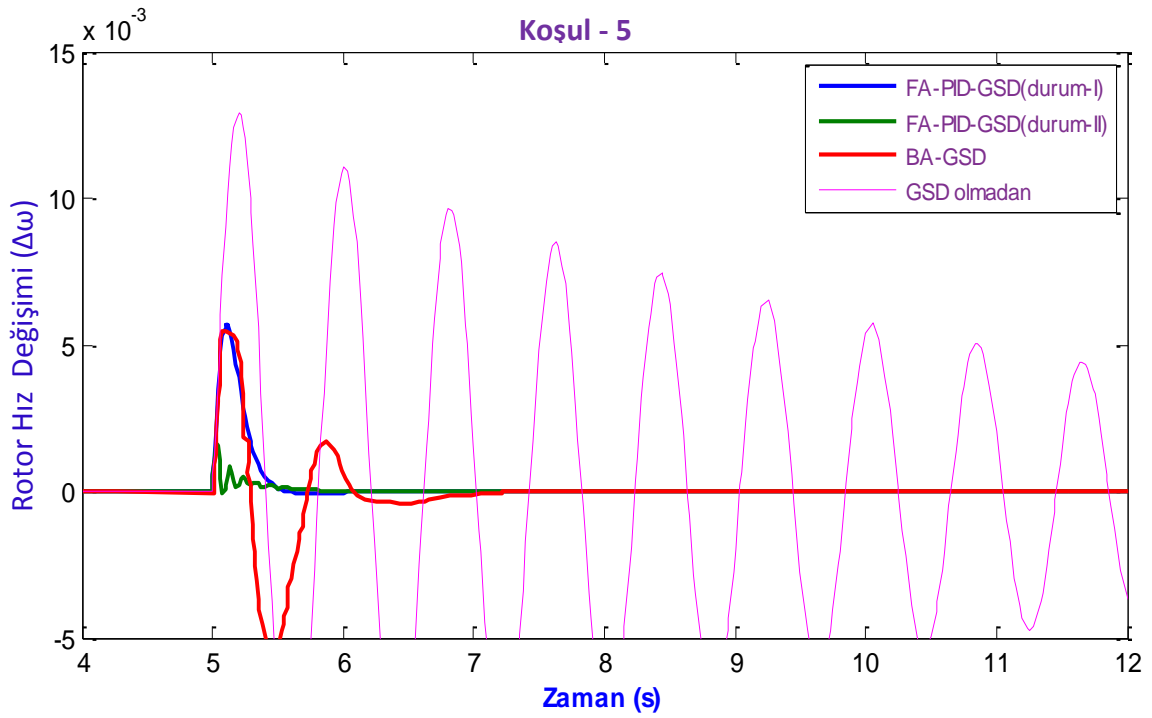
Şekil 6.8. Koşul-2 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi.



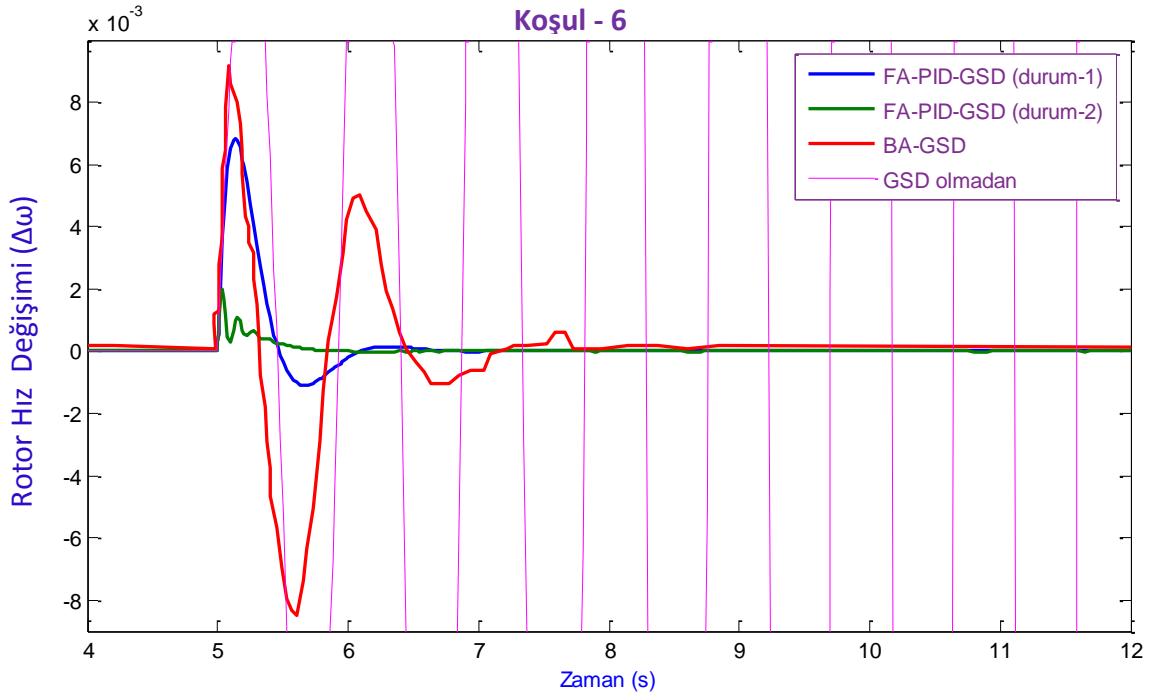
Şekil 6.9. Koşul-3 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi.



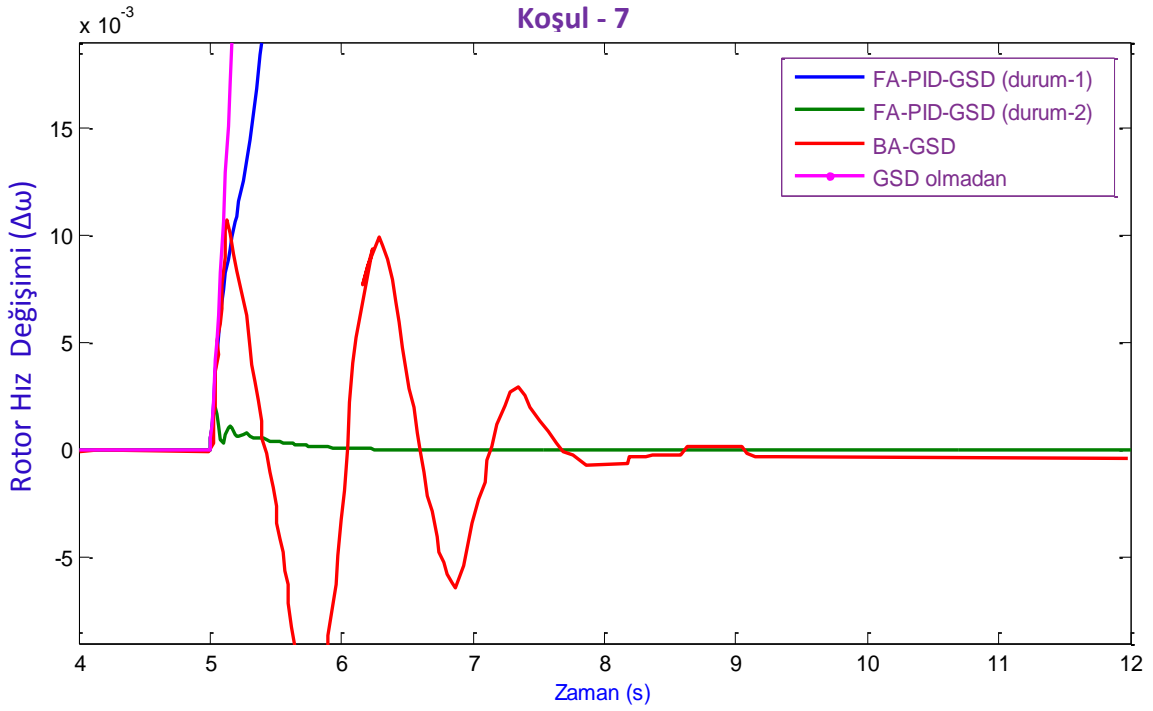
Şekil 6.10. Koşul-4 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi.



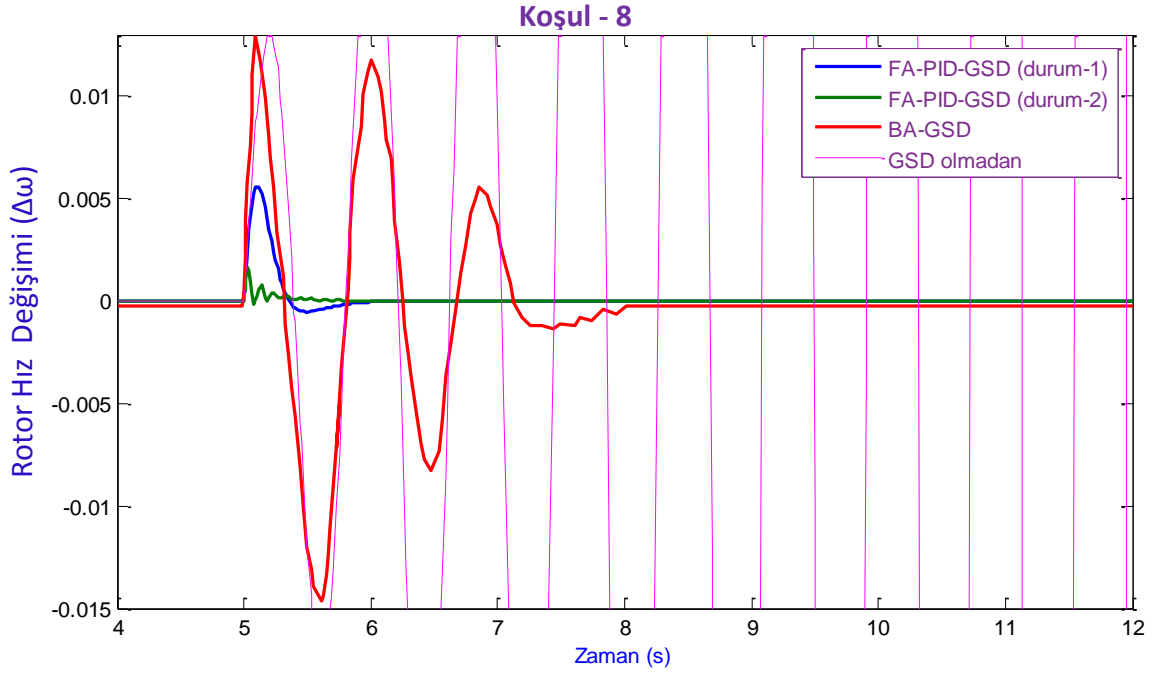
Şekil 6.11. Koşul-5 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi.



Şek. 6.12. Koşul-6 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi.



Şekil 6.13. Koşul-7 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi.



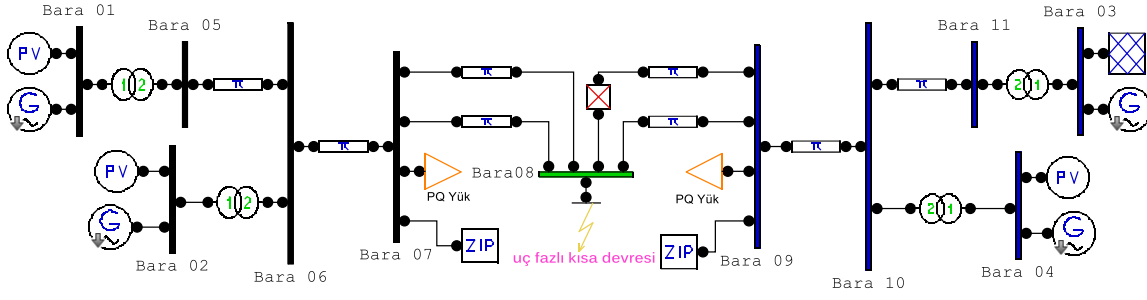
Şekil 6.14. Koşul-8 için GSD olmadan, FA-PID-GSD (durum-1, 2) olan ve BA-GSD olan TMSGB sistemin rotor hız tepkisi.

Çizelge 6.9. FA-PID-GSD (durum- 1, 2) ve BA-GSD [16] ile hız tepkisi için yerleşme zamanı ve değer aşımı

Güç sistem Model	FA-PID-GSD (durum-2)		FA-PID- GSD (durum-1)		BA-GSD [16]		GSD olmadan	
	yerleşme süresi	değer aşımı	yerleşme süresi	değer aşımı	yerleşme süresi	değer aşımı	yerleşme süresi	değer aşımı
Koşul- 1	1,06 (s)	0,002013	1,06 (s)	0,006957	2,72 (s)	0,004355	10,0 (s)	0,01592
Koşul- 2	1,10 (s)	0,002382	2,39 (s)	0,008515	2,39 (s)	0,004150	>12 (s)	0,01788
Koşul- 3	0,95 (s)	0,001722	0,95 (s)	0,006046	2,28 (s)	0,005828	>12 (s)	0,01397
Koşul- 4	1,00 (s)	0,002123	1,35 (s)	0,007306	2,30 (s)	0,006939	salınımlı	artan
Koşul- 5	1,14 (s)	0,001638	1,14 (s)	0,005671	2,42 (s)	0,005487	salınımlı	artan
Koşul- 6	0,94 (s)	0,001994	1,60 (s)	0,009859	2,46 (s)	0,00934	salınımlı	artan
Koşul- 7	0,94 (s)	1,30	kararsız	kararsız	4,02 (s)	0,01069	kararsız	kararsız
Koşul- 8	0,90 (s)	0,001629	1,25 (s)	0,005570	3,31 (s)	0,01335	salınımlı	artan

## 6.2. Dört Makine iki Bölge Sistemi için Benzetim Çalışmaları

Önerilen yöntemi değerlendirmek için Şek. 6.15'teki gibi dört makine iki bölge elektrik güç sistemi dikkate alınmıştır [22]. Bu çalışmada hesaplama süresini azaltmak için, makinelerin her GSD için zaman sabitleri  $T_w = 10$  ve  $T_2$  ve  $T_4$ , 0,01 olarak makul bir değerde olduğu sabit kabul edilmiştir [4, 60]. Güç sistemi dengeleyici parametrelerinin optimizasyon için kullanılacak geleneksel güç sistemi dengeleyicisi parametre  $1 \leq K_{GSD} \leq 100$ ,  $0,01 \leq T_{1i} \leq 1$  ve  $0,01 \leq T_{3i} \leq 0,5$  aralıkları civarındadır. Ayrıca,  $\alpha = 10$ ,  $\sigma_0 = -1,5$  ve  $\xi_0 = 0,2$ .



Şekil 6.15. Dört jeneratör iki bölge güç sistemi

### 6.2.1. Sezgisel yöntemler ile GSD parametre ayarı

Bu çalışmada, sezgisel yöntemlere dayalı optimizasyon algoritmaları ile güç sisteminin rotor açılabilirliği MATLAB programında güç sistem analizi toolbox (Power System Analysis toolbox, PSAT) simülasyon çalışmaları ile incelenmiştir.

PSAT elektrik güç sistemleri analizi ve benzetimini yapan ve birçok işletim sisteminde çalışan bir matlab uygulamasıdır. Tüm işlemler grafik arabirimi (GUI) ile görsel bir şekilde uygulanabilirken ayrıca simulink tabanlı kütüphane uygulamaları da sistem tasarımı için kolay kullanım imkanı sağlamaktadır. Bu programın yapabildiği ana işler, yük akışı, sürekli yük akışı, optimal yük akışı, küçük işaret kararlılık analizi, zaman domeni benzetimi, fazör ölçüm birimi yerleşimi (PMU), FACTS modelleri, rüzgar türbin modelleri bir ara yüz ile sunulmaktadır. Bu programın geliştirilmesi ve kullanım kısıtlamaları olmaması, açık kaynak kodlarına ulaşım imkanının olması ve bu nedenle eğitim ve araştırmaya açık olması son yıllarda kullanımını oldukça arttırmıştır [26, 61, 62].

Güç sisteminde oluşan küçük bozucu etkilerinin sönümlemesi amacı ile sisteme eklenen GSD'lerin parametreleri ( $K_{GSD}$ ,  $T_1$  ve  $T_3$ ) ABC tabanlı algoritmalar ile normal yük durumunda ayarlanmıştır ve Çizelge 6.12'de gösterilmiştir. ABC algoritmalarının kullandığı amaç fonksiyonu bölüm 6.1.2'de verilmiştir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\text{Minimum} (J = J_1 + \alpha J_2)$$

$$K_{GSD}^{\min} \leq K_{GSD} \leq K_{GSD}^{\max}$$

$$T_{1i}^{\min} \leq T_{1i} \leq T_{1i}^{\max}$$

$$T_{3i}^{\min} \leq T_{3i} \leq T_{3i}^{\max}$$

Burada  $J = J_1 + \alpha J_2$  değerleri, güç sistemine uygulanan bozucuların (1 – 1.05 saniye süresi için 8 nolu barada uç fazlı kısa devresi ve 1,05 saniyesinde 8’inci ve 9’uncu baralar arasında hattın kapatılması) etkilerinin algoritmada etkili olabilmesi için eklenmiştir. GSD’leri parametre ayarları için özdeğer tabanlı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. ABC algoritma için kullanılan değişkenler Çizelge 6.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 6.10. ABC algoritmasında kullanılan değişkenler

Parametre Sayısı	Popülasyon Büyüklüğü	İterasyon Sayısı	Hedef Hata	Alt Değer	Üst Değer	Limit Değeri
3, 6, 9, 12	12	20	$10^{10}$	[1, 0,01, 0,01]	[50, 1, 0,5]	4

Bu çalışmada güç sisteminin üç farklı çalışma durumlarından hafif, normal ve ağır durumlar çizelge 6.11’de gösterilmiştir.

### 6.2.2. Çok makineli GSD parametre ayarı ve benzetim çalışmaları

Bütün çalışmalar için Çizelge 6.11’deki yük durumları dikkate alınmıştır. Durum 1-3’e kadar olan çalışmalar OGR ve TG olmadan, OGR ve TG olduğu halde, bir ABC tabanlı GSD, iki ABC tabanlı GSD, üç ABC tabanlı GSD ve önerilen dört ABC tabanlı GSD’yi kapsamaktadır. Benzetim çalışmalarında kullanılan optimizasyon algoritmalarının yazılım kodları MATLAB ile yazılmıştır. Bu algoritmalara ait yazılım kodları algoritması EK-3’de verilmiştir.

Çizelge 6.11. Test için güç sistemin yük durumları

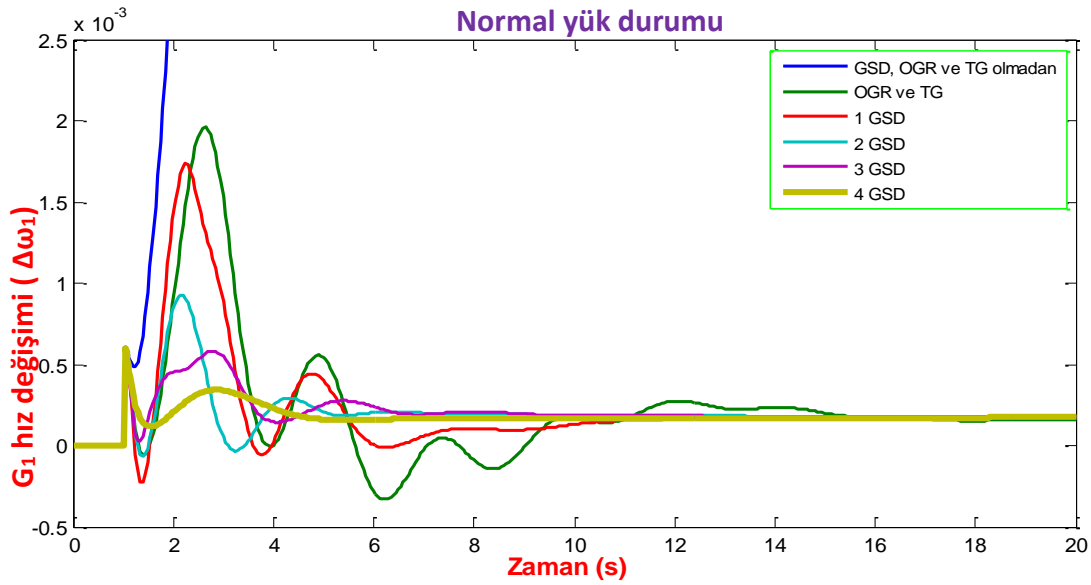
Hafif yük	Nominal yük	Ağır yük
Toplam aktif gücünde %20 düşüş	Nominal aktif güç	Toplam aktif gücünde %20 artış
Toplam reaktif gücünde %15 düşüş	Nominal reaktif güç	Toplam reaktif gücünde %15 artış

Çizelge 6.12. ABC ile GSD parametrelerinin ayarı

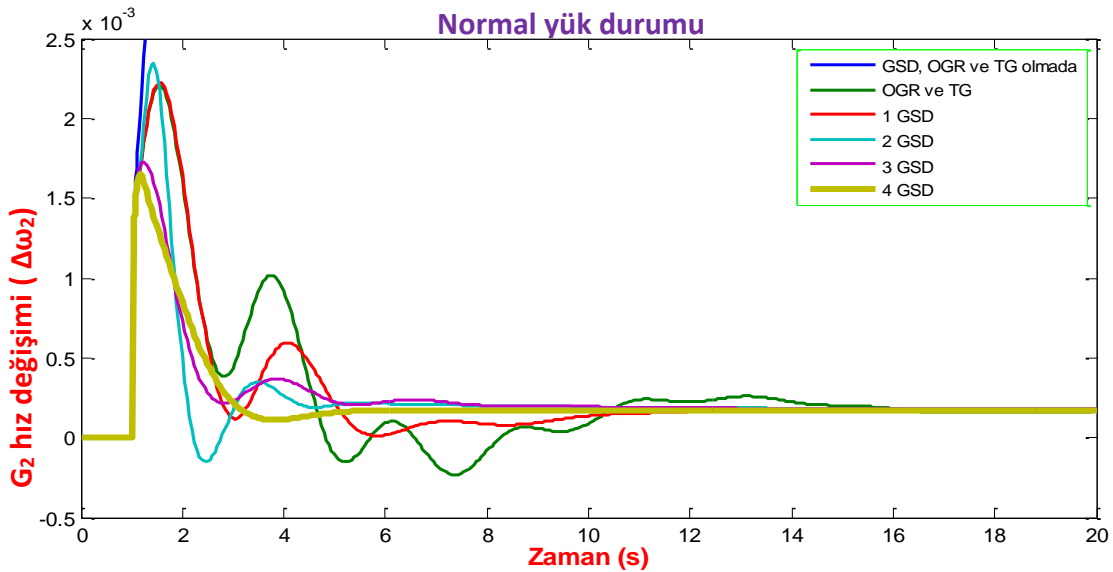
Kontrolör	Jeneratör	$K_{GSD}$	$T_1$	$T_3$
Bir ABC-GSD	$G_3$	42,4875	0,5412	0,0785
İki ABC-GSD	$G_2$	50	0,001	0,1225
	$G_3$	50	0,0207	0,3627
Üç ABC-GSD	$G_1$	26,5724	0,185	0,0991
	$G_2$	38,3099	0,0113	0,0317
	$G_3$	3,5153	0,6542	0,18
Dört ABC-GSD	$G_1$	50	0,3041	0,054
	$G_2$	55	0,3762	0,0837
	$G_3$	62	0,1401	0,1026
	$G_4$	50	0,3041	0,054

## Durum 1

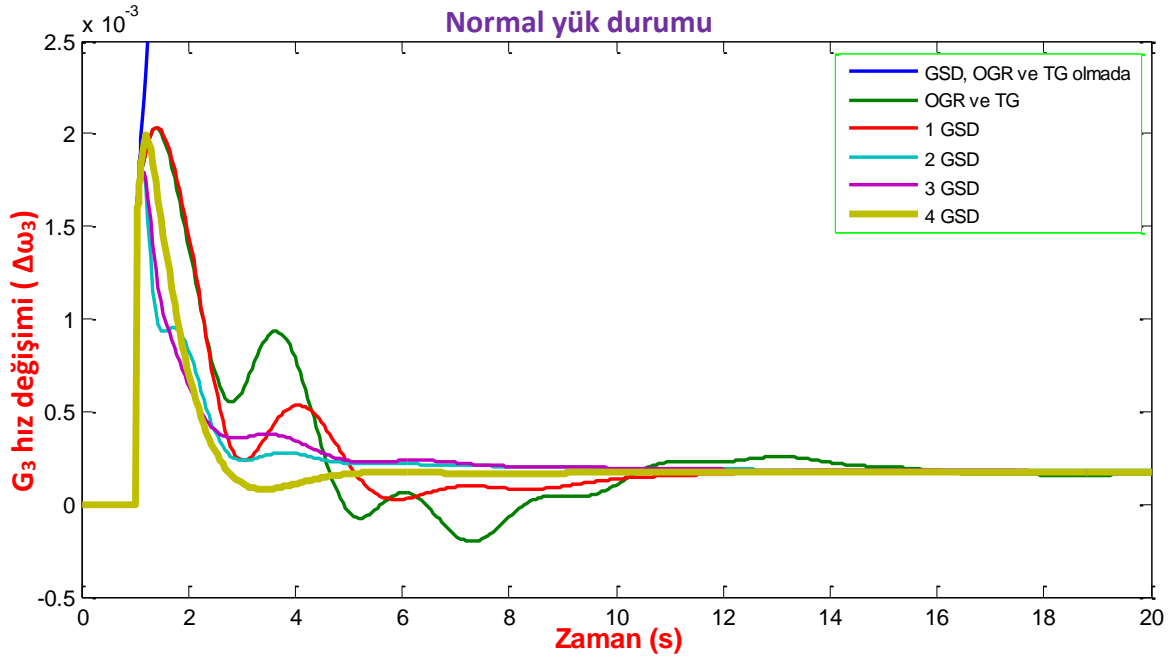
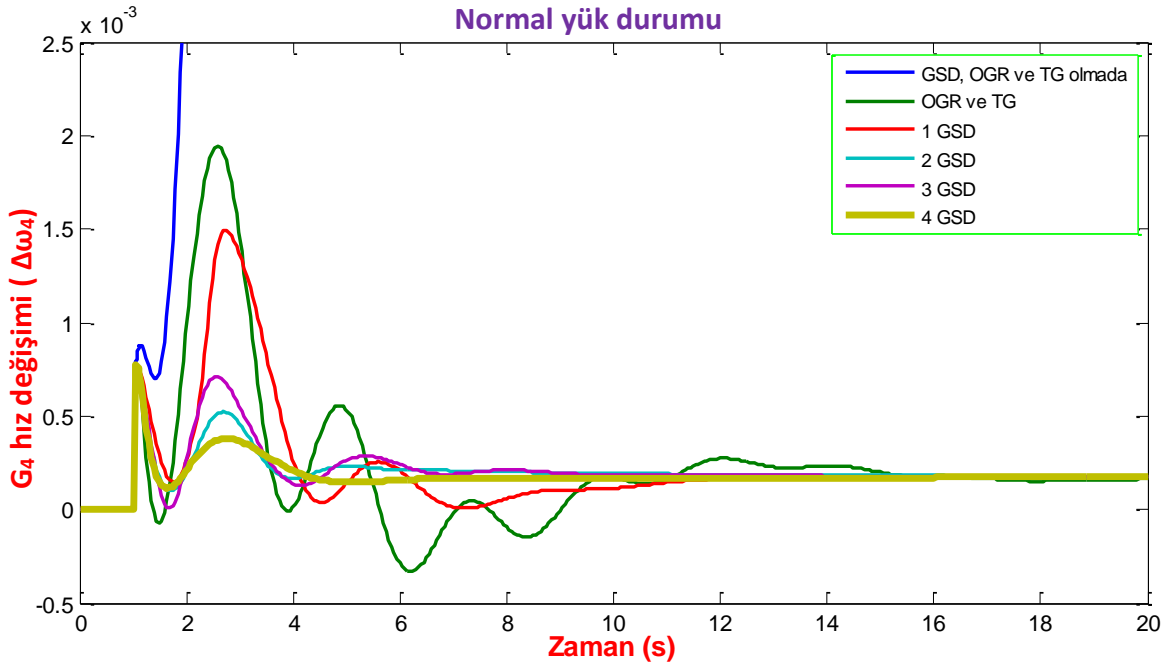
Bu durumda hem üç fazlı kısa devre hem hattın kapatılması uygulanmıştır. Durum 1 normal yük durumunu ifade etmektedir. Bu durum içinde OGR ve TG olmadan, OGR ve TG olduğu halde, ABC tabanlı bir GSD, ABC tabanlı iki GSD, ABC tabanlı üç GSD ve önerilen ABC tabanlı dört GSD'nin zamana bağlı  $\Delta\omega_i$  değişimleri şekillerde gösterilmiştir. Ayrıca her durum için sistemin özdeğerlerin yerleri de şekillerde gösterilmiştir.



Şek. 6.16. Durum 1 için jeneratör G<sub>1</sub>'in rotor hız değişimi

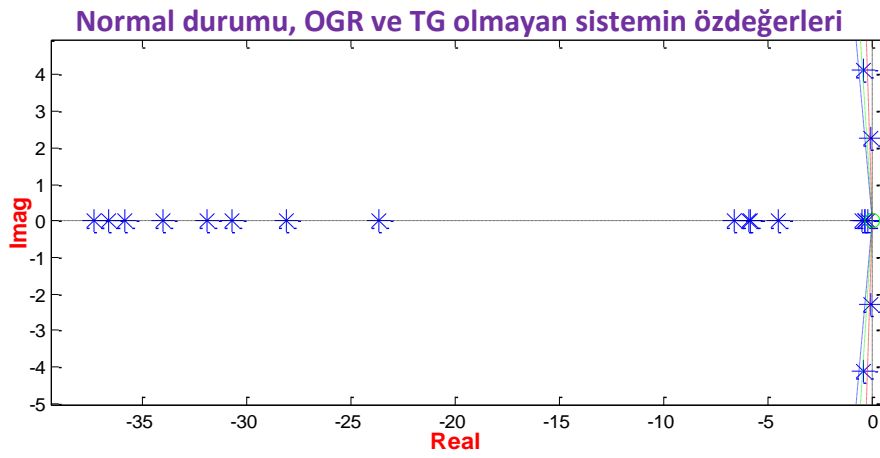


Şek. 6.17. Durum 1 için jeneratör G<sub>2</sub>'nin rotor hız değişimi

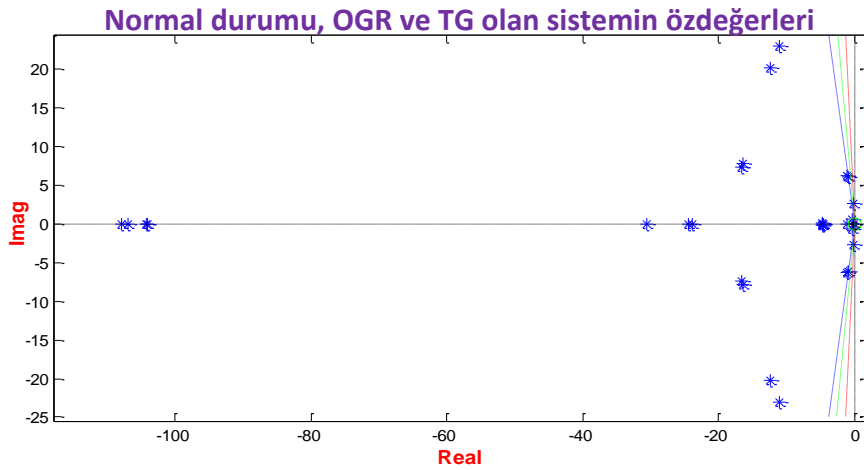
Şek. 6.18. Durum 1 için jeneratör G<sub>3</sub>'ün rotor hız değişimiŞek. 6.19. Durum 1 için jeneratör G<sub>4</sub>'ün rotor hız değişimi

Şek. 6.16 - 6.19'den görüldüğü üzere OGR ve TG olmayan dört makineli iki bölge güç sistemi kararsızdır. Sisteme OGR ve TG ilavesi ile 15 s'ye kadar azalan salınımlar yaparak sistemin dört jeneratörü kararlı hale oturduğu gözlenmiştir. ABC tabanlı 1 GSD olan dört

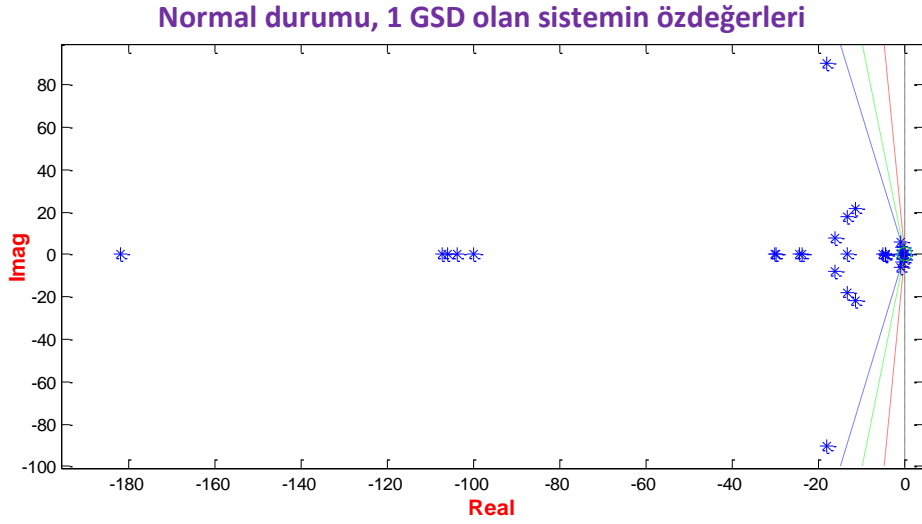
makinelik iki bölgele güç sistemi 11 s'ye kadar azalan salınımlar yaparak sistemin kararlı hale oturduğu gözlenmiştir. ABC tabanlı 2 GSD ve 3 GSD olan sistemi ise zaman eksenini boyunca salınım yapmaz iken OGR ve TG olan sisteme göre sadece kendi üzerlerinde salınımlar yaparak 6 s olmadan kararlı hale gelmiştir. Önerilen ABC tabanlı dört GSD yapısı ise diğer tüm yapılara göre şekilde de açıkça görüldüğü gibi hem kendi üzerinde hem de zaman eksenini boyunca salınım yapmadan yaklaşık 4 s'de sistemin kararlı hale gelmesine yardımcı olmuştur.



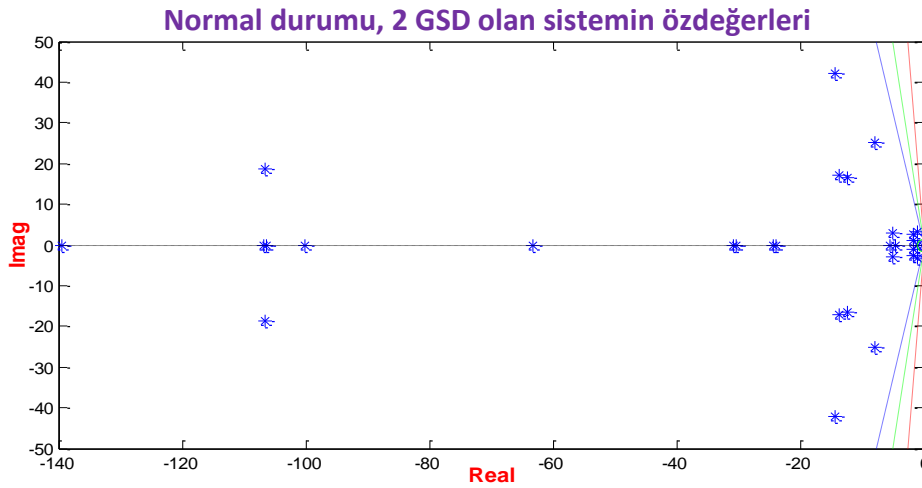
Şekil 6.20. Durum 1 için OGR ve TG olmayan sistemin özdeğerleri



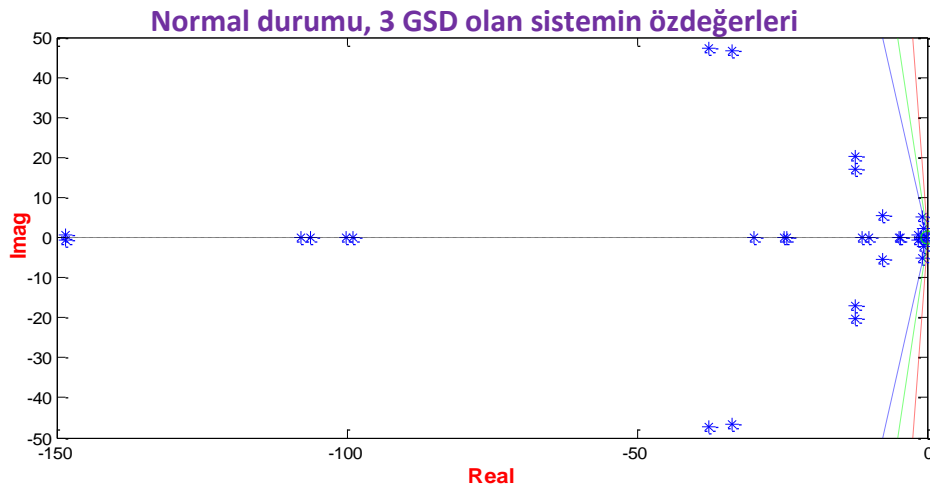
Şekil 6.21. Durum 1 için OGR ve TG olan sistemin özdeğerleri



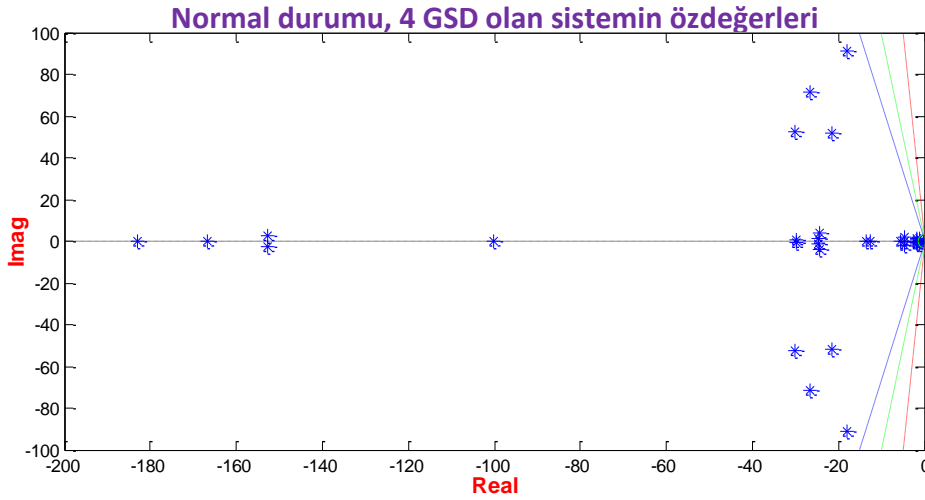
Şekil 6.22. Durum 1 için 1 GSD olan sistemin özdeğerleri



Şekil 6.23. Durum 1 için 2 GSD olan sistemin özdeğerleri



Şekil 6.24. Durum 1 için 3 GSD olan sistemin özdeğerleri

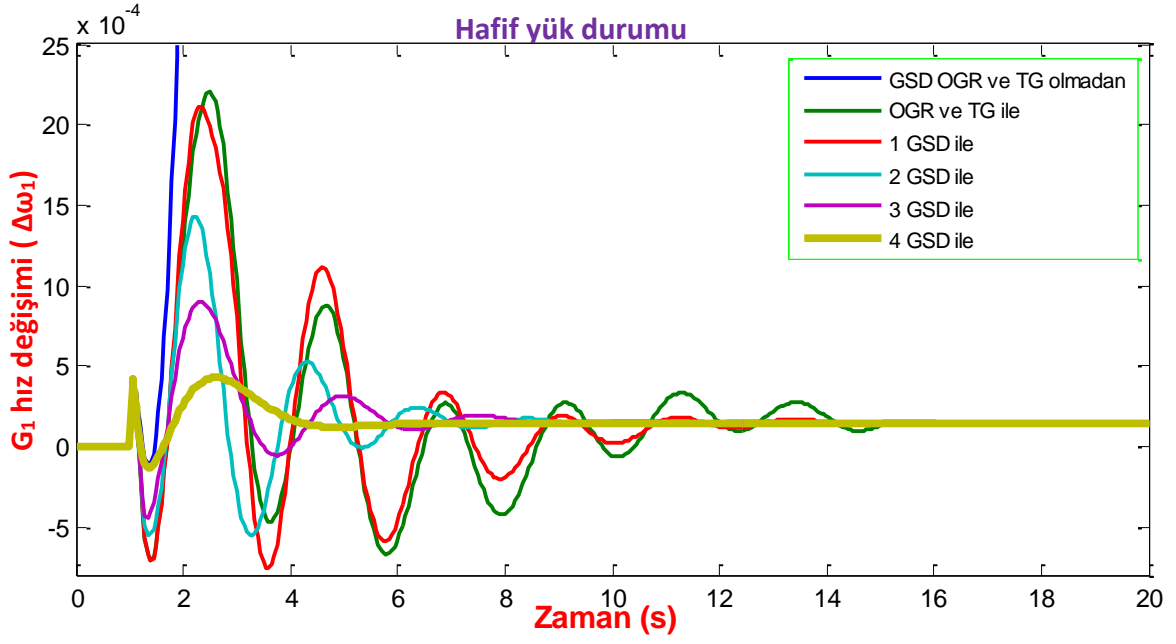


Şekil 6.25. Durum 1 için 4 GSD olan sistemin özdeğerleri

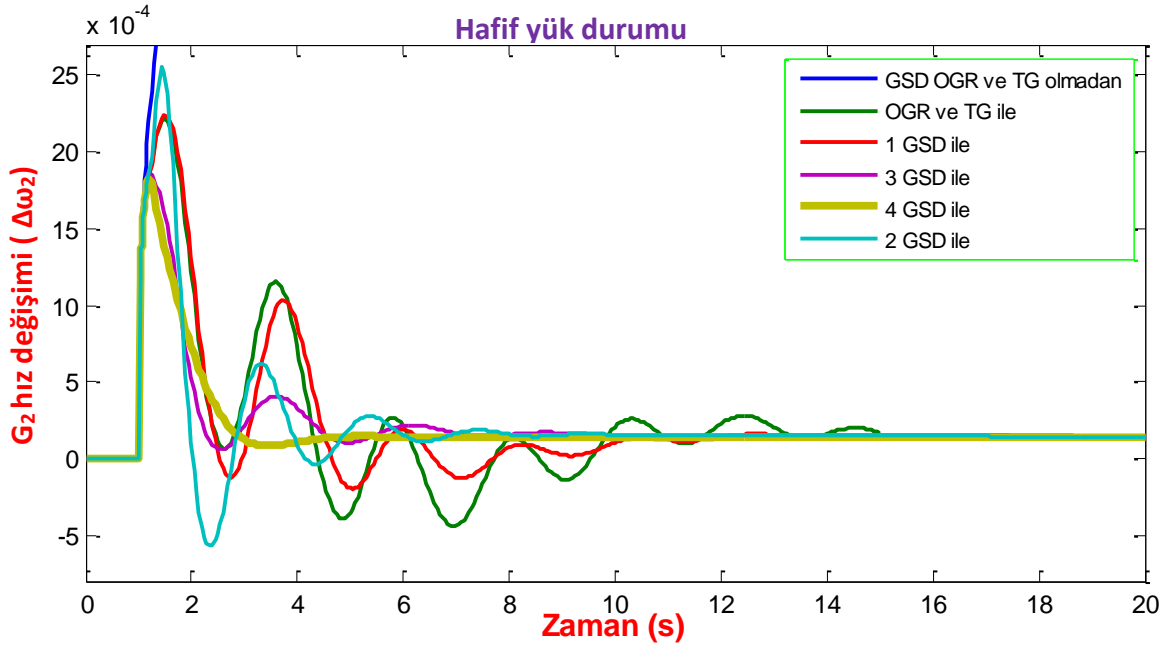
Şek. 6.20 - 6.25’de görüldüğü üzere OGR ve TG olmayan dört makineli iki bölge güç sistemin özdeğerleri s-düzlemin D-şeklinin sağ tarafına yerleşmesi, bu yüzden kararsız olabilmektedir. OGR ve TG olan sistemin özdeğerleri OGR ve TG olmayan sistemin özdeğerlere göre s-düzlemin D-şeklinin sol tarafta yer almıştır ve bunun için kararlı olabilmektedir. ABC tabanlı 1 GSD, 2 ABC tabanlı GSD, 3 ABC tabanlı GSD ve Önerilen 4 ABC tabanlı GSD olan dört makineli 2 bölge güç sistemin özdeğerleri ise diğer iki sistemin özdeğerlere göre şekilde de açıkça görüldüğü gibi s-düzlemin D-şeklinin sol tarafta yer almıştır ve dolayısıyla kararlıdır.

## Durum 2

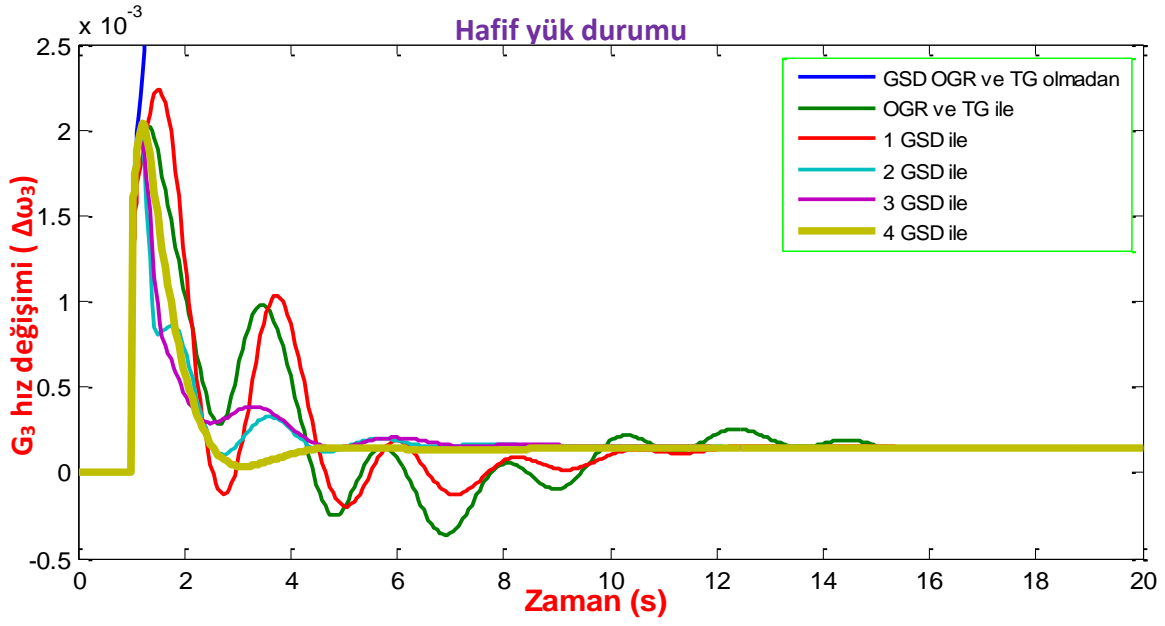
Durum 2 hafif yük durumunu ifade etmektedir. Bir önceki durumda olduğu gibi hem üç fazlı kısa devresi hem hattın kapatılması uygulanmıştır. Bu durum içinde OGR ve TG olmayan, OGR ve TG olan, 1 ABC tabanlı GSD, 2 ABC tabanlı GSD, 3 ABC tabanlı GSD ve önerilen 4 ABC tabanlı GSD’nin zamana bağlı  $\Delta\omega_i$  değişimleri şekillerde gösterilmiştir. Ayrıca her durum için sisteme bağlı özdeğerlerin yerleri de şekillerde gösterilmiştir.



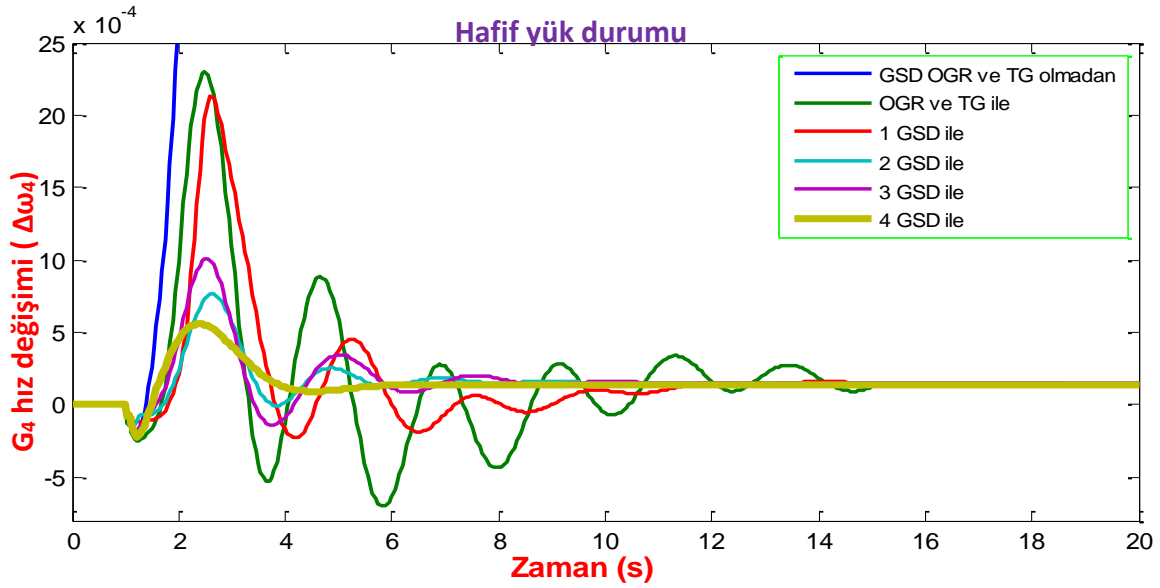
Şekil 6.26. Durum 2 için jeneratör  $G_1$ 'in rotor hız değişimi



Şekil 6.27. Durum 2 için jeneratör  $G_2$ 'nin rotor hız değişimi



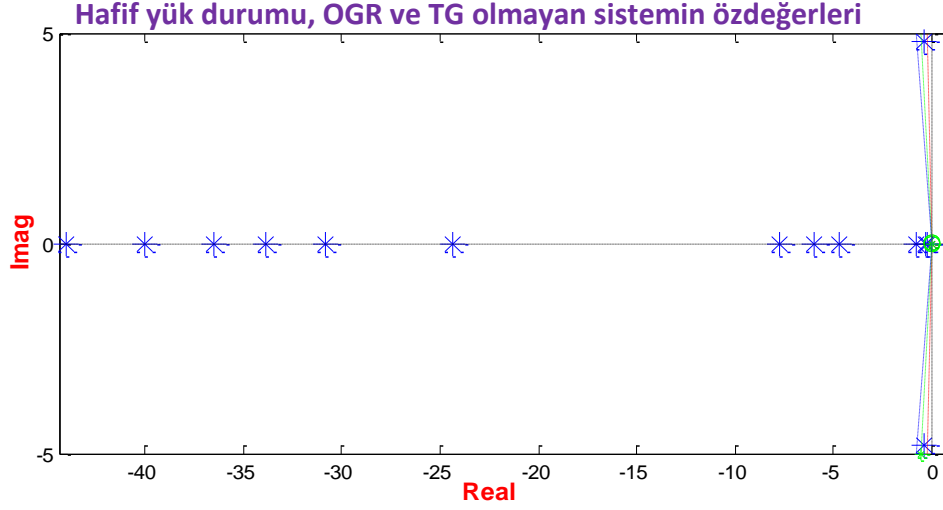
Şekil 6.28. Durum 2 için jeneratör  $G_3$ 'ün rotor hız değişimi



Şekil 6.29. Durum 2 için jeneratör  $G_4$ 'ün rotor hız değişimi

Şek. 6.26 - 6.29'de görüldüğü üzere OGR ve TG olmayan dört makineli iki bölge güç sisteminin her dört jeneratörü kararsızdır. Sisteme OGR ve TG ilavesi ile bir önceki duruma göre hızın tepe değeri yüksek ve yaklaşık 15 s'ye kadar azalan salınımlar yaparak sistemin her dört jeneratörü kararlı hale oturduğu gözlenmiştir. ABC tabanlı 1 GSD olan dört makineli iki bölge güç sistemi 11 s'ye kadar azalan salınımlar yaparak sistemin kararlı hale oturduğu gözlenmiştir. ABC tabanlı 2 GSD ve 3 GSD olan sistemi ise zaman ekseninde boyunca

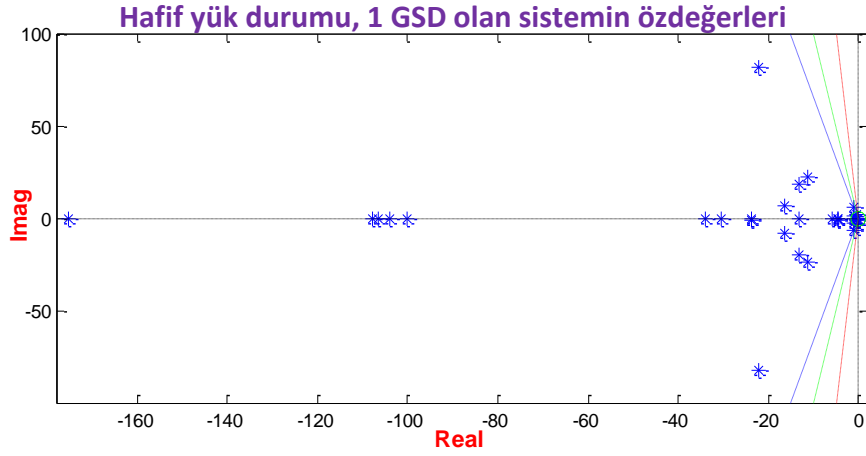
salınım yapmaz iken OGR ve TG olan sisteme göre sadece kendi üzerlerinde salınımlar yaparak 6 s olmadan kararlı hale gelmiştir. Önerilen ABC tabanlı dört GSD yapısı ise hem kendi üzerinde hem de zaman eksenini boyunca salınım yapmadan yaklaşık 4 s'de sistemin kararlı hale gelmesine yardımcı olmuştur.



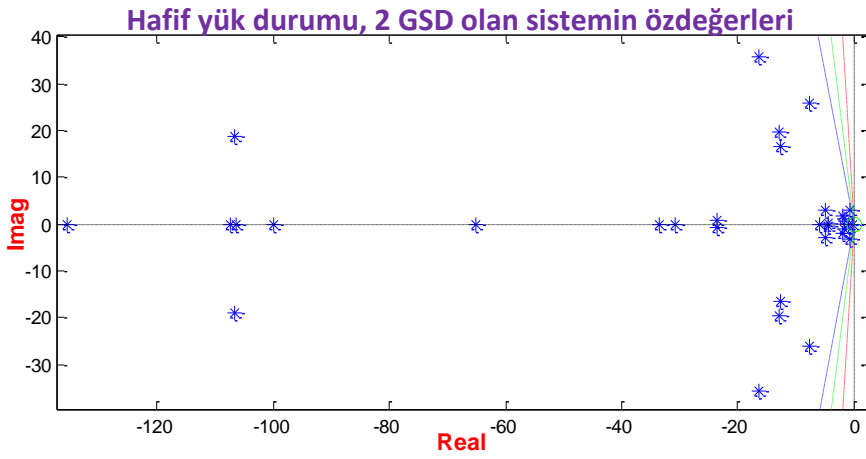
Şekil 6.30. Durum 2 için OGR ve TG olmayan sistemin özdeğerleri



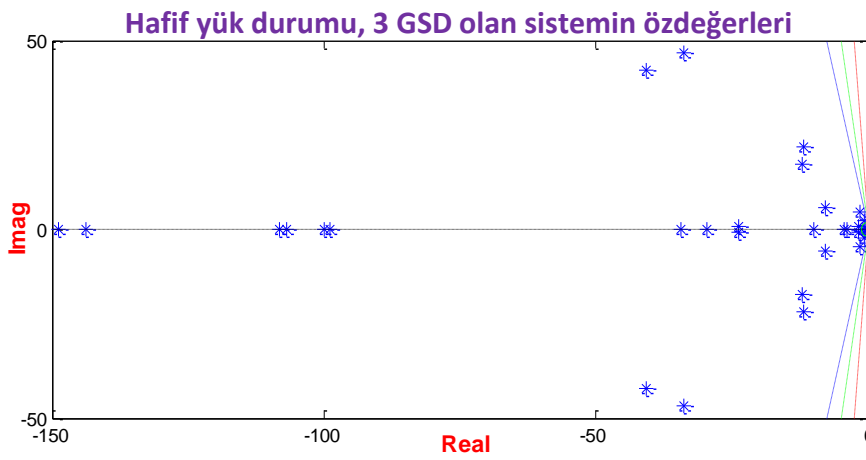
Şekil 6.31. Durum 2 için OGR ve TG olan sistemin özdeğerleri



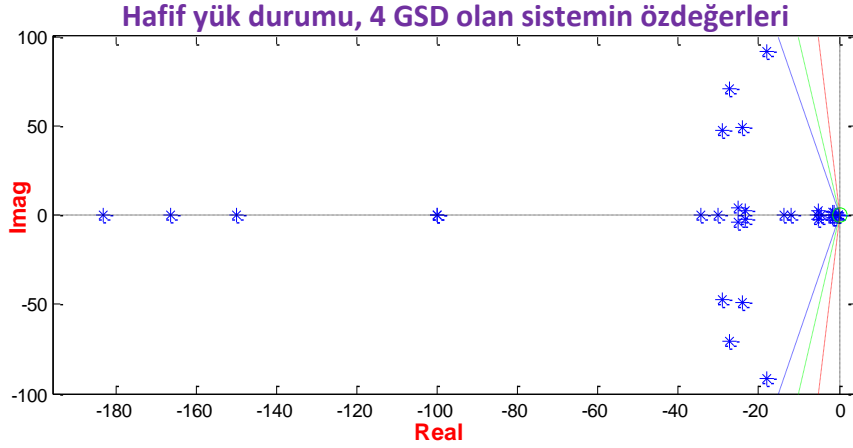
Şekil 6.32. Durum 2 için 1 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri



Şekil 6.33. Durum 2 için 2 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri



Şekil 6.34. Durum 2 için 3 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri

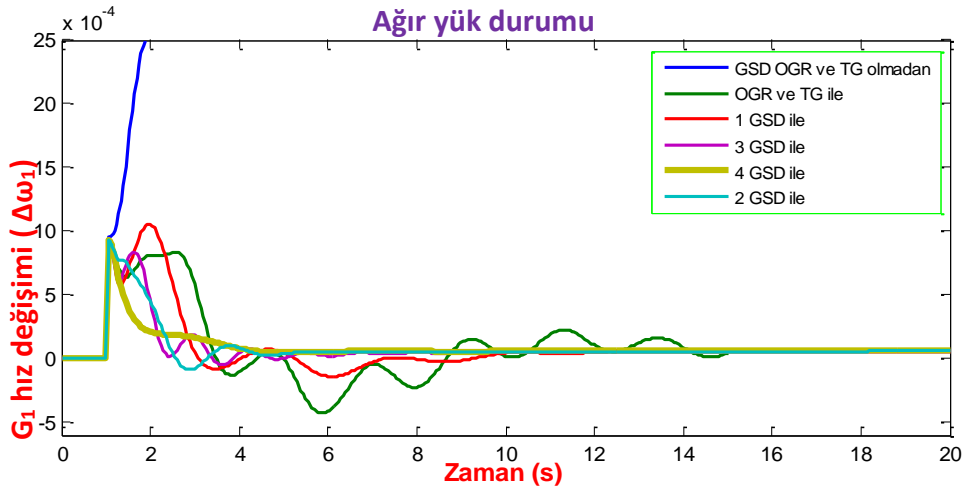
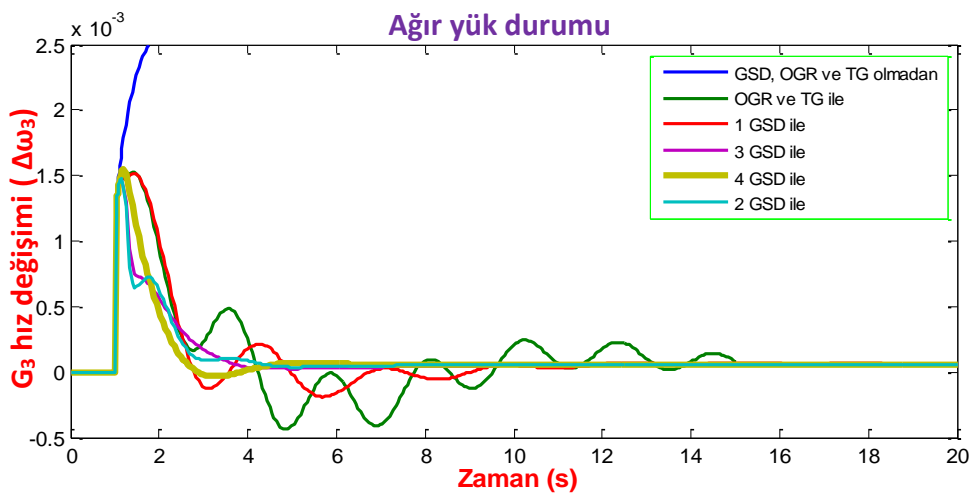


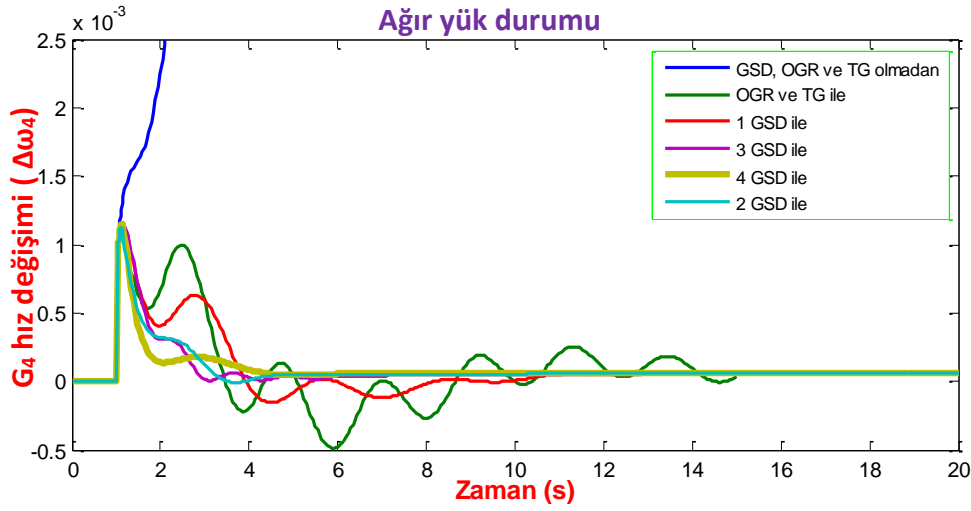
Şekil 6.35. Durum 2 için 4 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri

Şek. 6.30 - 6.35’de görüldüğü üzere OGR ve TG olmayan dört makineli iki bölge güç sistemin özdeğerleri hafif yük durumunda da s-düzlemin D-şekilinin sağ tarafında yerleşmiş, bu yüzden kararsız olabilmektedir. OGR ve TG olan sistemin özdeğerleri OGR ve TG olmayan sistemin özdeğerlerine göre s-düzlemin D-şekilinin sol tarafta yer almıştır ve bunun için kararlı olabilmektedir. ABC tabanlı 1 GSD, 2 ABC tabanlı GSD, 3 ABC tabanlı GSD ve Önerilen 4 ABC tabanlı GSD olan dört makineli 2 bölge güç sistemin özdeğerleri ise diğer iki sistemin özdeğerlerine göre şekilde de açıkça görüldüğü gibi s-düzlemin D-şekilinin sol tarafında yer almıştır ve dolayısıyla kararlıdır.

### Durum 3

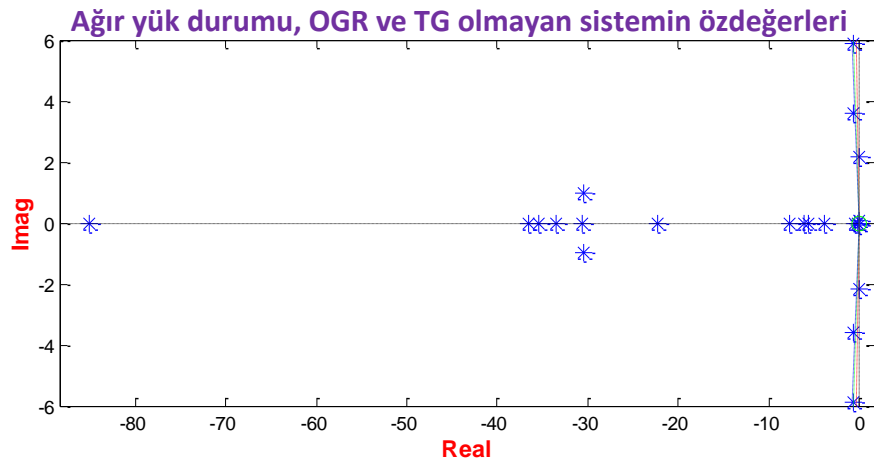
Durum 3 Ağır yük durumunu ifade etmektedir. Bu durumda da bir önceki durumda olduğu gibi hem üç fazlı kısa devre hem hattın kapatılması uygulanmıştır. Bu durum içinde OGR ve TG olmayan, OGR ve TG olan, 1 ABC tabanlı GSD, 2 ABC tabanlı GSD, 3 ABC tabanlı GSD ve önerilen 4 ABC tabanlı GSD’nin zamana bağlı  $\Delta\omega_i$  değişimleri şekillerde gösterilmiştir. Ayrıca her durum için sisteme bağlı özdeğerlerin yerlerini de şekillerde gösterilmiştir.

Şekil 6.36. Durum 3 için jeneratör G<sub>1</sub>'in rotor hız değişimiŞekil 6.37. Durum 3 için jeneratör G<sub>2</sub>'nin rotor hız değişimiŞekil 6.38. Durum 3 için jeneratör G<sub>3</sub>'ün rotor hız değişimi

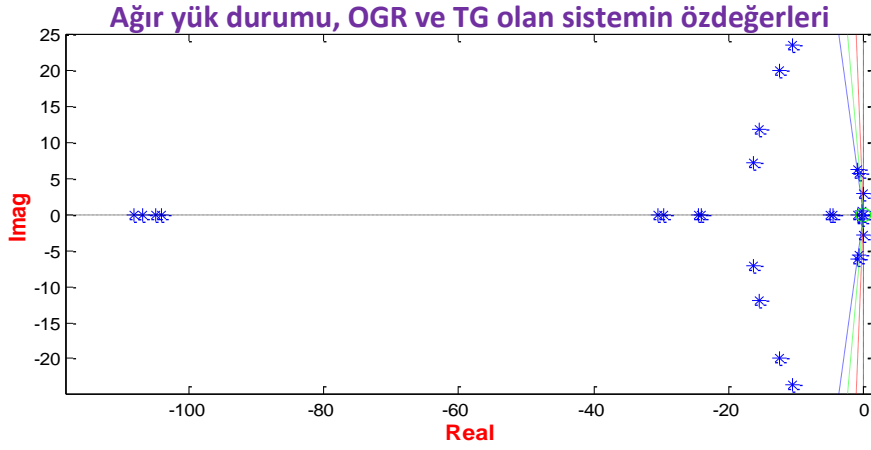


Şekil 6.39. Durum 3 için jeneratör G<sub>4</sub>'ün rotor hız değişimi

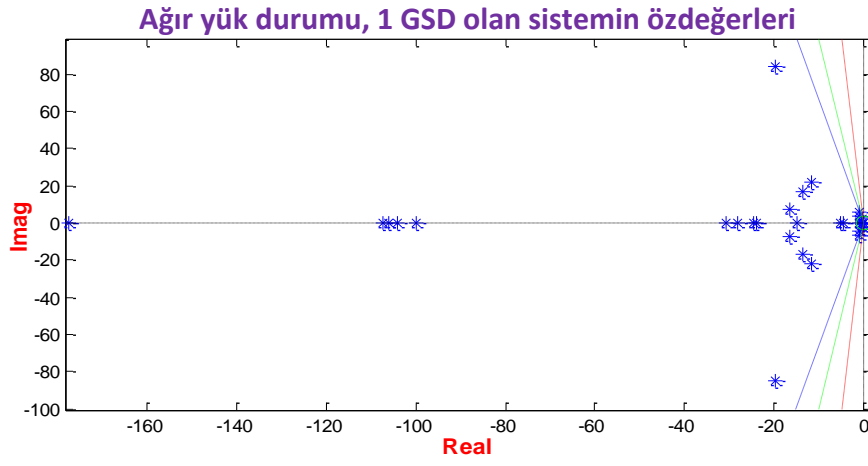
Şek. 6.36 - 6.39'de görüldüğü üzere OGR ve TG olmayan dört makineli iki bölge güç sisteminin dört jeneratörde kararsızdır. OGR ve TG olan sistem ile bir önceki duruma göre yaklaşık 15 s'ye kadar azalan salınımlar yaparak sistemin dört jeneratörde kararlı hale oturduğu gözlenmiştir. ABC tabanlı 1 GSD olan dört makineli iki bölge güç sistemi 11 s'ye kadar azalan salınımlar yaparak sistemin kararlı hale oturduğu gözlenmiştir. ABC tabanlı 2 GSD ve 3 GSD olan sistemi ise zaman eksenini boyunca salınım yapmaz iken OGR ve TG olan sisteme göre sadece kendi üzerlerinde salınımlar yaparak 6 s olmadan kararlı hale gelmiştir. Önerilen ABC tabanlı dört GSD yapısı ise hem kendi üzerinde hem de zaman eksenini boyunca salınım yapmadan yaklaşık 4 s'de sistemin kararlı hale gelmesine yardımcı olmuştur.



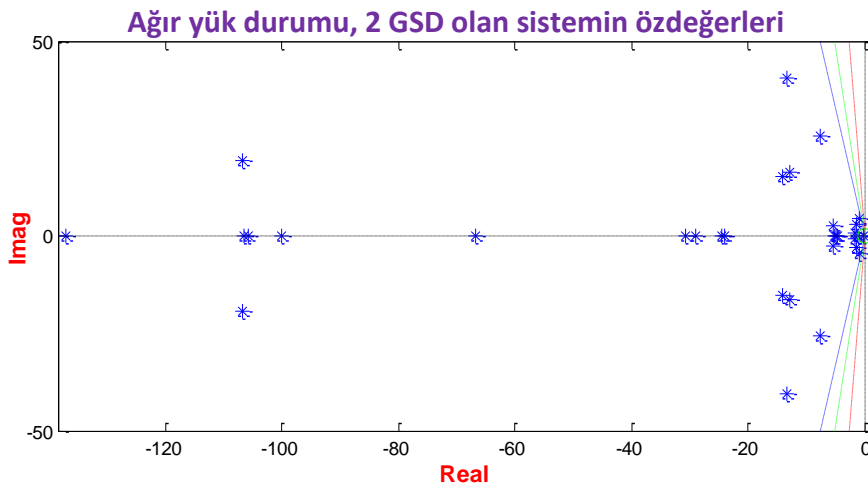
Şekil 6.40. Durum 3 için OGR ve TG olmayan sistemin özdeğerleri



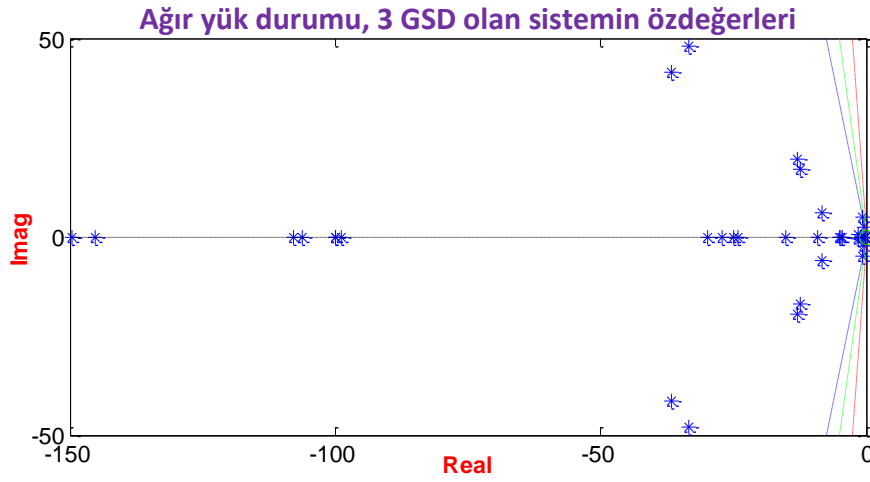
Şekil 6.41. Durum 3 için OGR ve TG olan sistemin özdeğerleri



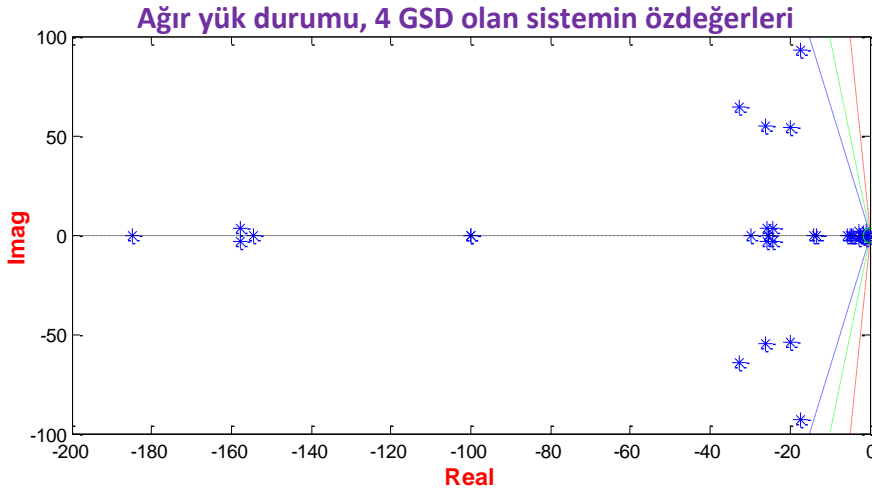
Şekil 6.42. Durum 3 için 1 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri



Şekil 6.43. Durum 3 için 2 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri



Şekil 6.44. Durum 3 için 3 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri



Şekil 6.45. Durum 3 için 4 ABC tabanlı GSD olan sistemin özdeğerleri

Ağır yük durumunda, Şek. 6.40 - 6.45’de görüldüğü üzere OGR ve TG olmayan güç sistemin özdeğerleri s-düzlemi D-şekilinin sağ tarafında yerleşmiş, bu yüzden kararsız olabilmektedir. OGR ve TG olan sistemin özdeğerleri OGR ve TG olmayan sistemin özdeğerlere göre s-düzlemi D-şeklinin sol tarafında yer almıştır ve bunun için kararlı olabilmektedir. ABC tabanlı 1 GSD, 2 ABC tabanlı GSD, 3 ABC tabanlı GSD ve Önerilen 4 ABC tabanlı GSD olan dört makineli 2 bölge sistemi özdeğerleri ise s-düzlemin D-şeklinin sol tarafında yer almıştır ve dolayısıyla kararlıdır.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada tek makine sonsuz güçlü bara sistemin rotor açısal kararlılığını sağlamak için orantılı integral türevi (PID) tabanlı güç sistemi dengeleyicisi (GSD) parametrelerinin en uygun değerleri ateş böceği algoritması (firefly algorithm, FA) ile ve dört makineli iki bölgeli sistemin rotor açısal kararlılığını sağlamak için geleneksel güç sistemi dengeleyicisi parametrelerinin en uygun değerleri yapay arı kolonisi algoritması ile bulunmuştur. Her iki bölümünde özdeğer tabanlı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Ateş böceği ve yapay arı kolonisi algoritmalarının kesin ve doğruya en yakın çözümü bulma prensibinden faydalanılarak yeni güç sistem dengeleyicileri tasarlanmıştır. Böylece hem tek makine sonsuz güçlü bara sistem için ve hem de dört makineli iki bölgeli sistem için sürekli ve dayanıklı kararlılık sağlanmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde önerilen FA tabanlı PID-GSD ile diğer GSD yapıları karşılaştırılmıştır. PID parametrelerinin iki sınırı için özdeğer tabanlı amaç fonksiyonu ile ateş böceği algoritması kullanarak optimizasyonu yapılmıştır. GSD yapılarının dayanaklığı, özdeğerlerin grafikleri, ve süreleri benzetim çalışmalarında incelenmiştir. Tüm yapıları için 133 işletme koşulu altında sistem cevabı incelenmiştir. FA tabanlı PID-GSD (durum-1) ve BA tabanlı GSD sistemlerin özdeğerlerinin 7 adeti s-düzlemin D-şeklinin sağ tarafında yer almıştır, bu yüzden bu yedi kararsız işletme durumuna sahiptir. Sistemin özdeğerlerinin grafiklerinden ve sekiz örnek işletme koşulundan anlaşılacağı üzere; durum-2’de FA tabanlı PID-GSD’in diğer GSD yapılarına üstünlüğü görülmektedir.

Dört makineli iki bölgeli güç sistemin farklı yapıları farklı durumlarda karşılaştırılmıştır. Bu yapılar sırası ile OGR ve TG olmayan, OGR ve TG olan, 1 ABC tabanlı GSD olan, 2 ABC tabanlı GSD olan, 3 ABC tabanlı GSD olan ve 4 ABC tabanlı GSD olan dört makineli iki bölgeli güç sistemlerdir. Tüm yapıları için hem üç faz kısa devresi hem hattın kapatılması uygulanmıştır. Ve tüm yapılar için aynı koşullar altında sistem cevapları incelenmiştir. Sistemin özdeğerlerinden ve benzetim çalışmaları çıktılarından da anlaşılacağı üzere 4 ABC tabanlı GSD, diğer yapılarına göre daha üstündür.

Sonuç olarak; bu çalışmanın birinci bölümünde tek makine sonsuz güçlü bara sisteminde güç sistem dengeleyicisi parametrelerinin en uygun değerlerinin seçimi için literatürde bu

konuya uygulanmamış olan ateş böceği algoritması (FA) önerilmiş ve diğer güç sistemi dengeleyicisi yapılarına olan üstünlüğü elde edilen çıktılar sonucu gösterilmiştir. Ayrıca, çalışmanın ikinci bölümünde dört makineli iki bölgeli sistem dengeleyicisindeki parametrelerin en uygun değerlerinin seçimi için literatürde bu konuya uygulanmamış olan yapay arı kolonisi (ABC) önerilmiş ve hem özdeğerlerinin incelenmesi ile hem de benzetim çalışmaları ile diğer yapılardan daha üstün olduğu ortaya korulmuştur.

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

İleriye dönük çalışma olarak; bu çalışmada tasarlanan ateş böceği algoritması tabanlı orantılı integral türev kontrollü olan güç sistem dengeleyicisi, gerekli yazılım programlarının hepsi edilmesi ile laboratuvar ortamında çalışan pratik bir uygulama haline dönüştürülebilir ve dört jeneratör iki bölgeli sistemin benzetim çalışması yerine tüm enterkonnekte sistemin çalışmaları yapılabilir.

## KAYNAKLAR

1. Eke, İ. (2011). *Yapay Ari Kolonisi Algoritmasi Tabanlı Kararlı Güç Sistemi Dengeleyicisi Tasarımı*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
2. Vandiver, B., Apostolov, A. and Steinhauser, F. (2010). Testing of Phasor Measurement Units, *63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, 1-5.
3. Gupta, R., Bandyopadhyay, B. and Kulkarni, A.M. (2003). Design of Power System Stabilizer for Single-Machine System using Robust Periodic output Feedback Controller, *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, United Kingdom, 211-216.
4. Khodabakhshian, A., Hemmati, R. (2013). Multi-Machine Power System Stabilizer Design by Using Cultural Algorithms. *Int J Electrical Power Energy System*; 44: 571–580.
5. Gurrula, G., Sen, I. (2008). A modified Heffron-Phillip's model for the design of power system stabilizers, *International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, New Delhi, 1-6.
6. Larsen, E. V., Swann, D.A. (1981). Applying Power System Stabilizers Part I: General Concepts, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100 (6): 3017-3024.
7. 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*, PAS-100 (6): 3025-3033.
8. Larsen, E. V., Swann, D.A. (1981). Applying Power System Stabilizers Part III: Practical Considerations, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100 (6): 3017-3024.
9. Eke, İ., Taplamacıoğlu, M. C., ve Kocaarslan, İ. (2011). Power System Stabilizer Design for Rotor angle stability, *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol.3, No.2.
10. Gözde, H. (2010). *Güç Sistemlerinde Yapay Ari Kolonisi Algoritması Yöntemi ile Yüksek-Frekans Kontrolü Optimizasyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
11. Yang, T.C. (1997). Applying  $H_{\infty}$  Optimisation Method to Power System Stabiliser Design part 1: Single-Machine Infinite-Bus Systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 19(1): 31-35.

12. Abedinia, O., Amjady, N., Izadfar, H.R., ve Shayanfar, H.A. (2012). Multimachine power system oscillation damping: placement and tuning pss via multiobjective HBMO *International Journal on, Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, Issue 12 Volume 4 Number 3 : 1-8.
13. 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(1): 1059-1064.
14. Hsu, Y.Y., Su, C. C. (1988). Application of power system stabilizer on a system with pumped storage plant, *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(1): 80-86.
15. Trudnowski, D. J., Smith, J. R., Short, T. A. And Pierre, D. A. (1991). An application of Prony methods in PSS design for multimachine systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(1): 118-126.
16. Sambariya, D.K., Prasad, R. (2014). Robust tuning of power system stabilizer for small signal stability enhancement using metaheuristic bat algorithm, *Electrical Power and Energy Systems* 61, 229–238.
17. Chao-Rong, Chen., Yuan-Yin, Hsu. (1991). Synchronous machine steady-state stability analysis using an artificial neural network, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 6(1): 12-20.
18. Zhou, E. Z., Malik, O. P. and Hope, G. S. (1991). Theory and method for selection of power system stabilizer location, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 6(1): 170-176.
19. Taşar, M., Özdemir, M. (2011). Sonsuz güçlü baraya bağlı senkron generatörün uyarım kontrolü için güç sistem kararlayıcısı tasarımı, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Turkey.
20. Al-Duwaish, H. N., Al-Hamouz, Z. M. (2011). A neural network based adaptive sliding mode controller: Application to a power system stabilizer, *Energy Conversion and Management*, 52 (2): 1533-1538.
21. Rogers, G. (2000). *Power System Oscillations*. (First Edition), Kluwer Academic, Boston, 1-6, 10-17, 97-100, 129-131, 131-134, 134-137, 139-140.
22. Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. (First Edition), McGraw-Hill Professional, New York, 54-56, 19, 32, 38-39, 45, 699-700, 25, 40, 128-130, 47, 53, 42-43, 703-706, 315-373, 766-782.
23. Machowski J., Bialek, J. W. and Bumby J. R. (1997). *Power System Dynamics: Stability and Control*. (First Edition), John Wiley and Sons, New York, 1-3, 43, 183, 141-182, 149, 141-145, 235-240, 321-355, 42-43, 145, 355-363, 291-295.

24. Padiyar, K. R. (2004). *Power System Dynamics Stability and Control*. (First Edition), John Wiley and Sons, Singapore, 1-4, 4, 9-10, 16-20, 11-13, 50, 51-122, 259-260, 10, 255, 250-254, 123-164, 285-305.
25. Anderson, P. M., Fouad, A. A. (2003). *Power System Control and Stability*. (Second Edition), The Iowa State University Press, Iowa, 3-4, 4-7, 16-20, 24, 13-14, 43, 26-31, 21-24, 13-15.
26. Tosun, S. (2011). *Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Sezgisel Yöntemlerle İncelenmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
27. Küçüktezcan, Fatih. (2012). *Genetik algoritma ile optimize edilmiş bulanık güç sistemi kararlı kilicisinin sistem kararlılığına etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
28. Demirören, A., Zeynelgil, H.L. (2004). Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı, Kontrolü ve Çalışması, *Birsen yayınevi*, İstanbul. 70-75.
29. Tacer, E. (1990). Enerji Sistemlerinde Kararlılık, İ.T.Ü. *Elektrik-Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi*, İstanbul.
30. Bikash, P., Balarko, C. (2003). *Robust Control in Power Systems*. (First Edition), Pai M.A. and Stankovic A.M., Springer, New York, 6.
31. Nalbantoğlu, M. (2010). *Güç Sistemlerinin Kararlılığı için Senkron Jeneratörün Uyartımının Kayma Kipli Kontrolü*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 13-15, 32-34, 16-19, 34-35.
32. Yazıcı, İ. (2008). *Model Referans Kayan Kipli Kontrolör Tabanlı Güç Sistem Kararlayıcı Tasarımı*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 23-24, 43-45, 47-49, 24, 22, 50-53.
33. Alzubaydi, N. (2012). *Yapay Zekâ Hesaplama Teknikleri Kullanılarak Eşzamanlı Jeneratörün en Uygun Duruma Getirilmiş Parametre Kontrolörü*, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
34. IEEE Std 1110-2002 (Revision of IEEE Std 1110-1991), (2002). IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, USA, NY.
35. Kocaarslan, 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.
36. Krause, P. C., Wasynczuk, O. and Sudhoff, S. D. (1995). Analysis of Electric Machinery, *IEEE Press*, New York, 211-267, 271-296, 298-324, 325-359.

37. 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.
38. Sauer, P. W., Pai, M. A. (1998). *Power System Dynamics and Stability*, Prentice Hall, New Jersey, 89-93, 262-270, 104-106, 255-261, 270-277.
39. Demello, F. P., Concordia, C. (1969). Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, PAS-88(4). 316-329.
40. El-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.
41. IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992), (2006). IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, *IEEE*, 1-85.
42. Machowski, J., Bialek, J. W. and Bumby, J. R. (2008). *Power System Dynamics Stability and Control*. (Second Edition), John Wiley & Sons, Ltd, 414-417.
43. Ghahremani, E., Karrari, M. and Malik, O. P. (2008). Synchronous Generator Thirdorder Model Parameter Estimation using Online Experimental Data, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2(5): 708-719.
44. Padiyar, K. R. (2008). *Power System Dynamics Stability and Control*, (Second Edition) Indian Institute of Science, Bangalore, BS Publications, 297-325.
45. Byerly, R.T. Bennon, R.J. and Sherman, D.E. (1982). Eigenvalue Analysis of Synchronizing Power Flow Oscillations in Large electric Power Systems, *IEEE Trans.* Vol. PAS-101, No. 1, 235-243.
46. Wong, D.Y., Rogers, G.J., Poretta, B. and Kundur, P. (1988). Eigenvalue Analysis of Very Large Power Systems, *IEEE Trans. on Power systems*, Vol. 3, No.2, 472-480.
47. Sauer, P.W., Rajagopalan, C. and Pai, M.A. (1991). An Explanation and Generalization of the AESOPS and PEALS Algorithm, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, No.1, 293-299.
48. Perez-Arriaga, I.J., Verghese, G.C. and Schweppe, F.C. (1982). Selective Modal Analysis with Applications to Electric Power Systems, Part I: Heuristic Introduction; Part II: The Dynamic Stability Problem, *IEEE Trans.* Vol. PAS-101, No.9, 3117-3134.
49. Pagola, F.L., Perez-Arriaga, L.J. and Verghese, G.C. (1989). On Sensitivities, Residues and Participations: Applications to Oscillatory Stability Analysis and Control, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRS-4, No.1, 278-285.

50. Perez-Arriaga, I.J., Verghese, G.C., Pagola, F.L., Sancha, J.L. and Schweppe, F.C. (1990). Developments in Selective Modal Analysis of Small Signal Stability in Electric Power Systems, *Automatica*, Vol. 26, No.2, 215-231.
51. CURA, T. (2008). Modern Sezgisel Teknikler ve Uygulamaları, *Papatya Yayıncılık*, İstanbul, Türkiye.
52. Xin-She, Y., Xingshi, H. (2013). Firefly Algorithm: Recent Advances and Applications, *Int. J. Swarm Intelligence*, Vol. 1, No. 1, 36–50.
53. Yang, X. S. (2008). Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms, *Luniver Press*, UK.
54. Yang, X. S. (2009). Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, *Proc. 5th Symposium on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications*, (Eds. O. Watanabe and T.Zeugmann), Lecture Notes in Computer Science, 5792: 169-178.
55. Yang, X. S. (2010). Engineering Optimisation: An Introduction with Metaheuristic Applications, *John Wiley and Sons*, USA.
56. Karaboğa, D. (2005). An Idea based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization, *Technical Report TR06, Erciyes University*, Turkey, 1-6.
57. Karaboga, D., Basturk, B. (2007). A Powerful and Efficient Algorithm for Numeric Optimization: Artificial Bee Colony (abc) Algorithm”, *Journal Of Global Optimization*, 39(3): 459-471.
58. Kundur, P. (2011). *Power System Stability and Control*. (Twelfth reprint), New Delhi, India: Tata McGraw-Hill Education Pvt. Ltd.
59. Ghasemi, A., Shayeghi, H. and Alkhatib, H. (2013). Robust Design of Multi-Machine Power System Stabilizers using Fuzzy Gravitational Search Algorithm. *Int J. Electrical Power Energy System*; 51:190–200.
60. Shayeghi, H., Shayanfar, H.A., Safari, A. and Aghmasheh, R.A. (2010). Robust PSSs Design using PSO in a Multi-Machine Environment, *Energy Convers Manage*; 51:696–702.
61. Milano, F. (2009). Three-Dimensional Visualization and Animation for Power Systems Analysis , *Electric Power System Research*, Vol. 79, No. 12, 1638–1647.
62. Milano, F., Vanfretti, L., Morataya, J.C. (2008). An Open Source Power System Virtual Laboratory: The PSAT Case and Experience, *IEEE Transactions on Education*, Vol. 51, No. 1, p.17–23.



**EKLER**

## EK -1. Tek Makineli Sonsuz Güçlü Bara Sistemin Dataları

## Line Veri

xe=0,2;                      Hat reaktans  
R=0;                         Hat direnç

## Başlangıç durumu verileri

fb=50;                      Sistemin frekans  
PE=1;                      Normal aktif yük  
QE=0,015;                Normal reaktif yük  
Vt0=1,05;                Sonsuz bara gerilimi  
 $\sigma_0 = -1,5$ ;            Esas gerç k  zdeęer  
 $\xi_0 = 0,2$ ;                Esas sönümleme oranı

## Jeneratör verileri

D=0,0;  
H=5;  
xd=1,97;  
xdussu=0,3;  
xq=1,9;  
M=9,26;  
Tdussu=6,84;  
Uyarıcı (Exciter) veri  
KA=100;  
TA=0,02;

## EK -2. Ateş Böceği Algoritması

```

clc;
clear;
close all;

%% Problem Definition
tzaman=cputime;
run phesabi

% CostFunction=@(x) Sphere(x);          % Cost Function
nVar=3;                                % Number of Decision Variables
VarSize=[1 nVar];                       % Decision Variables Matrix Size
VarMin = [0 0 0];                       % Decision Variables Lower Bound
VarMax = [500 1800 100];                % Decision Variables Upper Bound

%% Firefly Algorithm Parameters

MaxIt=5;                                % Maximum Number of Iterations
nPop=6;                                  % Number of Fireflies (Swarm Size)
gamma=1;                                  % Light Absorption Coefficient
beta0=2;                                  % Attraction Coefficient Base Value
alpha=0.2;                                % Mutation Coefficient
alpha_damp=0.99;                          % Mutation Coefficient Damping Ratio
delta=0.05*(VarMax-VarMin);               % Uniform Mutation Range
m=2;

%% Initialization

% Empty Firefly Structure

firefly.Position=[];
firefly.Cost=[];

% Initialize Population Array

pop=repmat(firefly,nPop,1);

% Initialize Best Solution Ever Found

BestSol.Cost=inf;

% Create Initial Fireflies

for i=1:nPop
    pop(i).Position=unifrnd(VarMin,VarMax,VarSize);

    run OF_PSS_1
    pop(i).Cost= ObjVal;

%   pop(i).Cost = 1/(1.+ ObjVal);
%   pop(i).Cost=CostFunction(pop(i).Position);

    if pop(i).Cost<=BestSol.Cost
        BestSol=pop(i);
    end
end
end

```

## EK -2. (devam) Ateş Böceği Algoritması

```

% Array to Hold Best Cost Values

BestCost=zeros (MaxIt,1);

%% Firefly Algorithm Main Loop

for it=1:MaxIt

    newpop=pop;
    for i=1:nPop
        for j=1:nPop
            if pop(j).Cost<=pop(i).Cost
                rij=norm(pop(i).Position-pop(j).Position);
                beta=beta0*exp(-gamma*rij^m);
                e=delta.*unifrnd(-1,+1,VarSize);
                e=delta.*randn(VarSize);

                newpop(i).Position=pop(i).Position...
                    +beta*(pop(j).Position-pop(i).Position)...
                    +alpha*e;

                newpop(i).Position=max(newpop(i).Position,VarMin);
                newpop(i).Position=min(newpop(i).Position,VarMax);

run OF_PSS_2
    newpop(i).Cost =ObjVal;

%             newpop(i).Cost=CostFunction(newpop(i).Position);

            if newpop(i).Cost<=BestSol.Cost
                BestSol=newpop(i);
            end
        end
    end
end

% Merge
pop=[pop
    newpop
    BestSol]; %#ok
% Sort
[~, SortOrder]=sort([pop.Cost]);
pop=pop(SortOrder);

% Truncate
pop=pop(1:nPop);

% Store Best Cost Ever Found
BestCost(it)=BestSol.Cost;

% Show Iteration Information
disp(['Iteration ' num2str(it) ': Best Cost = '
num2str(BestCost(it))]);
% Damp Mutation Coefficient
alpha=alpha*alpha_damp;
end

```

### EK -3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

```

% clear all
% close all
clc
tzaman=cputime;
sigma_0=-1.5; zeta_0=0.2;
ABCOpts = struct( 'ColonySize', 12, ... % Number of Employed Bees+
Number of Onlooker Bees
'MaxCycles', 2,... % Maximum cycle number in order to terminate the
algorithm
'ErrGoal', 1e-20, ... % Error goal in order to terminate the
algorithm (not used in the code in current version)
'Dim', 3, ... % Number of parameters of the objective function
'Limit', 4, ... % Control parameter in order to abandon the food
source
'lb', [1 0.001 0.001 ], ... % Lower bound of the parameters to be
optimized
'ub', [100 1 0.5], ... %Upper bound of the parameters to be
optimized
'RunTime',1); % Number of the runs

GlobalMins=zeros(ABCOpts.RunTime,ABCOpts.MaxCycles);
for r=1:ABCOpts.RunTime
% Initialise population
Range = repmat((ABCOpts.ub-ABCOpts.lb), [ABCOpts.ColonySize
ABCOpts.Dim/3]); % Bölü 4 yapýnca 10*4 lük yaptý diđer türlü olmuyor
Lower = repmat(ABCOpts.lb, [ABCOpts.ColonySize ABCOpts.Dim/3]); % Bölü 4
yapýnca 10*4 lük yaptý diđer türlü olmuyor
Colony = rand(ABCOpts.ColonySize,ABCOpts.Dim) .* Range + Lower;

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

%evaluate and calculate fitness
%-----
run OF_IAE
%-----
ObjEmp=ObjVal;
FitEmp=calculateFitness1(ObjEmp);

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

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

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

    %% Employed phase
    Employed2=Employed;
for i=1:ABCOpts.ColonySize/2
    Param2Change=fix(rand*ABCOpts.Dim)+1;
    neighbour=fix(rand*(ABCOpts.ColonySize/2))+1;
    while(neighbour==i)
        neighbour=fix(rand*(ABCOpts.ColonySize/2))+1;
    end;
Employed2(i,Param2Change)=Employed(i,Param2Change)+(Employed(i,Param2Chan
ge)-Employed(neighbour,Param2Change))*(rand-0.5)*2;

```

### EK -3. (devam) Yapay Arı Kolonisi Algoritması

```

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

%-----
run OF_IAE_1
%-----

ObjEmp2 = ObjVal;
FitEmp2 = calculateFitness1(ObjEmp2);

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

%Normalize
NormFit = FitEmp / sum(FitEmp);

%%% Onlooker phase
Employed2 = Employed;
i = 1;
t = 0;
while (t < ABCOpts.ColonySize/2)
%   RAND_ = rand;
%   NormFit(i)
t = t + 1;
    if (rand < NormFit(i)) % Burdaki random lýk Uzun zaman
kybettiriyor.
        Param2Change = fix(rand * ABCOpts.Dim) + 1;
        neighbour = fix(rand * (ABCOpts.ColonySize/2)) + 1;
        while (neighbour == i)
            neighbour = fix(rand * (ABCOpts.ColonySize/2)) + 1;
        end;
        Employed2(i, :) = Employed(i, :);

Employed2(i, Param2Change) = Employed(i, Param2Change) + (Employed(i, Param2Change) - Employed(neighbour, Param2Change)) * (rand - 0.5) * 2;
        if (Employed2(i, Param2Change) < ABCOpts.lb(Param2Change))
            Employed2(i, Param2Change) = ABCOpts.lb(Param2Change);
        end;
        if (Employed2(i, Param2Change) > ABCOpts.ub(Param2Change))
            Employed2(i, Param2Change) = ABCOpts.ub(Param2Change);
        end;
%-----
run OF_IAE_1
%-----

ObjEmp2 = ObjVal;
FitEmp2 = calculateFitness1(ObjEmp2);

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

```

## EK -3. (devam) Yapay Arı Kolonisi Algoritması

```

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

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

if CycleMin<GlobalMin
    GlobalMin=CycleMin;
    GlobalParams=CycleBestParams;
end

GlobalMins(1,Cycle)=GlobalMin;

%% Scout phase
ind=find(Bas==max(Bas));
ind=ind(end);
if (Bas(ind)>ABCOpts.Limit)
    Bas(ind)=0;

Employed(ind,:)=random('Uniform',ABCOpts.lb,ABCOpts.ub);
end;
%-----
run OF_IAE_1
%-----
    ObjEmp=ObjVal;

FitEmp=calculateFitness1(ObjEmp);

    fprintf('Cycle=%d ObjVal=%g\n',Cycle,GlobalMin);

    Cycle=Cycle+1

end % End of ABC
end % for end

Kpss1=GlobalParams(1,1)
T1=GlobalParams(1,2)
T3=GlobalParams(1,3)
Kpss2=GlobalParams(1,4)
T21=GlobalParams(1,5)
T23=GlobalParams(1,6)
Kpss3=GlobalParams(1,7)
T31=GlobalParams(1,8)
T33=GlobalParams(1,9)
Kpss4=GlobalParams(1,10)
T41=GlobalParams(1,11)
T43=GlobalParams(1,12)

```

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : FARHAD, Zakirhussain  
 Uyuğu : Afghanistan.  
 Doğum tarihi ve yeri : 09.09.1979, Laghman  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 5532836644  
 Faks :  
 e-mail : zakirhussainfar@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Elek & Elektronik Müh	Devam Ediyor
Lisans	Kabul Polytechnic Ün./ Elek & Elekt. Müh	2003
Lise	Amarkhil Lisesi	1992

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-Hale	Kabul Polytechnic Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

### Yabancı Dil

İngilizce,

### Hobiler

Voleybol, Kitap okuma



*GAZİ GELECEKTİR..*