

T.C.
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HOUSEHOLDER YÖNTEMİ İLE GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ İNCELENMESİ

ASGHAR SABATI MOKARRAMI

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TEMMUZ 2019


GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

HOUSEHOLDER YÖNTEMİ İLE GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ İNCELENMESİ

Asghar SABATI MOKARRAMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2019

Asghar SABATI MOKARRAMI tarafından hazırlanan "HOUSEHOLDER YÖNTEMİ İLE GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR .....

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Başkan: Prof. Dr. Kamil Çağatay BAYINDIR .....

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

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

Üye: Prof. Dr. Erdal IRMAK .....

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 08/07/2019

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
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.



Asghar SABATI MOKARRAMI

08/07/2019

HOUSEHOLDER YÖNTEMİ İLE GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Asghar SABATI MOKARRAMI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2019

ÖZET

Küçük sinyal (veya küçük bozulma) kararlılığı, güç sisteminin yükler ve üretimdeki küçük farklılıklar gibi küçük arızalar altında senkronizasyonu sürdürme ve kararlılığı sağlama yeteneğidir. Fiziksel olarak güç sistemi kararlılığı genel olarak iki ana kategoride sınıflandırılabilir. Bu kategoriler, açı kararlılığı veya rotor açısı kararlılığı ile gerilim kararlılığıdır. Açı kararlılığı veya rotor açısı kararlılığı, "bir güç sisteminin birbirine bağlı senkron makinelerinin senkronizasyonda kalması-kararlılığını koruması" olarak tanımlanabilir. Bu kararlılık problemi, güç sistemlerinde bulunan elektromekanik salınımların çalışmasını içerir. Buradaki temel mesele, senkron makinelerin güç çıkışının, rotorlarının salınımı ile değişmesidir. Küçük bozulma gerilimi kararlılığı kavramı, kararlı durumun stabilitesi ile ilgilidir ve sistemin küçük sinyalli (doğrusallaştırılmış) modeli kullanılarak analiz edilebilir. Bu tez çalışması, özellikle sabit durum/dinamik kararlılık alt başlığına ve küçük bir bozulmayı takiben bir güç sisteminin dinamik kararlılığını analiz ve kontrol etmek için kullanılabilecek tekniklere odaklanmıştır. Özellikle çok fazla sayıda senkron jeneratör bulunan şebekede bir jeneratörde meydana gelen arıza diğer senkron jenaratörleri de etkileyecektir. Bu durum fazla sayıda değişken içeren şebekede arızanın bulunmasını veya çözümünü zorlaştıracak ve tüm sistemin kararlığını etkileyecek büyük bir problem haline gelecektir. Tezde önerilen Küçük Sinyal Kararlılığı analizi yöntemlerinden Householder yöntemi ile bu karmaşık sistemde büyük matrislerin çözümü daha kolay yapılabildiği için arızanın bulunması ve temizlenmesi çok kısa sürede yapılabilecektir. Bu kapsamda senkron jeneratörün farklı rotor açısı sapması örneklerinde benzetimler yapılarak rotor açı kararlığı 5 dereceye kadar sapmalarının düzeltimesini sağlayarak sistemin kararlı bir şekilde çalışmasına imkan sağlamış ve sistem kendi kararlılığını korumuştur.

Bilim Kodu : 90532

Anahtar Kelimeler : Rotor Açısı, Küçük Sinyal Kararlılığı, Householder Algoritması

Sayfa Adedi : 162

Danışman : Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR

ANALYSIS OF SMALL SIGNAL STABILITIY WITH THE HOUSEHOLDER METHOD IN POWER SYSTEMS

(M. Sc. Thesis)

Asghar SABATI MOKARRAMI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2019

ABSTRACT

Small signal (or small disturbance) stability is the ability of the power system to maintain synchronization and stability under minor faults, such as small differences in load and production. In general, physical power system stability can be classified into two main categories. These categories are angle stability (rotor angle stability) and voltage stability. Angle stability can be defined as 'to remain in synchronism or the stability of the interconnected synchronous machines in a power system'. This stability problem involves the operation of electromechanical oscillations in power systems. The concept of small disturbance voltage stability is related to the stability of the steady state and can be analyzed using the small-signal (linearized) model of the system. Angle stability category can be evaluated under two subheadings. Temporary state / Transient: The instability here is due to the lack of synchronization after large disturbances such as system failures or equipment shortages. The purpose of transient stability studies is to determine whether the machines in a system will return to a stable synchronized state after a large disturbance. This thesis will focus on steady state / dynamic stability sub-title and techniques that can be used to analyze and control the dynamic stability of a power system, especially following a small disturbance. In particular, the failure of one generator among the network with a large number of synchronous generators will affect other synchronous generators. This will become a major problem that will make it difficult to find or solve the fault in the network containing too many variables and that will affect the stability of the entire system. Since the solution of large matrices can be done easier in this complex system with Householder method, one of the small signal stability analysis methods and which is suggested in the thesis, the detection of error and troubleshooting can be done in a shorter period. In this context, samples of different rotor angle deviations of synchronous generator have been performed by simulating rotor angle stability deviations up to 5 degrees, allowing the system to operate stably and the system has maintained its stability.

Science Code : 90532

Key Words : Rotor Angle, Small Signal Stability, Householder Algorithm

Page Number : 162

Supervisor : Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca beni bu alanda yetiştiren, çalışmalarım boyunca değerli zamanını ayırıp beni yönlendiren, güler yüzü ve yaklaşımıyla bu çalışmayı severek yapmamı sağlayan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR'a can-ı yürekten teşekkür ederim.

Sevgili annem ve babama hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmamda da dualarını esirgemedikleri ve desteklerini her zaman hissettirdikleri için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

2. GÜÇ SİSTEMİNİN TARİHÇESİ 7

2.1. DA Sistemindeki Problemler 7

2.2. Güç Sistemlerinin Genel Tanımı 7

2.3. Arz ve Güven Kabiliyeti 8

2.3.1. Uygun kalite ile elektrik enerjisinin arzı 8

2.4. Güç Sistemlerinin Yapısı 9

2.4.1. Üretim 9

2.4.2. İletim 10

2.4.3. Talep veya kullanım bölümü 12

2.5. Güç Sistemi Bileşenleri 12

2.5.1. Senkron jeneratör 12

2.5.2. Türbin ve governor 13

2.5.3. Transformatör merkezleri 14

2.5.4. Şalt sahalarının görevleri 14

2.5.5. Transformatörler 14

2.5.6. Seri ve paralel kondansatörler 14

Sayfa

2.6. Güç Sistemlerinin FACTS (Flexible AC Transmission System) Bileşenleri 15
2.6.1. FACTS özellikleri ve SVC (Static Var Compensator) tanımı 16
2.6.2. HVDC (High Voltage Direct Current) hatları 16
2.6.3. AA güç sistemlerinin genel özellikleri 18
2.6.4. Modern AA güç sistemlerinin genel özellikleri 18
2.6.5. Güç sistemlerinin bölgelere göre sınıflandırılması 19
2.6.6. Elektrik şebekelerinin birbirine bağlanmasının avantajları 19
2.6.7. Yük fazlalığı eğrisini düzeltme 20
2.7. Güç Sistemlerinin Kontrolü 22
2.7.1. Güç kontrol sistemlerinde etkin kontrolü sağlayan konular 22
2.7.2. Güç kontrol sistemleri kontrolünün aşamaları 23
2.7.3. Güç kontrol sistemlerinin arıza analizi 24
3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE DİNAMİKLER VE GERİLİM KARARLILIKLARI 25
3.1. Dinamik Sistemlerin Tanımı 25
3.1.1. Dinamiklerin sınıflandırılması 25
3.1.2. Güç sistemlerinde dinamik etikilerin oluşma sebebi 26
3.1.3. Güç sistemlerinde depolayıcı etki oluşturan etkenler 27
3.1.4. Güç sistemlerinin dinamik modları 27
3.1.5. Güç sistemlerinde dinamik arıza kategorileri 27
3.1.6. Statik (dinamik olmayan sistem) tanımı 28
3.2. Güç Sistemlerinde Kararlılık 29
3.2.1. Güç sistemlerinde kararlılığın sınıflandırılması 29
3.2.2. Senkronizasyon analizi 30
3.2.3. Rotorun mekanik hızı 30
3.2.4. Rotorun elektrik güç-açı ilişkisi 30

Sayfa

3.3. Sonsuz Baraya Bağlı Olan Tek Jeneratörlü Bir Güç Sisteminin Modellenmesi 34

3.3.1. Sonsuz baranın tanımı 34

3.4. Zıt Güçler Arasındaki Kararlık-Denge 38

3.5. Senkron Edici ve Sönümleyici Momentumlar 40

3.5.1. Güç sisteminde senkron edici ve sönümleyici momentumların eksikliği 40

3.6. Rotor Açısının Kararlılığı..... 41

3.6.1. Rotor açısının kararlılığının sınıflandırılması 41

3.6.2. Küçük Sinyal Kararlılığı incelemesinde dikkat edilmesi gereken önemli faktörler 42

3.6.3. Bir güç sisteminde Küçük Sinyal Kararlılığının iyileştirilmesi için kullanılan yöntemler 43

3.7. Geçici Sinyal Kararlılığı 44

3.8. Güç Sistemlerinde Kısa Devre Çeşitleri 44

3.9. Güç Sistemlerinin Dinamik Kararlılığı 44

3.10. Frekans Kararlılığı 45

3.11. Gerilim Kararlılığı ve Çöküşü 45

3.12. Gerilim Kararlılığının Sınıflandırılması..... 46

4. UYARMA SİSTEMİNİN DİNAMİK FONKSİYON KRİTERLERİ 49

4.1. Güç Sistemlerinde Kararlılığın İyileştirilmesi..... 49

4.1.1. Büyük Sinyal Kararlılığı fonksiyonuna ait olan kriterler 49

4.1.2. Küçük Sinyal Kararlılığı fonksiyonuna ait kriterler..... 50

4.2. Küçük Sinyal Kararlılığında Frekans Yanıtı İndeksleri..... 52

4.2.1. Frekans indekslerinin küçük sinyal kararlığında gruplandırılması 52

4.3. Küçük Sinyal Kararlılığında Uyarma Sisteminin Kontrolü ve Koruma Fonksiyonları 52

4.4. PSS'nin Genel Diyagramı 55

4.5. PSS ve AVR'nin Genel Farkı..... 56

Sayfa

4.6. Küçük Sinyal Kararlılığı 56

4.6.1. Küçük Sinyal Kararlılığının özellikleri 56

4.6.2. Tek makine ve sonsuz bara (Signal Machine Infinite Bus - SMIB) sisteminde Küçük Sinyal Kararlılığı 57

4.6.3. Küçük Sinyal Kararlılığında denklemlerin lineer yapılma modeli 58

4.7. Senkron Jeneratörlerde Uyartım Sistemi ve 4. Dereceden AVR Modellenmesi 66

4.8. SMIB Sistemi için Heffron-Phillips'in Eksiksiz Modeli 69

4.8.1. Heffron-Phillips modelinin uzay düzlemindeki diyagramı 70

4.9. Rotor Açısı Küçük Sinyal Kararlılığında Uyarma Sisteminin Rolü 72

4.10. AVR'nin Küçük Sinyal Kararlılığı Üzerindeki Etkisi 73

4.11. Gücün Stabilizasyonu 73

4.12. SMIB Sistemi için PSS'nin Tasarlanması 73

4.13. PSS'nin Uygulama Şeması 76

5. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ UYGULANMASI 77

5.1. Dinamik Sistemlerin Kontrolü 77

5.1.1. Dinamik bir sistemin lineer edilmesi 80

5.2. Dinamik ve Lineer Kontrol Sistemleri 82

5.3. Senkron Makinelerin Dinamiği ve Küçük Sinyal Analizi 83

5.4. PSS'le İlgili Olan Sistem Denklemleri 97

5.4. Çok-Makineli Senkron Sistemler 103

5.5. Küçük Sinyallerin Büyük Ağlarda Bıraktığı Etki 104

5.6. Güç Yöntemi 118

6. HOUSEHOLDER YÖNTEMİ İLE GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ İNCELENMESİ 119

6.1. Homolog Dönüşümler ve QR Algoritması 119

6.2. Householder Yöntemi ile Güç Sistemlerinde Küçük Sinyal Kararlılığı 120

Sayfa

6.3. MATLAB'da Uygulama 122

6.4. Modelleme ve Sistem Analizi 122

6.5. Küçük Sinyal Kararlılığının Tamamlayıcı Açıklamaları 132

6.6. Güç Sistemlerinde Küçük Sinyal Kararlılığını İyileştirmek için Bazı Çözümler 133

6.7. Küçük Sinyal Kararlılığın İyileştirilmesi 133

6.8. Önerilen Çözüm Yönteminin Değerlendirilmesi 135

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 137

KAYNAKLAR 139

EKLER 141

Ek-1. Şekil 5.2, denklem 5.32 Sisteminin ana verilerine ait konum diyagramının MATLAB kodları 142

Ek-2. Çizelge 5.1'e ait rotorun açı ve hız değişimlerinin 10 saniyeye kadar MATLAB kodları 143

Ek-3. Şekiller 5.3-5.5'e ait sistemin kararsızlığının zamanla doğrusal ilişkisini gösteren MATLAB kodları 144

Ek-4. Şekil 5.6'daki senkron jeneratörün hız-rotor açısı ve manyetik akı diyagramının MATLAB kodları 145

Ek-5. Şekil 5.7, denklem 5.21 sisteminde λ'nın KD ile olan ana verilerinin gerçek kısımlarının konum diyagramı MATLAB kodları 146

Ek-6. Şekil 5.8 ve denklem 5.53'teki sisteme ait MATLAB kodları 147

Ek-7. Şekiller 5.9'dan 5.14'e kadar sistemin ana verilerine ait H değişimi ile KD kararlılığının MATLAB kodları 148

Ek-8. Şekil 6.2'den şekil 6.8'e kadar karmaşık düzlemde 24 üncü ana verilerinin $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ kararlılık değişimini $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları 150

Ek-9. Şekil 6.9'dan şekil 6.14'e kadar olan $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ parametrelerinde rotor Açısını $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları 156

ÖZGEÇMİŞ 166

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.1. Sistem ana verileri 89

Çizelge 5.2. Güç akış tablosu 113

Çizelge 6.1. Sistem matrisinin ana verilerine ait reel ve imajiner kısımlar..... 124

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Elektriksel güç sisteminin yapısı 9
Şekil 2.2. Güç üretim biriminin blok şeması 10
Şekil 2.3. İletim hatlarında güç kaybı 11
Şekil 2.4. Gerilim düzeyi diyagramı 11
Şekil 2.5. Gerilim düzeyi tek hat diyagramı 12
Şekil 2.6. Türbin ve governor şeması 13
Şekil 2.7. Seri ve paralel kondansatörler 15
Şekil 2.8. FACTS elementleri SVC devresi 16
Şekil 2.9. HVDC hat şeması 17
Şekil 2.10. İki bölgeni farklı frekanslarla besleme bağlantısı 17
Şekil 2.11. Puant yük eğrisi 20
Şekil 2.12. Avrupa uluslararası elektrik ağ bağlantısı 21
Şekil 2.13. Japonya milli elektrik şebeke ağ bağlantısı 21
Şekil 2.14. Avrupa elektrik şebeke bağlantısı 22
Şekil 2.15. Senkron jeneratör kontrol sisteminin genel şeması 23
Şekil 2.16. Güç kontrol sistemlerinin arıza analiz şeması 24
Şekil 3.1. Lineer dinamik sistem sinyali 25
Şekil 3.2. Güç sistemlerinde dinamik arıza kategorileri 28
Şekil 3.3. Lineer olmayan statik sistem sinyali 28
Şekil 3.4. Güç sistemlerinin kararlılığını belirleyen yöntemler 29
Şekil 3.5. Rotor güç-açı ilişkisi 31
Şekil 3.6. Rotor güç-açı ilişkisi tek hat şeması 31
Şekil 3.7. Aktarılan güç fazör diyagramı 32
Şekil 3.8. Enerji rezerve eğrisi 34

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.9. SMIB sistem tek hat diyagramı 34
Şekil 3.10. Güç sistemlerinde seri kondansatör 38
Şekil 3.11. Güç sisteminde hata sonrası rotor açısı değişimi 40
Şekil 3.12. Senkron jeneratör rotor açı dengesizliği 42
Şekil 3.13. Senkron jeneratör momentum eksikliği 42
Şekil 3.14. Senkron jeneratör sönümleyici momentum eksikliği 43
Şekil 3.15. Geçici karasızlık ve küçük sinyal kararlılığı 44
Şekil 4.1. Güç sisteminde kalıcı durumda sistemin durumu 51
Şekil 4.2. Kapalı kontrol halka sistem bloğu 52
Şekil 4.3. Açık kontrol halka sistem bloğu 52
Şekil 4.4. Uyarma sisteminin kontrol şeması 53
Şekil 4.5. Uyarma sisteminin kontrol şeması 54
Şekil 4.6. PSS genel kontrol bloğu 55
Şekil 4.7. PSS genel kontrol kontrol bloğu 55
Şekil 4.8. Sonsuz bara tanıtım diyagramı 57
Şekil 4.9. SMIB sisteminin klasik model devresi 57
Şekil 4.10. SMIB sisteminin klasik model bloğu 60
Şekil 4.11. SMIB sistem ve ona bağlı paralel hat devresi 62
Şekil 4.12. Örnek SMIB sistem tek hat diyagramı 63
Şekil 4.13. Kompleks sayfa sınırında kararlılığı 65
Şekil 4.14. Senkron jeneratörlerde uyartım sistemi 4.dereceden blok şeması 66
Şekil 4.15. SMIB sistemine yüklü ve yüksüz tek hat diyagramı 68
Şekil 4.16. Heffron-Phillips'in genel modeli 70
Şekil 4.17. Newton'un ikinci yasasına göre senkron jeneratörün rotor hareket şeması . 72
Şekil 4.18. Heffron-Phillips modelinin PSS blok diyagramı 74
Şekil 4.19. Güç sistemlerinde genel PSS blok diyagramı 76

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.20. İşlemsel kuvvetlendiriciler ile PSS tasarımı 76

Şekil 5.1. Birleştirilmiş 4 adet senkron jeneratör ve sonsuz baraya bağlı olan paralel enerji nakil hattı 83

Şekil 5.2. Sistem ana verilerinin reel kısımlarına ait konum grafiği..... 88

Şekil 5.3. Rotor açısı ve hız değişimı..... 91

Şekil 5.4. Kararlılık ve kararsızlık arasında dalgalanan sistemin yanıtı 92

Şekil 5.5. Kararsızlığın zamanla doğrusal ilişkisi olan sistem yanıtı..... 93

Şekil 5.6. Hız-rotor açısı ve manyetik akı grafiği..... 95

Şekil 5.7. λ'nın KD ile olan reel kısmı 96

Şekil 5.8. Sistem kararlılığının 10 saniyeye kadar yanıtı 99

Şekil 5.9. Sistem Ana verilerinin konum değişimi 100

Şekil 5.10. Sistemin ikinci ana verilerine ait hakiki kısımların konum değişimi 101

Şekil 5.11. Sönümleyici katsıyısı aralığında, üçüncü ana verilerine ait reel kısımların konum değişimi..... 101

Şekil 5.12. Sönümlendirici katsıyısı aralığında, dördüncü ana verilerine ait reel kısımların konum değişimi..... 102

Şekil 5.13. Sönümlendirici katsıyısı aralığında, beşinci ana verilerine ait hakiki kısımların konum değişimleri..... 102

Şekil 5.14. Sönümlendirici katsıyısı aralığında, altıncı ana verilerine ait reel kısımların konum değişimleri..... 103

Şekil 5.15. Güç sisteminin küçük sinyal topolojisi..... 112

Şekil 5.16. İki bölgeli standart IEEE güç sisteminin tek hat şeması..... 113

Şekil 5.17. Mevcut baralardakı gerilim. 115

Şekil 5.18. Mevcut baralardakı faz ölçümleri..... 115

Şekil 5.19. Güç sistemindeki kararsızlığa sebebiyet veren tahmini bölgeler 115

Şekil 5.20. 11 baralı güç sistemi 116

Şekil 5.21. Mevcut baralardakı gerilim..... 116

Şekil 5.22. Mevcut baralardakı faz ölçümleri..... 116

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.23. Güç sistemindeki kararsızlığa sebebiyet veren mod tahmini bölgeler 117

Şekil 5.24. PSS sistem bloğu MATLAB kodları 117

Şekil 5.25. Güç sistemindeki PSS içermeyen ve kararsızlığa sebebiyet veren bölgeler 118

Şekil 6.1. 20 baralı güç sistemi 123

Şekil 6.2. Karmaşık yüzeyde 24'üncü ana verilerinin konumu 124

Şekil 6.3. Güç sistemindeki jeneratörlerin sönümleyici momentum $\Delta\omega$ kararlılığı 125

Şekil 6.4 Güç sistemindeki jeneratörlerin $\Delta\delta$ senkron edici momentum kararlılığı ... 125

Şekil 6.5. Güç sistemindeki jeneratörlerin $\Delta\delta$ senkron edici momentum kararlılığı ... 126

Şekil 6.6. Güç sistemindeki jeneratörlerin $\Delta\psi_{fd}$ kararlılığı 127

Şekil 6. 7. Güç sistemindeki jeneratörlerin Δv_1 kararlılığı 127

Şekil 6.8. Güç sistemindeki jeneratörlerin Δv_2 kararlılığı 128

Şekil 6.9. Güç sistemindeki jeneratörlerin Δv_s kararlılığı 128

Şekil 6.10. Güç sistemindeki jeneratörlerin $\Delta\omega$ değişimleri 129

Şekil 6.11. Güç sistemindeki jeneratörlerin $\Delta\delta$ değişimleri 129

Şekil 6.12. Güç sistemindeki jeneratörlerin $\Delta\psi_{fd}$ değişimleri 130

Şekil 6.13. Güç sistemindeki jeneratörlerin Δv_1 değişimleri 130

Şekil 7.14. Güç sistemindeki jeneratörlerin Δv_2 değişimleri 131

Şekil 6.15. Güç sistemindeki jeneratörlerin Δv_2 değişimleri 131

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{R_a}$	Her Faz İçin Armatür Direnci
$\Delta\delta$= **D delta**	Rotor Açı Değişimi
$\Delta\omega$=**D Omega**	Rotor Hızı Değişimi
$\Delta\psi$**fd= D Pesi_fd**	Manyetik Alan Değişimi
γ	Stator Çevresinde Bulunan a Fazı Açısı
θ	Açısı İse Rotor ve Stator Pozisyonuna Bağlı Olan Bir Açı
θ	d ve a Faz Arasındaki Açı
β	Faz Sabiti
γ	Propagasyon (Yayılma) Sabiti
δ	Rotor Açısı
α	Zayıflama Sabiti
$\varphi_{L1}, \varphi_{L2}$	Kaçak Akı
δ_m	Rotorun Açısı (rad)
$\varphi_{m1}, \varphi_{m2}$	Bağlantı Akısı
$\mathbf{\Delta E_{fd}}$	Jeneratörün Uyarma Sistemi
$\mathbf{S_1, S_2}$	Sistem Kutupları
$\mathbf{k_S(\Delta E'_q)\Delta\delta}$	Senkron Edici Momentum
$\mathbf{k_D(\Delta E'_q)}$	Kararlaştırıcı Momentum
ω_n	Kararlık Frekansı
ω_s	Statordaki Akımın Açısal Hızı
$\mathbf{X_L}$	Hat Reaktansı
$\mathbf{a'}$	Kararsız İş Noktası
$\mathbf{X_g}$	Motor Reaktansı
$\mathbf{P_f}$	Kutupların Uyartım Sayısı
$\mathbf{\Delta_g}$	Senkron Jeneratörünün Rotor Akısı, Stator Akısından İleri durumu

Simgeler	Açıklamalar
X_T	Toplam Reaktans
$T_s\Delta\delta$	Senkron Edici Momentum
Y_{ii}	Barasına Bağlı İndüktansların Sayısı
TD $\Delta\omega$	Sönümleyici Momentum ($\Delta\omega$ ile aynı faza sahiptir)
T_s	Senkron Edici Momentumun Katsayısı
a	Kararlı İş Noktası
a , b , c	Statorda Bulunan Sargıların Fazları
d ekseni	Uyartım Sargısının İçinden Geçen Eksen
e_a , e_b , e_c	Statorun Geçici Faz Gerilimi
efd	Uyartım Gerilimi
e_{fd}	Uyartım Akımı
E_{fd}	Rotordaki Uyartım İsteminin Gerilimi
Em	Senkron Motoru Terminal Gerilimi
ET_1	Terminal Gerilimi
f_d	Uyartım Sargısı
H	Eylemsizlik Katsayısı
H	Atalet Sabiti
i_a , i_b , i_c	Statorun Geçici Faz Akımları
ifd	Uyartım Akımı
i_{fd}, i_{kd}, i_{kg}	Uyartım ve Sönümleyici Akımları
δ_L	Jeneratör Bara Terminal Gerilimleri ve Rotor Akısı
X_m	Jeneratör Reaktansı
K	Rotor Üzerindeki Sargı Sayısı
K_D	Kararlaştırıcı Momentum Katsayısı (Kararlaştırıcı)
k_d , k_q	d , q Eksenlerindeki Sönümleyici Sargıları
K_{PSS}	PSS Verimi
K_s	Senkron Edici Momentum Katsayısı
kV	Kilovolt
kVA	Kilovolt Amper
L	Hattın Toplam Uzunluğu
Δ_m	Motorun Dahili Rotor Açısı
n	Sönümleyici Devrelerinin Sayısı

Simgeler	Açıklamalar
N	Bara Sayısı
n_s	Senkron Hız (rpm)
o	Türev
P	Aktif Güç
Pe	Tamamen Doğrusal Olmayan Bir Fonksiyon
Pe	Hava Aralığındaki Güç
P_f	Rotor Üzerindeki Kutup Sayısı
Pm	Mekanik Güç
Pm	Şafta Uygulanan Güç
q	"d" Ekseninden 90° İleride Veya Geri
Q	Reaktif Güç
R	Direnç
Ra	Rotor Sargılarının Direnci
R_c	Jeneratör Terminalinin Direnci
R_{fd}	Uyartım Direnci
R_{kd} R_{kq}	Sönümleyici Sargılarının Direnci
S	Görünür Güç
T	Momentum
TD	Sönümleyici Momentumun Katsayısı
T_d', T_q'	Senkron Jeneratörde Kısa Devre Transient Eksenleri
T_d'', T_q''	Subtransient Durumda En ve Boy Eksenleri
$T'd_o$, T'_{qo}	Açık Devrelerdeki Transient Eksenleri
T_{do}'', T_{qo}''	Subtransient Açık Devredeki Eksenler
T_{rest}	Filtre Bloğu
V	Volt
X_c	Jeneratör Terminalinin İndüktansı
X_d , X_q	Senkron Jeneratörünün En ve Boy Eksenlerinin Reaktansı
X'_d , X'_q	Senkron Jeneratörlerdeki Geçici Reaktanslar (Transient)
X''_d , X''_q	Senkron Jeneratörlerdeki Subtransient Reaktanslar
X_L	Hat Reaktansı
X_m	Senkron Motoru Reaktansı
y	Birim Uzunluktaki Hattın Şönt Admitansı

Simgeler	Açıklamalar
Y	Toplam Şönt Admitansı
Yc	Karakteristik Admitans
y_{ij} i ve j	Ortak Admitanslar Arasındaki Fark
z	Birim Uzunluktaki Hattın Seri Empedansı
Z	Toplam Seri Empedans
Zc	Karakteristik Empedans
$\Delta E'_q$	Uyarma Sisteminden Kaynaklı Alan Geriliminin Değişimi
ΔU_{PSS}	PSS'den Uyarma Sistemine Giren Sinyaller
$\Delta\omega$	Rotor Açısının Hız Değişimi
ΔTm	Giriş Mekanik Momentum
ΔV	Uyarma Alanı
$\Delta\delta$	Rotor Açısının Değişimleri
$\Delta\delta, \Delta\omega$	Rotor Açısı ve Sönümleyici Değişimi
ρ	Güç Kaybı
φ	Manyetik Akı Yoğunluğu
ω_r	Rotorun Açısal Hızı (rad/s)
ω_{sm}	Senkron Jeneratörünün Hızı
ξ	Kararlılık Oranı
ω	Açısal Hız

Kısaltmalar	Açıklamalar
AA	Alternatif Akım
AVR	Automatic Voltage Regulator (Otomatik Gerilim Regülatörü)
DA	Doğru Akım
DFIG	Doubly-Fed Induction Generator (Çift Beslemeli İndüksiyon Jeneratörü)
FACTS	Flexible AC Transmission System (Esnek AA İletim Sistemi)
GES	Güneş Enerji Santralı
GSKK	Güç Sistemini Kararlı Kılıcılar
HVDC	High Voltage Direct Current (Yüksek Gerilim Doğru Akım Hattı)

Kısaltmalar	Açıklamalar
MATLAB	Matrix Laboratory
MW	Mega Watt
PSAT	Power System Analysis Tool Box (Güç Sistem Analizi Araç Kutusu)
PSS	Güç Sistemi Simülatörü
Ref	Referans
RES	Rüzgar Enerji Santrali
RPM	Sabit Bir Eksende 1 Dakika daki Dönme Hızı
SVC	Static Var Compensator (Static Var Kompansatör)

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji, günden güne büyüyen şehirleşme ve çevresel şartlar enerji sistemlerini kararlılık limitine yakın sınırlarda çalışmaya zorlamıştır. Bu da gerilim kararlılığı konusuna verilen önemi arttırmış ve gerilim kararlılığı konusu çok daha fazla önem arz eder hale gelmiştir. Bir güç sisteminin kararlılığı sürekli ya da geçici yük baralarının genliklerini belirli sınırlar içerisinde tutabilme yeteneğidir. İlaveten, gerilim kararlılığı, bahse konu güç sistemlerinin bozucu bir etkiyle karşılaştığında eski kararlı hale dönebilme ve tüm baralardaki gerilimi belirli seviyede tekrar tutabilme yetisidir. Bir sistemin kararlı bir sistem olarak nitelendirilebilmesi için gerekli kriterlerden biri ise o sistemde bir baraya verilen gücün sayısal olarak artması durumunda, o baradaki gerilimin genliğinin de artması ve bu sürecin sistemdeki diğer bütün baralar için benzer şekilde ilerlemesidir. Eğer sistemdeki baralardan herhangi birinde o baraya verilen reaktif güç arttığı halde gerilim genliği artmıyorsa, bu sistemde gerilim kararsızlığının mevcut olduğu söylenebilir. Diğer bir deyişle, her bir bara için V-Q duyarlılığı doğru orantılı veya pozitifse, sistem gerilim bakımından kararlı; en az bir bara için V-Q duyarlılığı negatifse, sistem gerilim bakımından kararsızdır. Güç sistemlerinin gerilim kararlılığı durumuna ulaşamamasına "gerilim çökmesi" adı verilir ve söz konusu gerilim çökmesi aşırı yüklenme, arızalanma veya yetersiz reaktif güç durumlarında oluşur. Son yıllarda gerilim kararlılığı problemi, yani gerilim çökmesi, çoğu enerji sistem ağının arızalanmasına ve kullanılamaz hale gelmesine neden olmuştur. Bu olumsuzluklar, gerilim kararlılığı konusundaki çalışmaların artmasını da beraberinde getirmiştir. Bazı büyük gerilim çökmesi olayları şöyledir:

- 1997 Şili sistem arızası
- 1990 Mısır sistem arızası
- 1982 Florida arızası
- 1983'te İsviçre'deki iki adet 400 kV'lik hattın kopması
- 2003 Amerika-Kanada arasında meydana gelen sistem arızası
- 2005 Avustralya ve Rusya sistem arızaları
- 2006 Yeni Zelanda sistem arızaları
- 1986 İngiltere'de altı adet 400 kV'lik hattın fırtınadan dolayı kopması sonucunda beş dakika içinde gerilim seviyesinin 352 KV'ye düşmesi bunu kurtarmak için ise 1000

MW'lik bir santralın bir anda devreye girmesi ve meydana gelen kararsızlığın düzeltilmesi.

- 1982'de Belçika'da 700 MW'lik bir üretim santralinin durması, 45 dakika sonrasında aşırı yükten dolayı iki adet santralin tekrar devre dışı kalması, onun peşinden üç dakika sonra aşırı yüklenmeden dolayı üç adet üretim santralinin devreden çıkması, ardından empedans rölesinin açılmasından dolayı birkaç tane sistemin devre dışı kalması ve sonuçta güç sisteminin tamamen çökmesine sebep olması (Dhuness, 2012; Lindell, 1988).

Jeneratör, hat, transformatör, bara ya da sistemdeki diğer elemanların herhangi bir sebeple devre dışı kalması, gerilim kontrollerinin sağlanamaması veya yükün taşınabilir kapasitenin üstüne çıkması durumlarında istenmeyen gerilim düşüşü oluşursa güç sisteminin kararsızlığı söz konusu olur ve böyle bir durumda gerilim çökmesi yaşanabilir. Bu çökmelerin esas nedeni, gerilimi belirli bir değerde tutmaya çalışan sistemin yeterli reaktif enerjiyi sağlayamamasıdır. Böyle bir gerilim çökmesi durumunda yapılması gereken, hangi elemanın sistemi kararsızlığa götürdüğünün, buna yol açan nedenlerin ve mümkünse nasıl oluştuğunun iyice araştırılmasıdır. Gerilim kararlılığı konusunda günümüzde farklı yaklaşımlar mevcut olup, konu halihazırda analiz edilme süreci içerisindedir. Elektrik enerjisinin öneminin anlaşılmasından sonra pek çok elektrik üretim sistemi kurulmuştur. Bunlara örnek olarak rüzgâr enerji santralleri (RES) ya da güneş enerji santralleri (GES) verilebilir. Tüm bu sistemler için ise gerilim kararlılığı oldukça önemli bir başlıktır.

Küçük Sinyal Kararlılığı, sistemin karşılaştığı bozucu etkilerin ardından bozucu fazları kısa sürede sönümleyebilmesi ve sonrasında eski haline dönebilmesi yeteneğidir. Burada ana kriter şöyledir: şayet sistem bozucu etkiden kurtulduğunda üretim-tüketim oranları birbirine yakınsa, sistem ilk denge durumuna geri ulaşmalıdır. Öte yandan, eğer sistemin enerji üretiminde ya da tüketiminde farklı bir durum varsa, sistem kendisine sınırlı bir sürede yeni ve kabul edilebilir bir kararlılık noktası bulmalıdır. Sistemler genel olarak bir ya da birden fazla jeneratör içerebilirler. Eğer bir sistem birden fazla jeneratör içeriyorsa, bozucu etki sonrası bütün jeneratörlerini dengeli duruma getirmelidir. Ayrıca jeneratörlerin de yeterli miktarda güç üretebiliyor olmaları gerekmektedir. Eğer sistem bu gereksinimleri karşılayamazsa baralar arasında dengesizlikler meydana gelir ve sistemde kopma veya çökme gibi durumlar yaşanır. Böyle zamanlarda jeneratörlerin rotor hızlarını kontrol etmek ve çökmelerin önüne geçmek için sistemlere dengeleyiciler eklenmiştir. Bu dengeleyicilere

dilimizde “Güç Sistemini Kararlı Kılıcılar” (GSKK) denir. GSKK’ların amacı jeneratörlerdeki dengesizlikleri önlemek ve bu sayede güç kesintilerinin önüne geçmektir. Bu yöntem uzun yıllardır en çok kullanılan yöntemdir. GSKK’ların çalışma prensipleri genel olarak bir sistemdeki küçük bozucuların etkilerinden geriye kalan küçük fazlı ve genlikli salınımları sönümleyerek, sistem çalışmasını dengelemek şeklindedir. Ancak bu noktada önemli olan GSKK tasarımıdır. Bu kapsamda GSKK’nın çalışma noktası değişse de sistem çalışabilir hale gelmelidir. Bu tez çalışmasında Küçük Sinyal Kararlılığını yapmakla büyük güç sistemlerinde bazı avantajları ele alınmıştır. Küçük Sinyal Kararlılığının faydalarından birincisi sistemde mevcut olan her senkron jeneratörünün çalışma noktası etrafında lineer yapıla bilmesidir halbuki geçici kararlılıkda diferansiyel denklemlerinin adım adım çözülmesi gerekir, meydane gelen arızadan önceki sisteme hakim olan diferansiyel denklemler (pre fault) arıza sırasında güç sistemine hakim olan denklemler (during fault) ve arızadan sonrakı (post fault) güç sistemine hakim olan denklemlerin çözülmesi gerekir ve bu zaman dilimlerinde sistemde koruma rölelerinin çalışmadığı takdirde sistem senkronize durumunu kaybedecektir. Rölelerde hatadan sonrakı tepki zamanının belirlenmesi (cleaning time), güvenlik indeksinin (security index) belirlenmesi diferansiyel denklemlerinin adım adım çözülmesi suretiyle bile mümkün değildir. Kritik zamanın bulunması için tüm meydana gelen hata durumlarında sistemin birkaç defa simüle edilmesi gerekmektedir. Bu çok zaman kaybına neden olacaktır, sistemin davranışının hatalara karşı incelenmesi, müdahale etme süresini azaltacaktır ve zaman kaybına neden olacaktır. Halbuki Küçük Sinyal Kararlılığının inceleme zamanı 10 ve 20 saniye arasındadır. Küçük Sinyal Kararlılığında matematiksel olarak sistemin kararlılığını ana veriler ile çok kolay bir şekilde yapılabilmektedir ve hesaplamalar sonucunda bile verilerin incelenmesine gerek kalmadan, sadece verilerin pozitif veya negatif olması sistemin kararlılığının incelenmesinde yeterli kalacaktır.

Güç sistemi küçük-sinyal elektromekanik dinamik özellikler genellikle lineer sistem kavramlarını kullanarak tarif edilir (Taylor, 1994). Son yirmi yılda sadece zaman senkronizeli gerçek sistem ölçümlerini kullanarak modal analizi yapmak için çok sayıda sinyal işleme tekniği geliştirilmiştir. Örnekler arasında Bilgisayar simülasyonları ve gerçek sistem deneyleri vardır. Analizin amacı modal frekansı, sönümleme ve şekil dahil olarak sistemin modal özelliklerini tahmin etme odaklıdır. Bu kapsamda Bölüm 6’da tanımlanan sinyal işleme algoritmalarının çoğu gelişen birkaç yazılım aracının esasıdır. Bu araçların çoğunluğu çevrim dışı veya bozunum sonrası ortamda gridin mühendislik analizini yapmak için kullanılır (bpa.gov, 2019). Yakın zamanda çevrimiçi gerçek zamanlı yazılım araçları ve

uygulamaları geliştirilmiştir (Abe ve Isono, 1976). ve bunlar güç sistemi topluluğu için araştırma odağı olmaya devam edecektir. Bir güç sisteminin modal özelliklerinin gerçeğe yakın zamanlı operasyonel bilgisi de kontrol kararları için kritik bilgiler sunabilir ve böylece daha yüksek yükleme seviyelerinde güvenilir grid operasyonuna imkan tanıyabilir. Bilindiği üzere gerilim kontrolü ve kararsızlık sorunları, günümüzde her güç sistemi analizcisi ve araştırmacısı tarafından özel ilgi görmektedir. Ekonomik ve çevresel baskılarla birlikte büyüyen enerji ihtiyacı ile güç sistemi ağlarında olası gerilim kararsızlığı tehdidi gittikçe artmaktadır. Son yıllarda gerilim kararsızlığı; New York, Fransa, Florida, Belçika, İsveç ve Japonya gibi önemli bölgelerde elektrik ağının çökmesine neden olmuştur (Dhuness, 2012; Lindell, 1988). Araştırmacılar, gerilim kararsızlığı tehdidi ile başa çıkmak için yeni stratejileri analiz etme ve geliştirme çabalarını sürdürmektedirler.

Gerilim kararlılığı çok çeşitli olayları kapsadığından, bu ifade farklı mühendisler için farklı anlamlar içermektedir. Gerilim kararlılığı bazen yük dengelenmesi olarak da adlandırılır. Gerilim kararsızlığı ve gerilim çökmesi terimleri ise genellikle birbirinin yerine kullanılır. Gerilim kararsızlığı, rotor açısı (senkron) kararlılığının aksine, gerilim dinamiklerini içeren dinamik bir süreçtir. Gerilim çökmesi, sistemin önemli bir bölümünde gerilim kararsızlığının çok düşük gerilim profiline yol açtığı bir süreç olarak tanımlanır. Gerilim kararsızlığı sınırı ise şebekenin maksimum güç aktarma limitine doğrudan bağlı değildir (Taylor, 1994; Bourgin, Testud, Heilbronn, ve Verseille, 1993; Machowski, Bialek, ve Bumby, 2012; Adkins ve Harley, 2012). Bölüm 6'da küçük sinyal kararlılığı analiz tekniği yöntemleri ve bu yöntemler için teorik esas uygulama ve performans özellikleri ile birlikte tanımlanmıştır. Güç sistemi elektromekanik dinamik etkilerini analiz ve tahmin etmesine bakıldığında üç ana etken bulunmaktadır. Sistem lineer olmadığı, yüksek düzey ve zaman değişimli olduğu frekansta çok sayıda elektromekanik oskilasyon modu içerdiği ve temel olarak nitelik açısından stokastik olduğu için zorlayıcı bir sorundur. Elektromekanik modlar nitelik açısından ya lokal yada alan içi olarak sınıflandırılır. Lokal modlar tek bir jeneratör veya tesis sisteme karşı döndüğü zaman meydana gelirken alan içi modu bir alanda birkaç jeneratör başka bir alandaki jeneratörlere karşı döndüğü zaman meydana gelir. Lokal modlar daha büyük inertia ve daha düşük empedans yolları ile nitelendirildiği için frekanslar daha yüksek olma eğilimi sergiler. Genellikle lokal modlar 1-2 Hz aralığında olurken alan içi modlar 0.2-1.0 Hz aralığında olabilir. Tipik olarak alan içi modlar biraz daha fazla soruna neden olur. Güç sistemi dinamik teorisi ile tutarlı olarak güç sisteminin bir çalışma noktasında doğrusallaştırılabilir (bpa.gov, 2019; Abe ve Isono, 1976).

Bu tezde sunulmuş Householder yönteminin üstünlüğü lineer olmayan sistemlerin kararlılık analizleri çok zordur ayrıca çok büyük güçlü karmaşık sistemlerin analizini pratik olarak yapmak imkansızdır. Bu tez çalışmasında incelenen sistemler gerçekte lineer değildir, denge noktasında meydana gelen sapmalar küçük olduğu için (küçük sinyal), sistem lineer sisteme yaklaştırılmıştır. Yani gerçekte lineer olmayan sistemin analizi yerine, daha kolay olan lineere yaklaştırılmış sistemin analizinin yapılması sağlanmıştır.

2. GÜÇ SİSTEMİNİN TARİHÇESİ

İlk güç sistemi, 1882 yılında Amerika'nın New York eyaletinde Thomas Edison eliyle kurulmuştur. Bu sistem; bir adet DA jeneratör, kablo, sigorta ve yük ile mekaniği elektriğe çeviren bir buhar türbini gibi elemanlardan oluşmaktadır. Bu sistem elli dokuz müşteriye hizmet vermiş olup, 1.5 km'lik bir yarıçapa sahiptir. Bu sistemde yer altından geçen 110 V gerilimli kablolar kullanılmıştır ve çekilen tüm yükler aydınlatma türündendir (McPherson ve Laramore, 1990).

2.1. DA Sistemindeki Problemler

Bir DA güç sistemi kullanılarak yakın mesafede bulunan elektrik yükleri iletilebiliyorken, uzak mesafelerde gerilim ve güç çok düşmektedir. Bu sorunun çözüm yolunun, gerilim düzeyinin arttırılması olduğu tespit edildi. Öte yandan, alternatif akım (AA) sistemlerinin ise böyle sorunları yoktur.

1884 yılında Sprague tarafından elektrik motorunun icat edilmesiyle birlikte, çekilen elektrik yükleri sadece aydınlatma yükleri olmaktan çıkmıştı. Daha sonra 1886 yılında iki Fransız bilim insanı tarafından transformatör bulundu ve ilk AA hattı 1889 yılında kuruldu. Bu hat 21 km uzunluğunda olup, 4000 volt gerilime sahipti. Bu sistem Kuzey Amerika'da iki şehir arasında tek fazlı olarak çalışıyordu. Birden çok fazlı güç sistemleri ise belli bir zaman sonra Nikola Tesla tarafından icat edilmiştir.

2.2. Güç Sistemlerinin Genel Tanımı

Güç sistemleri insanoğlu tarafından yapılan en büyük icat olmakla birlikte, elektrik enerjisi dünyanın en önemli enerji türüdür. Bu vazgeçilmez enerji, hayatımızın her alanında aktif olarak kullanılmaktadır. Sayısız örnek arasından birkaçından bahsetmek gerekirse sanayi, ticaret, sağlık, ulaşım, haberleşme gibi modern yaşamın temelini oluşturan sektörleri sayılabilir.

Bir AA güç sisteminde elektrik enerjisini depolama imkânının günümüz teknolojisi ile mümkün olmadığı varsayılmaktadır; diğer bir deyişle anlık olarak üretim ve kulanım

arasındaki denge korunmalıdır. Bu da bir güç sisteminin analizini güçleştirmektedir. Bir elektrik şirketi tarafından müşteri beklentilerini karşılamak için aşağıdaki şartlar oluşturulmalıdır:

2.3. Arz ve Güven Kabiliyeti

Arz ve güven kabiliyetini yok eden etkenler şu şekildedir:

a. Müşterilerin memnuniyetsizliği
b. Maddi kayıp fazlalığı
c. Endüstride teknik sorunlar ve üretim hataları
d. Hayati noktalarda tehdit edici durumlar

Yukarıdaki etkenler sebebiyle müşterilerin, elektrik yön vericilere olan güvenleri azaldığından arz da azalmaktadır. Bir güç sisteminde arzı arttırmak ve müşteri güvenini yeniden kazanabilmek için aşağıdaki koşulları sağlamak gerekmektedir:

a. Güç sistemine bağlanan bileşenlerin yüksek kalite standartlarında seçilmesi
b. Bir bölgeyi besleyen sistemde sorun olduğunda, aynı bölgeyi farklı bir sistem üzerinden anında besleyebilme kabiliyetinin oluşturulması (Bahse konu kabiliyet ‘enterkonnekte sistemi’ olarak da tanımlanır).
c. Farklı santrallerde meydana gelen arıza durumlarında o santrallerden beslenen bölgeleri, tam kapasitede kullanılmayan diğer santraller üzerinden rahatlıkla besleyebilme kabiliyetinin oluşturulması
d. Güç sisteminin uygun şekilde analiz edilmesi (büyük yüklerin sisteme yüklenmeden önce analizinin yapılması gerekmektedir, örneğin yük akışı gibi işlemeler vs.)
e. Hassas koşullar için uygun kontrol edicilerin kullanılması

2.3.1. Uygun kalite ile elektrik enerjisinin arzı

Uygun kalite ile elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı hususları frekans ve gerilim ile birlikte ele alınması gereken konulardır. Bu iki nicelik, elektrik gücü üzerinde en fazla etkiye sahip niceliklerdir. Örneğin frekans düşmesi, motor yüklerinin şiddetinin

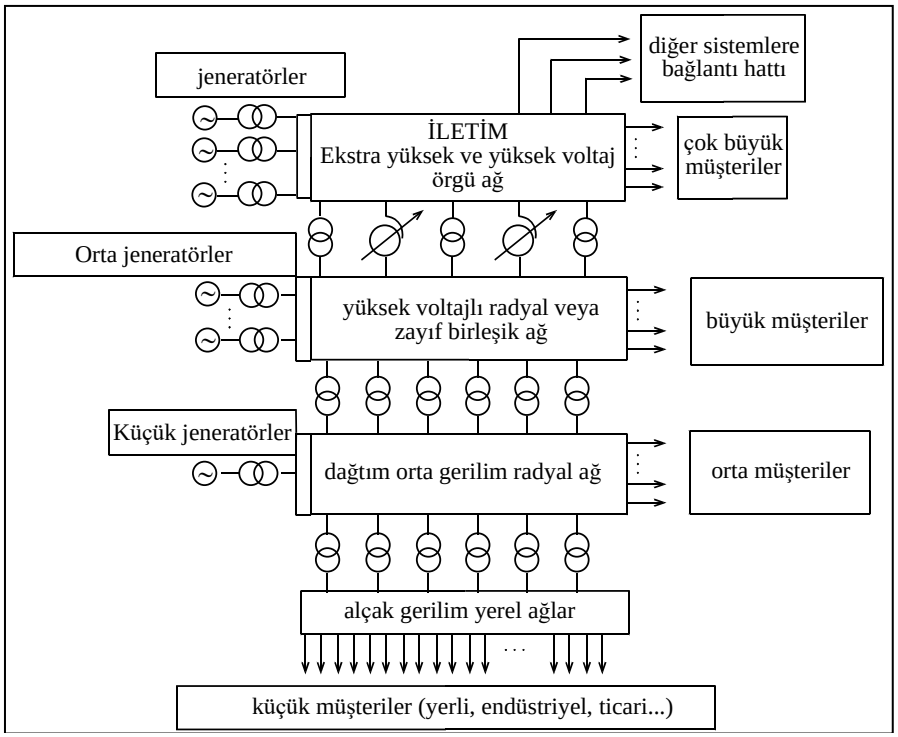
kaybolmasına neden olur. Birçok yerde frekans değişimi, pek çok elektrikli aletin yanmasına neden olmuştur.

Uygun kalitede elektrik enerjisi arzı için yapılması gerekenler aşağıdaki gibidir:

a. Gerilim ve frekans kontrollerinin uygun cihazlarla sağlıklı olarak yapılabilmesini sağlamak,
b. Harmonikleri azaltmak,
c. Büyük güç sistemleri kurmaktır.

2.4. Güç Sistemlerinin Yapısı

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi bir güç sistemi dört önemli aşamadan oluşmaktadır (Subcommittee, 1994).

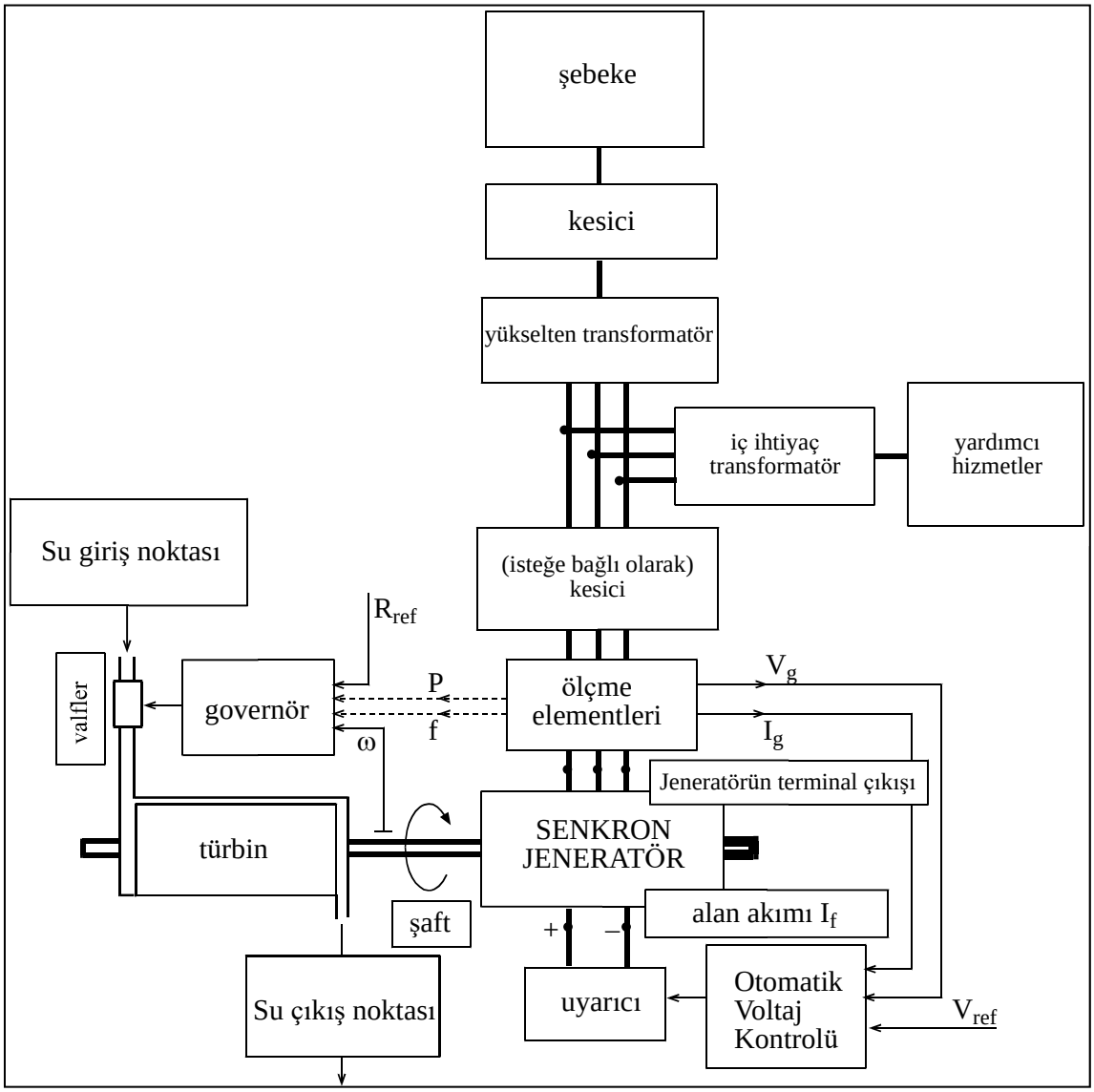


Şekil 2.1. Elektriksel güç sisteminin yapısı (Subcommittee, 1994)

2.4.1. Üretim

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi üretim bölümünde önemli olan şey enerji dönüşümüdür. Enerji dönüşümünden kasıt, güneş, rüzgâr, basınç vb. bir enerji türünün elektrik enerjisine

dönüşümünün sağlanmasıdır. Söz konusu dönüşümün düşük maliyetle verimli bir şekilde sağlanması ise en önemli hususdur (Subcommittee, 1994).



Şekil 2.2. Güç üretim biriminin blok şeması (Subcommittee, 1994)

2.4.2. İletim

Genelde dağıtım ve iletim birlikte düşünülür, çünkü iletim ve dağıtım sistemleri birbirine çok benzemektedir. Bu sebeple iletim ve dağıtım hususları aynı başlık altında açıklanmıştır.

Elektrik enerjisi iletim hattı kabiliyetleri

a) İletim hatlarında çok fazla enerji transferi yapılabilir.

b) Enerji aktarma kabiliyeti çok hızlıdır.

c) Kayıplar azdır.

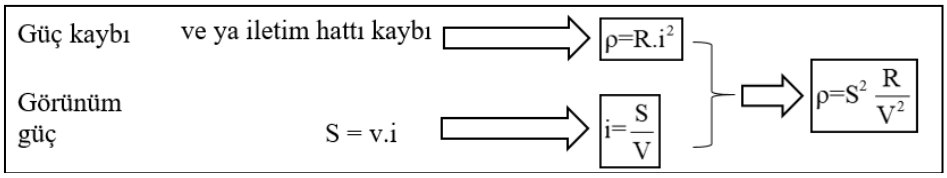
d) Enerjinin kontrolü kolaydır.

e) Bu hatları kullanarak uzak noktalara iletim yapılabilir.

İletim hatlarında güç kaybı

Şekil 2.3'teki gibi formülde $p = \varphi^2 \frac{R}{V^2}$ gerilim ne kadar yükselirse kayıplar da o kadar azalacaktır.

Bu nedenledir ki, enerji üretildikten sonra hemen yükseltici transformatöra iletilir ve bu yolla kayıplar azaltılır.



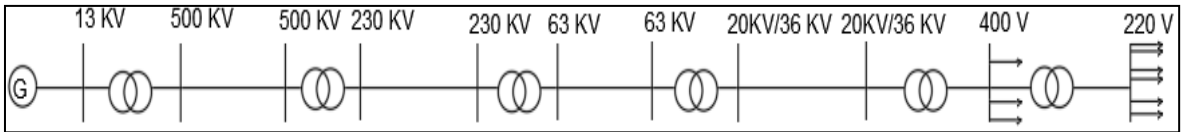
Şekil 2.3. İletim hatlarında güç kaybı

Çeşitli gerilim düzeyleri

İletim ve dağtım enerji nakil hatlarındakı çeşitli gerilim düzeyleri aşağıdakı Şekil 2.4'de verilmiştir. Güç sistemininde ortaya çıkabilecek gerilim düzeyleri belirli bir sınırlara limitlenmiştir. Gerilim de bir dengesizlik meydane gelirse sistemi kararsızlığa doğru götürecektir. Gerilim kararsızlığına karşı çıkmak için en önemli risk faktörlerinden biri Şekil 2.5'teki gibi çeşitli gerilim düzeylerini dıkkate almaktır.

İletim hatları	≥ 400 kV EHV
	132 kV ≤ HV ≤ 400 kV
	63 kV ≤ MV ≤ 132 kV
Orta gerilim iletim hatları	63 kV
	20 kV - 36 kV
Dağıtım hatları	400 V
	380 - 220 V

Şekil 2.4. Gerilim düzeyi diyagramı



Şekil 2.5. Gerilim düzeyi tek hat diyagramı

2.4.3. Talep veya kullanım bölümü

Güç talepleri her zaman değişim ve gelişim halinde olmakla birlikte çok büyük önem arz etmiştir.

Çeşitli kullanıcılar

a. Endüstriyel kullanıcılar
b. Ticari kullanıcılar
c. Ev kullanıcıları

2.5. Güç Sistemi Bileşenleri

Güç sistemi bileşenleri enerji santralleri veya elektrik enerjisi üretim birimi bileşenleri ve kontrol sistemlerini kapsamaktadır. Güç sistemlerinde kontrol ediciler, senkron jeneratörler, türbin ve governor, transformatör ve varolan yüzlerce ekipmanlardan oluşmaktadır, bu ekipmanların kısaca açıklanması aşağıda verilmiştir.

2.5.1. Senkron jeneratör

Senkron jeneratörler iki ana gruptan oluşmaktadır.

a. Hızlı jeneratörler: Buhar veya gaz bu türbinlerde kullanılır. Dönme hızları 1500-3000 RPM civarlarındadır.
b. Düşük hızlı jeneratörler: Su türbinlerinde kullanılır. Yaklaşık hızları 500 RPM civarındadır. Bu türbinlerin çok sayıda kutupları bulunmaktadır (McPherson ve Laramore, 1990; Iliceto ve Cinieri, 1977; IEEE, 1982; Yu, 1983).

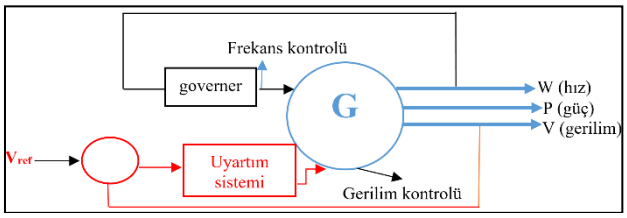
Senkron jeneratörlerin üzerine bağlanan uyarı sistemi

Uyarı sisteminin asıl görevleri:

a. Uyarı sistemine gerekli doğru akımı sağlamak
b. Kontrol görevi: Gerilim geçen reaktif gücü ve uyarma sisteminin kararlılığını sağlamak
c. Koruma görevi: Jeneratör güç aşımını kontrol etmek

2.5.2. Türbin ve governor

Türbin ve governor şeması aşağıdakı Şekil 2.6'da gösterilmiştir işlevsel olarak Türbin ham enerjiyi mekanik enerjiye çevirme görevini üstlenen bileşendir. Governor aktif güç veya sistem frekansını kontrol etme görevi vardır ve türbinde kapakları açıp kapatmayla kontrol işlemini yapmaktadır. Tüm bu işlemleri aşağıdaki diyagramdaki gibi gösterebiliriz uyarı sistemi ve governor, Şekil 2.6'da görüldüğü gibi jeneratörün verdiği aktif ve reaktif güçtür.



Şekil 2.6. Türbin ve governor şeması

Uyarı sistemi gerilimden geri bildirim alacaktır ve onu bir V_{ref} referans gerilimiyle karşılaştıracaktır. Daha sonra onu uyarı sistemine iletecek ve uyarı sistemi verileri değerlendirip uygun alarm düzeyinde gösterecektir.

Governor: Türbin jeneratöre gerekli mekanik enerjiyi sağlamaktadır. Governor ise elektrik gücünden veya hızından geri bildirim alıp, mevcut olan aktif gücü kontrol etmektedir. (Yukarıdaki görselde üst kısımda yer alan döngüye 'frekans kontrol döngüsü', altta yer alan döngüye ise 'gerilim kontrol döngüsü' denilebilir).

Güç sisteminin gerekli kaliteye sahip olduğunun söylenebilmesi için frekans ve gerilim kontrolünün standartlara uygun şekilde yapıldığından emin olunması gerekir (McPherson ve Laramore, 1990).

2.5.3. Transformatör merkezleri (Şalt Sahaları)

Şalt esasen çeşitli bileşenlerin bağlantı noktasıdır. Söz konusu bileşenlerin bazıları ise şunlardır:

a. İletim hatları
b. Transformatörler
c. Kontrol teçhizatları
d. Koruma teçhizatları

2.5.4. Şalt sahalarının görevleri

a. Güç dağılımını kontrol etmek
b. Gerilim seviyelerini değiştirerek aynı güçte çekilen yük miktarını değiştirmek
c. Güç sistemi güvenliğini, röle gibi koruma ekipmanları ile temin etmek

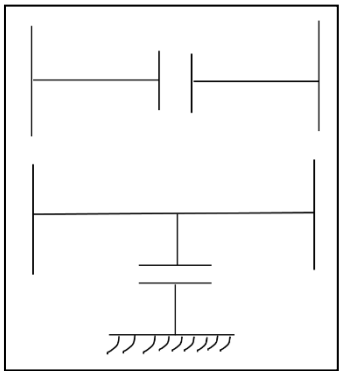
2.5.5. Transformatörler

Gerilim seviyelerini değiştirerek, yükü taşınabilir düzeylere indirgemek için kullanılır.

2.5.6. Seri ve paralel kondansatörler

Kompanzasyon amacıyla kullanılan Reaktif gücü dengeleme ve gerilim ile akım arasında oluşan faz farkını olabildiğince azaltma işlemine reaktif güç kompanzasyonu denir. Kompanzasyon, gerilim ile akım arasındaki faz farkının maksimum ideal oluşan açıya getirilerek, sistemi negatif bir şekilde etkileyen baralardakı reaktif güçlerin sıfıra yaklaştırılması olayıdır. Yani başka bir deyişle güç faktörünü ($\cos\phi$) düzeltir. Böylece güç sistemindeki enerji iletim hatlarının ve şebekenin gereksiz yere yüklenmesine sebep olan ve kayıpları artıran reaktif güç, olabildiğince minimum seviyede tutulur. Eğer ki güç sistemleri şebekelerinde hem iletim hem dağtım tarafında reaktif güç kompanzasyonu yapılmazsa, şebekede kayıplar gitgide tüketicinin çoğalması ile artar. İletim hatları ve yer altı kablolar dağıtım hatları aşırı bir şekilde fazla akım çeker ve bunun ardından büyük gerilim kararsızlıkları meydana gelir. Güç sistemlerinde gerilim kararsızlıkları meydana gelmesi, enerji iletiminin kapasitesini de düşürür bu yüzden kompanzasyon sistemleri kullanarak

daha verimli daha kaliteli ve daha ucuz bir enerji elde edilecektir. Reaktif güç kompanzasyonu, kompanzasyon kondansatörleri ve snuber devreleri ile yapılır. Bir reaktif güç rölesine istenilen düzeyde yapılması gereken güç faktörü vs. ayarlar girilir. Reaktif güç rölesi, sistemi sürekli izleyerek reaktif gücün durumuna göre kondansatör banklarından kondansatörleri grup halinde devreye alıp ve çıkararak reaktif güç kompanzasyon işlemini gerçekleştirmesini sağlar. Şekil 2.7 basit bir seri ve paralel kondansatör devresini göstermektedir.



Şekil 2.7. Seri ve paralel kondansatörler

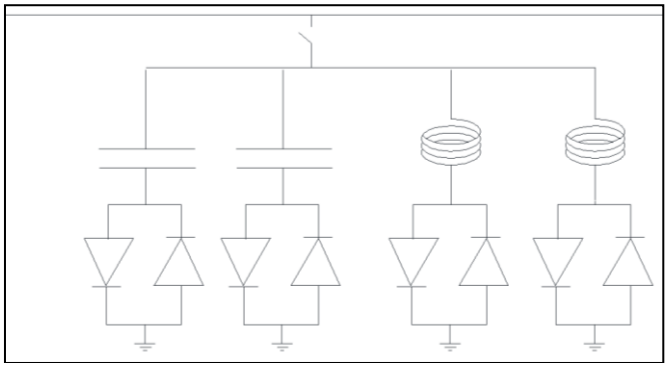
2.6. Güç Sistemlerinin FACTS (Flexible AC Transmission System) Bileşenleri

FACTS (Flexible AC Transmission System) bileşenlerinin güç sistemleri üzerindeki en önemli etkisi söz konusu sistemlerde gerilim kontrolü için kullanılmalarıdır. Gerilim kontrolü ortak sistemlerine örnek olarak transformatörlar ile seri ve paralel kondansatörleri gösterebiliriz.

FACTS elementleri daha önceki sistemlerde mekanik etkenler ile devreye alınıp çıkarılabiliyorken, günümüzde bu elementlerin kontrolü güç elektroniğine dayalı otomatik elektronik sistemler ile sağlanabilmektedir. Güç elektroniğinde yaşanan gelişmeler FACTS'lerin yapım fikrini oluşturmuş ve mekanik kontrolleri devreden çıkarmıştır. FACTS bileşenlerinin asıl görevi reaktif gerilim ve güç kontrolüdür (Gelopulos, 1979; N.P. ve G.P., 1970).

2.6.1. FACTS özellikleri ve SVC (Static Var Compensator) tanımı

a. Çok yüksek hızla kontrol işlemi yapılmasını sağlar ve mekanik kontrol bileşenlerine rağmen çok az teknik sorun meydana gelir.
b. FACTS'ler gerilim kontrolünün yanı sıra yük bölümünün kontrolü ve güç sisteminde rotor açısının kararlılığını iyileştirmek için de kullanılır.
c. FACTS elementleri, bir güç sisteminde seri ve paralel olarak kullanılabilir.
d. SVC'ler ise "Static Var Compensator" adı altında FACTS'lerin bir çeşididir. SVC'ler reaktif gücü dengelemek için kullanılırlar. Aşağıdaki şekilde, iletim hattına bağlı bir SVC modeli gösterilmiştir. Bu modelden de anlaşılacağı üzere SVC'ler hem reaktör hem de kapasitör özelliği gösterirler.
e. SVC'ler FACTS teknolojisinin bulunması ve güç elektroniğinin gelişmesiyle FACTS olarak kullanılılmaya başlamıştır. Böylece zaman içerisinde SVC'ler FACT haline dönüşmüştür. Bu teknoloji sayesinde, hatta gerilim kararsızlığı meydana geldiğinde kesicilerin açılıp hattın boşaltılması yerine FACT elementleri ile gerilim düzenlenerek enerji kesintisi olmadan sistemin çalıştırılmaya devam etmesi yeni bir çözüm haline gelmiştir. SVC'ler gerilim kararsızlığı oluşması durumunda aktif güç üreterek ve reaktif güç tüketerek sistemi dengede tutar (Gelopulos, 1979; Chen, 1984). Şekil 2.8'deki FACTS elementleri SVC yapım devresini göstermektedir.

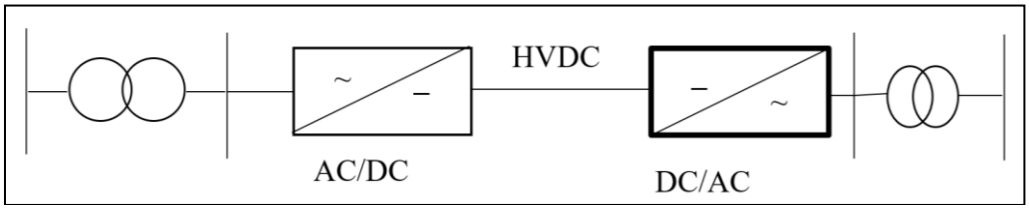


Şekil 2.8. FACTS elementleri SVC devresi

2.6.2. HVDC (High Voltage Direct Current) hatları

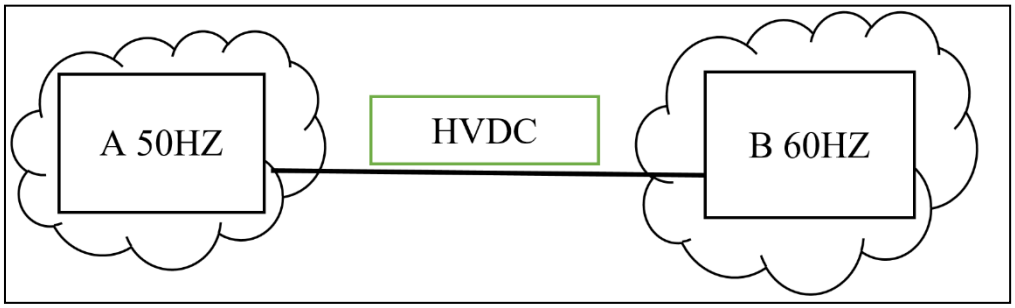
Güç sistemlerinin elementlerinden biri de HVDC hatlarıdır. HVDC'ler yüksek basınçlı doğru akım hatları (High Voltage Direct Current) olarak tanımlanabilir. Bu iletim sisteminde

alternatif akım yerine doğru akım kullanılmaktadır. HVDC iletim hattının genel bir kulanımının devresi ve topolojisi Şekil 2.9 ve 2.10'daki gibi gösterilir.



Şekil 2.9. HVDC hat şeması

A noktasının bir elektrik ağı olduğu ve 50 Hz frekansla çalıştığı, B noktasının ise bir elektrik ağı olduğu ve 60 Hz frekansla çalıştığı varsayıldığında, bu iki ağın birbirine bağlanması, AA ağı ile mümkün olmayacaktır.



Şekil 2.10. İki bölgeni farklı frekanslarla besleme bağlantısı

Farklı frekansla iki şebekenin mevcut olduğu yerde, söz konusu şebekeler arasındaki tek ilişki yolu HVDC hatlarının kullanılmasıdır. Yani HVDC hatları bir çeşit 'asenkron' bağlantısıdır.

1. DA elektrik enerjisi transferi
2. Asenkron ağı bağlantısı

HVDC kullanılan bazı yerler:

Kanada Québec eyaleti ile New York arasındaki iletim hatlarında 320 MW'lik HVDC sistemi kullanılmıştır.

İngiltere ve Fransa arasında da deniz altından geçen kablolar HVDC sistemi içerisinde kullanılmıştır.

2.6.3. AA Güç sistemlerinin genel özellikleri

a. İnvertör-konvertör gibi çeviricilere gerek kalmadan AA şeklinde üretilip AA şeklinde iletilmesi
b. Çeşitli elektrik ağlarının birbirine dönüşüm yapmadan bağlanabilmesi
c. Yüksek güçte üretim kabiliyeti
d. Uzun mesafelerde verimli iletim
e. Enerji santrallerinde esnek üretim imkanı

2.6.4. Modern AA güç sistemlerinin genel özellikleri

a. Güç elektroniği sistemlerinin, AA güç sistemlerine dahil olması.
b. Düşük güçlü üretim kaynağının çok kullanılabilmesi (güneş-rüzgâr vs).
c. Düşük güçlü ağların kurulabilmesi: Günümüz dünyasında yeni oluşmaya başlayan bir durumdur. Enerji ihtiyacı olan yerlere enerjiyi uzun iletim hatları ile taşımak yerine yakın çevrelerdeki yenilenebilir ve benzeri düşük güçlü enerji santrallerinden yararlanarak enerji iletimini sağlamaya dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem ile hat kayıpları önlenmiş ve maddi açıdan büyük bir tasarruf sağlanmış olur. Ayrıca bu düşük güçlü üretim santrallerinden elde edilen enerji, büyük güçlü santrallerin bağlandığı iletim hatlarına da bağlanabilir; böylelikle enterkonnekte sistem mantığı ile bir bölge birkaç farklı santral üzerinden beslenebilir.
d. Akıllı ağ elementlerinin modern AA güç sistemlerine etkisi: Geçmişte bir bölgenin kararlılığı düzenlenmek istendiğinde mahalli sinyaller kullanılırdı fakat ekipmanların gelişmesi sonucunda tüm güç ağlarının sinyalleri eş zamanlı olarak kontrol altına alınmış ve sistem kararlılığının çok daha akıllı bir sistem üzerinden düzenlenmesi sağlanmıştır. Bilgi sinyallerinin sayısının artışı ve haberleşme ağlarının güçlenmesi ile gerilim kararlılığının kontrolü de çok daha sağlıklı bir hale gelmiştir (McPherson ve Laramore, 1990; Iliceto ve Cinieri, 1977).

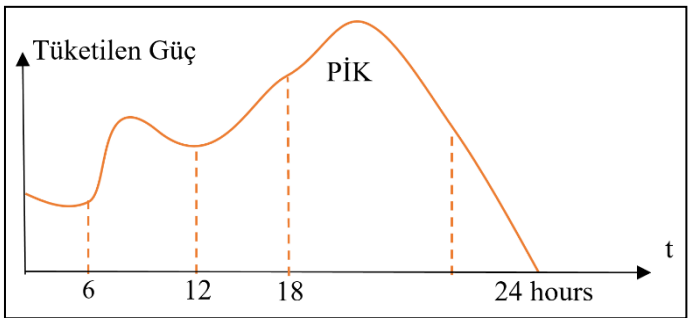
2.6.5. Güç sistemlerinin bölgelere göre sınıflandırılması

a. Milli ağlar: Bu ağda, bir ülkenin içerisinde bulunan tüm güçler birbirlerine bağlanarak milli elektrik ağı oluşturulur.
b. Uluslararası elektrik ağı: Bu ağ, birkaç ülkenin elektriğini birbirine bağlayan elektrik ağıdır.
c. Kıtalar arası elektrik ağı.

2.6.6. Elektrik şebekelerinin birbirine bağlanmasının avantajları

a. Güç sisteminin güvenlik kabiliyetini artırma: Tüm ağların birbirine bağlı olması ile bir santralde meydan gelen hasar, o santralin beslediği yerin elektrik enerjisinden mahrum kalmamasını sağlamaktadır. Bir santralde arıza oluşması durumunda o santralin beslediği bölgeler farklı bir santral üzerinden anında beslenebilir.
b. Enerji rezervlerinin artması: Tüm ağların birbirine bağlı olması sebebiyle bir santralde arıza oluştuğunda enerji farklı bir santralden beslenebilmelidir. Santraller tam kapasitede çalıştırıldığında, ağ sistemi farklı bir santralden aynı bölgeyi beslemeye izin verse bile diğer santralin kapasitesi bu işlem için yeterli olmayacaktır. Bu sebeple santraller genellikle tam kapasitede çalıştırılmazlar.
c. Üretimin ekonomik olması: Enerji rezervlerini arttırmak ağ sisteminin güvenliği açısından önemlidir; ancak ekonomik olarak rezerv düzeylerinin çok yüksek tutulması santral masraflarının karşılanmasına ya da kâr oranının çok düşmesine neden olacaktır. Bu sebeple rezerv konusunda da dengenin sağlanması ekonomik açıdan çok önemlidir.
d. Enerji kaynaklarını her açıdan kullanmak: Burada söz konusu olan, elektrik ağlarını bağlama avantajlarıdır. Bir ülkenin doğalgaz rezervlerinin bulunduğu ama bu rezervden elektrik enerjisi üretmek istemediği ve herhangi bir nedenle elektrik enerjisini ithal/ihraç etmek istediği varsayıldığında, elektrik ağlarının birbirine bağlı olması sebebiyle istenilen komşu ülkeden elektrik alınıp, istenilen diğer bir komşu ülkeye elektrik satılabilecek ve ülkenin sahip olduğu doğalgaz rezervleri farklı amaçlar için rahatlıkla kullanılabilecektir. Şekil 2.11 yük fazlalığının eğrisi 24 saat içinde verilmiştir.

2.6.7. Yük fazlalığı eğrisini düzeltme

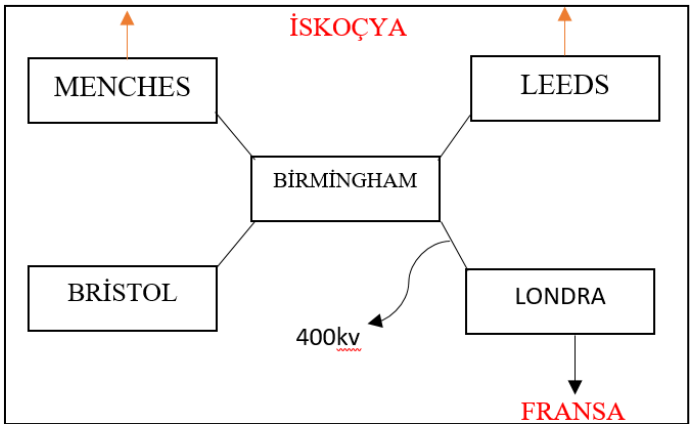


Şekil 2.11. Puant yük eğrisi

Bir güç sistemi içerisinde yük eğrisini düşündüğümüzde karşı karşıya kalacağımız durumu değerlendirdiğimizde, yukarıdaki şekilde sabahları kullanım miktarının genellikle az olduğu, öğlen saatlerinde kullanım miktarı hafif yükselip düşerken gece saatlerinde yük artışı olduğu görülmektedir. Yük artışının en fazla olduğu zaman dilimi ise akşam saat 20.00 sonrasıdır.

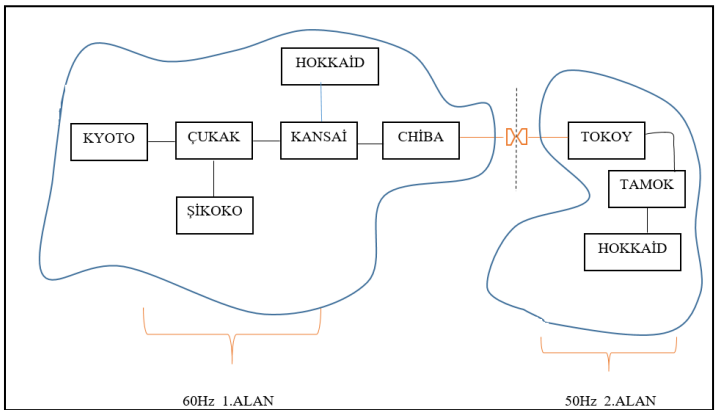
Yük eğrisini düzeltme konusunda yapılabilecekler aşağıda yer almaktadır.

Güç sistemi içerisinde gündüz saatlerinde elektrik kullanımı geceye göre çok daha azdır. Bu sebeple, gece kullanım için gündüz enerji santrallerinin sahip olduğu enerjilerin tamamı kullanılmamalıdır. Böylelikle gece enerji yükünün artmaya başladığı anlarda enerji sıkıntısı yaşanmayacaktır. Ancak güç sistemlerinin birbirine bağlanmasıyla rezerv düzeyi düşürülebilecektir. Ayrıca enerji ihtiyacı arttığı anda uluslararası ağlardan enerji ihtiyacı karşılanabilir. Bu da rezerv düzeyinin düşürülmesine, böylelikle santrallerin gündüz saatlerinde düşük güçte çalıştırılarak zarar etmelerine engel olacaktır. Örneğin Britanya elektrik şebekesi beş bölümden oluşmaktadır ve bu bölümlerin her biri, birbirlerine doğrudan bağlı şekildedir. Ayrıca, Birmingham adında bir merkezi bölgeleri vardır. Şekil 2.12'de de Londra, Leeds, Manchester ve Bristol şehirlerindeki elektrik merkezlerinin bu merkeze doğrudan bağlı olduğu görülmektedir. Şekil 2.12 Britanya'nın milli şebeke sistemi görülmektedir. Eğer bu şebekeyi daha fazla genişletmek istersek önce İskoçya şebekesine, ardından da Londra ve Fransa şebekesine bağlanacaktır ki böylelikle uluslararası bir şebekeyi oluşturacaklardır.



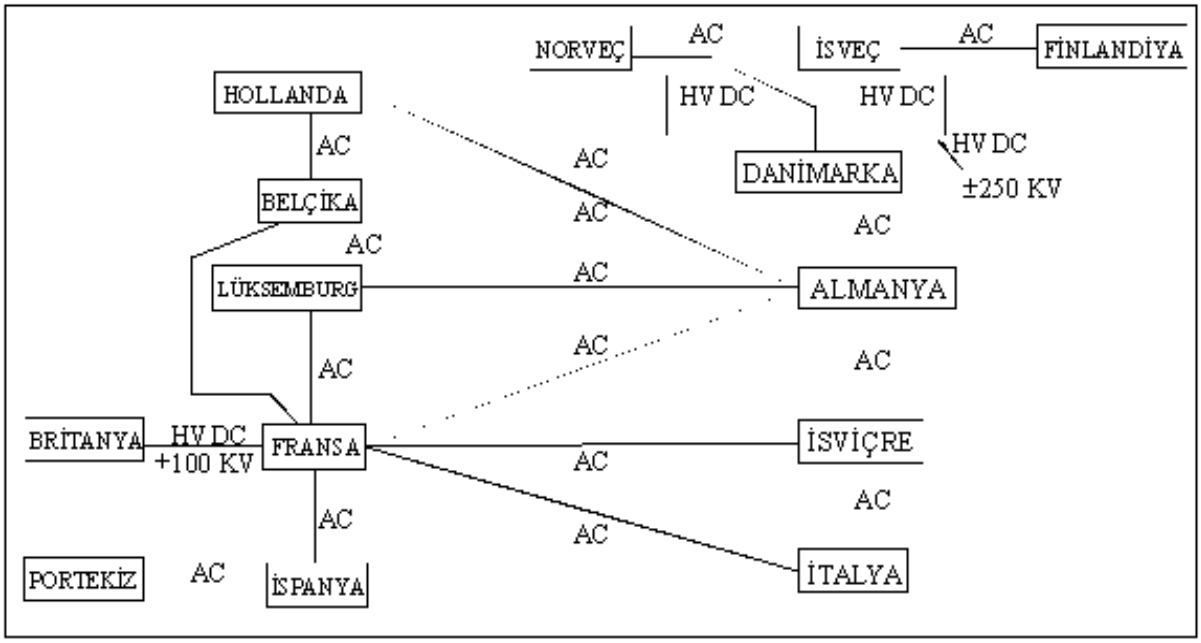
Şekil 2.12. Avrupa uluslararası elektrik ağ bağlantı şeması

Britanya genel elektrik şebekesinde iletim sistemleri 400 kV gerilimlidir. Sadece Britanya ve İskoçya arasındaki hat 275 kV gerilim seviyesindedir. Milli elektrik şebekesine örnek olarak ise Japonya'nın milli elektrik şebekesi Şekil 2.13'teki gibi gösterilebilir. Bu şebekede dokuz bölge vardır ve elektrik sistemi güneybatı ve kuzeydoğu olarak iki asıl bölümden oluşur. Bu bölümler güneybatı bölgesinde Kyushu'dan başlayarak Chukako'ya ve oradan da Shicoco'ya, Shicoco'dan Kansai'ye, oradan da Hokuriku'ya ve yine Kansai'den Chukako'ya bağlıdır. Buraya kadar alternatif akım 60 Hz'dir ve kuzeydoğuya bağlanan şebeke de 50 Hz frekansa sahiptir. Bu iki ağı birleştirmek için enerji DA'ya çevrilir. Böylece frekans farklılığı sorunu ortadan kalkmış olur.



Şekil 2.13. Japonya milli elektrik şebeke bağlantısı

Japonya'nın şebeke sisteminin bu özelliği iki farklı frekansı kullanmasından ileri gelmektedir. İki bölgenin bağlandığı noktada güç elektroniği elementleri kullanılmaktadır ki, böylece bu iki bölge senkronizasyon problemi olmadan birbirine bağlanabilmektedir avrupa'daki uluslararası elektrik şebekesi Şekil 2.14'de verilmiştir.



Şekil 2.14. Avrupa elektrik şebeke bağlantısı

2.7. Güç Sistemlerinin Kontrolü

Güç sistemleri konusunda en önemli konulardan birisi de güç sistemlerinin kontrolüdür. Bu konuda çok sayıda bilimsel makale vardır. Güç sistemlerinin dinamiklerini tanımlarken sistemin matematiksel ifadesinin belirtilmesi gerekmektedir. Bir sistemin genel matematiksel ifadesi oluşturulduğunda güç sistemi de algoritmalar üzerinden kontrol edilebilir.

2.7.1. Güç kontrol sistemlerinde etkin kontrolü sağlayan konular

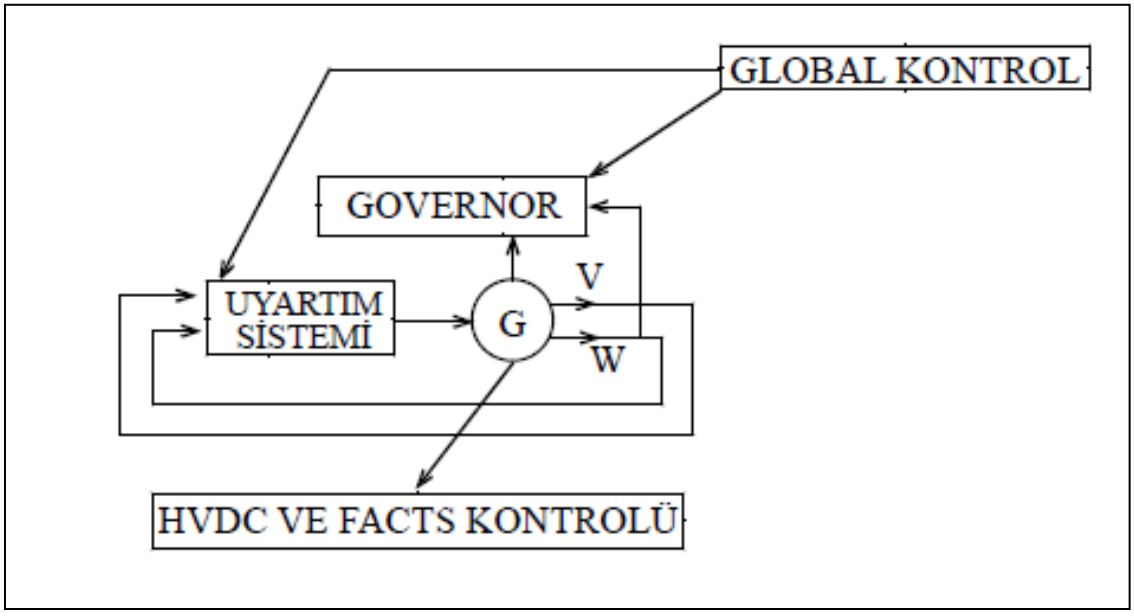
a. Sistem gerilim ve frekansını standartlara uygun hale getirmek
b. Yüksek güven kabiliyeti düzeyine ulaşmak
c. Kullanıcıya iletilen enerji masrafını en aza düşürmek
d. Üretim ve kullanım arasındaki denklemi korumak

2.7.2. Güç kontrol sistemleri kontrolünün aşamaları

Güç sistemleri kontrolüne ilk olarak senkron jeneratörden başlanmıştır. Burada iki ayrı sistem mevcuttur:

a. Uyarı sistemi: Jeneratörden çıkan gerilimin aktif gücünü kontrol etmek için uyarı sistemi kullanılır.
b. Governor sistemi: Aktif güç kontrolü ve frekans kontrolü için governor kontrol sistemi kullanılır.
c. FACTS veya HVDC
d. Transformatörler

Kontrol Sisteminin genel şeması aşağıdaki Şekil 2.15'teki gibidir. Dört sinyal ile senkron jeneratörü kontrol edilebilir. Bu sinyallerden biri gerilim ve senkron jeneratörün hızı, ikincisi ise FACTS ve HVDC elementleridir. Üçüncüsü governor kontrolü iken, dördüncüsü ise ana (merkezi) kontroldür. Ana kontrol diğer üç kontrole doğrudan komut gönderebilir (Abe ve Isono, 1976; Gelopulos, 1979).

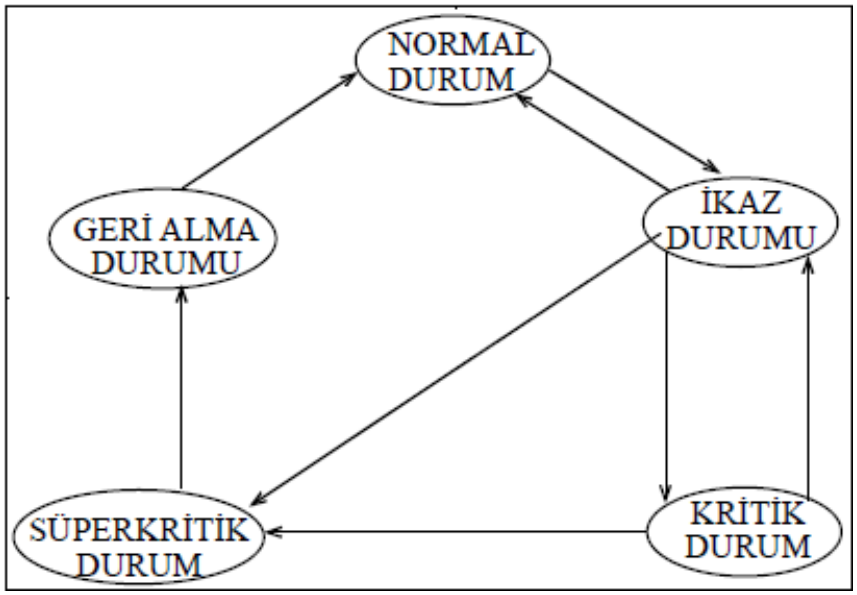


Şekil 2.15. Senkron jeneratör kontrol sisteminin genel şeması

2.7.3. Güç kontrol sistemlerinin arıza analizi

Şekil 2.16'daki gibi bir güç sisteminin genel analizi, sistemin işleyişi ve meydana gelebilecek arızalara karşı sistemin tepkisi aşağıdaki diyagram üzerinden gösterilmektedir.

Bir güç sistemi normal durumdayken gerilim seviyesi kararlı ve frekans normaldir. Bir gerilim kararsızlığı veya frekans değişiminde güç sistemi tarafından uyarı verilir, yani sistem ikaz durumuna geçer ve bu durum sonrasında arızaya karşı önlem alınabildiği takdirde sistem normale döner. Şayet önlem alınamamışsa alarm seviyesi, kritik seviyeye yükselir. Kritik seviyedeki alarmdan sonra da arıza giderilemez ise alarm durumu süper kritik alarm durumuna geçer. Bu seviyeden sonra arıza giderildiğinde sistem normal duruma geri dönebilir. Ayrıca arıza seviyesinin çok yüksek olduğu durumlarda sistem, ikaz durumundan sonra bir anda süper kritik duruma da geçebilir (Subcommittee, 1994).

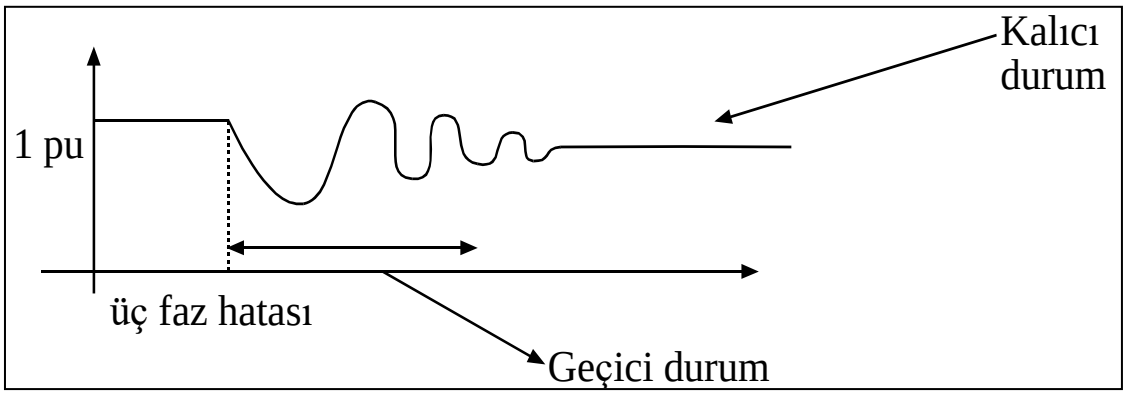


Şekil 2.16. Güç kontrol sistemlerinin arıza analiz şeması

3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE DİNAMİKLER VE GERİLİM KARARLILIKLARI

3.1. Dinamik Sistemlerin Tanımı

Bir güç sisteminde geçici mod (anlık arızaların meydana geldği durum) bulunup, bu modun analizi ile sistem kontrol edilebiliyorsa, bu sistem dinamik sistem olarak adlandırılır (Taylor, 1994; bpa.gov, 2019). Diğer bir ifadeyle, giriş sinyali ve çıkış sinayli ilişkisinin ani olmadığı sisteme dinamik sistem denilmektedir. Giriş sinyali ve çıkış sinyalinin ani olmaması ise girişin bir anda değişmesi sonucunda sistem çıkışının, biraz zaman geçtikten sonra yeni ölçüsüne ulaşması şeklinde açıklanır. Yani girişte istenmeyen sebeplerden dolayı farklılık oluşmuşsa ve bu farklılık sistemi etki altında bırakmışsa, çıkış sinyali bir müddet geçtikten sonra tekrar kararlı duruma geçer. Sistem dinamikse, girişte oluşan kısa devreden sonra sistemin çıkışı ani bir şekilde değişmeyecektir. Şekil 3.1'de dinamik olan bir sistem sinyali görülmektedir (Dhuness, 2012).



Şekil 3.1. Lineer dinamik sistem sinyali

3.1.1. Dinamiklerin sınıflandırılması

Güç sistemlerinde dinamik konular iki gruba ayrılırlar:

Statik konular

Genel anlamda, güç siteminin kalıcı koşullarda incelenmesini içerir.

Dinamik konular

Güç sistemlerinde hem statik hem de dinamik konular üzerine çalışma yapılabilir. Ama statik konular güç sisteminin kalıcı koşullarda çalıştığını varsaydığı için daha az ilgi çekmektedir. Bir güç sisteminde en önemli konulardan bir diğeri de dinamik konulardır. Dinamik konular genel olarak geçici koşulları içermektedir. Bu koşullar, güç sistemlerinin optimizasyonunu kapsamaktadır. Statik konular genelde sistemin kullanım koşullarına bağlıdır. Bunun nedeni ise sistemin çoğu zaman kalıcı koşullarda çalışıyor olmasıdır. Buradan hareketle, bir güç sisteminde kalıcı koşullar içerisinde yer alan konular üretim, iletim hattı ve tüketim gibi parametrelerin kullanım koşullarına bağlıdır. Bir güç siteminde, güç akışının gerçekleştirilmesi için dinamik ve optimum koşulların sağlanabilmesi gereklidir (Cushing, Drechsler, Kilgoar, Marshall ve Stewart, 1971).

Güç sistemlerinde dinamik konular, sistemde oluşan arıza veya hata modunu içermektedir. Örneğin bir güç sisteminde üç faz kısa devresi gibi anlık bir arıza meydana geldiğinde, bu arızanın anında analizini yapmak çok zor olacaktır. Ancak bu tür arızaların analizini yapabilecek seviyeye ulaşıldığında, tüm güç sisteminin kontrolü de rahatlıkla yapılabilir. Nitekim güç sistemlerinin geçici modlarının incelenmesi zaman almasına rağmen, sistemin kontrol altında kalması ve kararlılığının korunması hususlarında yardımcı olmaktadır. Çünkü bir güç sisteminde arıza meydana geldiğinde, sistemin yeniden arzu edilen kalıcı moda geri dönmeme riski mevcuttur. Örneğin sistemde kalıcı bir enerji kesintisi olabilir ki bu gibi sorunlar güç sisteminde kararsızlık örneği olarak bilinir. Sonuç olarak, dinamik sistemlerin incelenmesi ve analizi, bir güç sisteminin kararlı tutulmasına imkân sağlayacaktır. Fakat güç sistemlerinde dinamik analizlerden önce dinamik sistemin iyi bir şekilde kavranması çok önemlidir (Edwards ve arkadaşları, 1986).

3.1.2. Güç sistemlerinde dinamik etikilerin oluşma sebebi

Güç sistemlerinde giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki ilişkinin ani olmamasının sebebi, bu sistemlerde depolayıcı elemanların mevcut olmasıdır. Bu sebeple depolayıcı ekipmanlara sahip sistem, dinamik sistem kavramı içerisinde açıklanır. Yani depolayıcı ekipmanların dinamik sistem etkisine yol açtığı rahatlıkla söylenebilir.

3.1.3. Güç sistemlerinde depolayıcı etki oluşturan etkenler

a. Bobin etkisi
b. Kondansatör etkisi
c. Elektrik motorlarında rotorun atalet momenti

3.1.4. Güç sistemlerinin dinamik modları

Güç sisteminin dinamik modlarını kategorize etmek için bazı özellikler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu özellikler aşağıda sunulmaktadır.

a. Meydana gelen arıza nedenleri
b. Güç sisteminde meydana gelen arıza cinsinden gelişmeler (yani frekans, gerilim veya yüklerin devre dışı olması gibi olaylar)
c. Arızaların belli bir zaman çerçevesine göre meydana gelmesi
d. Güç sistemlerinin fiziksel özellikleri

3.1.5. Güç sistemlerinde dinamik arıza kategorileri

a. Dalga dinamikleri
b. Elektromanyetik dinamik konuları
c. Elektromekanik dinamikleri
d. Termodinamik dinamikleri

Bu dört kategori aşağıdaki şemada yer aldığı şekilde gösterilebilir:

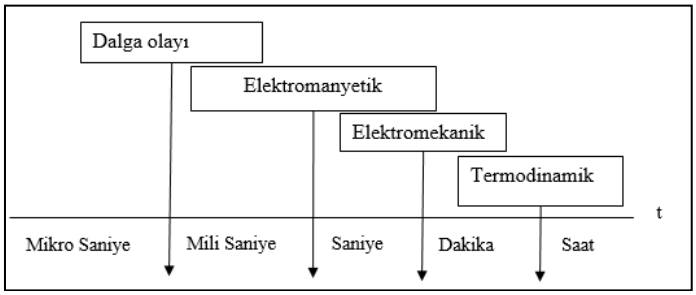
Şekil 3.2'de görüldüğü gibi güç sistemlerinde dalga olayları milisaniyeler ve mikro saniyeler arasında, elektromanyetik olaylar saniyeler ve milisaniyeler arasında, elektromekanik olaylar ise saniyeler ve dakikalar arasında oluşmaktadır. Son olarak da termodinamik hatalar dakikalar ve saatler arasında oluşmaktadır.

1. Dalga hataları: Güç sisteminin enerji aktarım hatlarında oluşan en hızlı hatalardır. Yıldırım düşmesi veya ani enerji kesintileri gibi sistemde büyük hasara yol açan hatalar dalga hatalarına örnek olarak gösterilebilir.

2. Elektromanyetik hatalar: Bu hatalar elektrik makine bobinlerinde ortaya çıkmaktadır.
3. Elektromekanik hatalar:

a. Dönen parçaların dalgalanmaları
b. Kontrol edici sistemlerin işlevi
c. Kısa devre hatasından sonra türbinin fonksiyonu

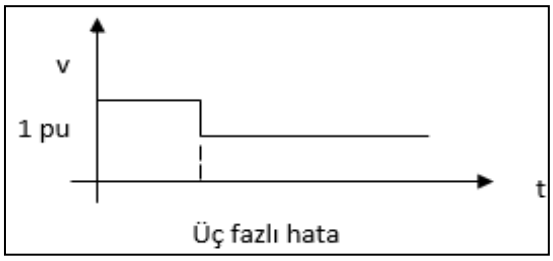
4. Termodinamik hatalar: En yavaş dinamik modlarıdır ve nadiren meydana gelmektedirler (Berrou, Glavieux ve Thitimajshima, 1993; Anderson, Aulin ve Sundberg, 1986).



Şekil 3.2. Güç sistemlerinde dinamik arıza kategorileri

3.1.6. Statik (dinamik olmayan sistem) tanımı

Bir güç sisteminin dinamik ve statik davranışı Şekil 3.3'te gösterildiği gibidir. Örneğin üç faz kısa devresi gibi bir durum meydana geldiğinde, güç sisteminin birim zamandaki gerilim değişimi Şekil 3.1'deki gibi olacaktır. Genellikle jeneratör gerilimi 1 pu'dur; yani dengelenmiş ya da kalıcı durumda jeneratörden çıkan gerilimin 1 pu olması için çaba sarf edilir. Faz kısa devresi gibi bir durumda ise, eğer sistem dinamik değilse, sistem gerilimi hemen düşecektir. Bu sebeple sistemdeki hatanın türüne göre sinyal çok düşük gerilimle devam edecektir. Böyle bir sisteme dinamik olmayan veya statik sistem adı verilir. Çünkü giriş ve çıkış sinyalinde ani değişimler olmamaktadır; yani girişte oluşan bir arıza sonucunda sistemin çıkış sinyali derhal düşecektir.



Şekil 3.3. Lineer olmayan statik sistem sinyali

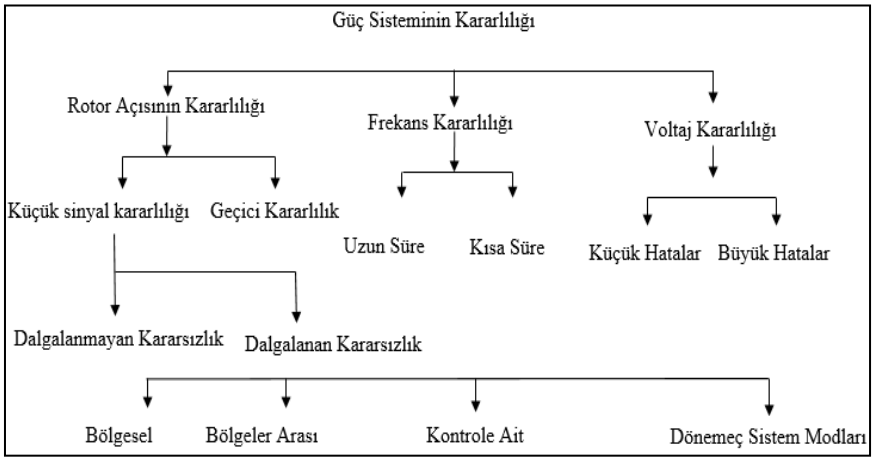
3.2. Güç Sistemlerinde Kararlılık

Bir güç sisteminde kararlılık, o sistemin normal durumda istenilen parametrelere sahip olması anlamına gelmektedir. Yani bir arızan meydana gelmesi durumunda sistemin, kısa sürede tekrar nominal durumuna geçebilme yetisi olarak da tanımlanabilir (Bourgin, Testud, Heilbronn ve Verseille, 1993; Hill, 1993).

3.2.1. Güç sistemlerinde kararlılığın sınıflandırılması

1. Meydana gelen arızaların büyüklüğü:
a. Büyük sinyal kararlılığı: Büyük arızalar faz-faz, faz-toprak ve üç faz-toprak arızası
b. Küçük Sinyal Kararlılığı: (Küçük arızalar) Yüklerin sürekli değişim göstermesi
2. Zaman açısından arızaların incelenmesi
a. Kısa süreli dinamik arızalar
b. Orta süreli dinamik arızalar
c. Uzun süreli dinamik arızalar
3. Meydana gelmiş kararsızlığın fiziksel doğası
4. Kısa devre arızasının büyüklüğü
5. Arızaların zaman dilimine göre oluşması
6. En uygun hesaplama yöntemi ve kararlılığın öngörülmesi

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi güç sistemlerinin kararlılığını belirleyen yöntem çeşitleri ve şeması aşağıdaki gibi verilmiştir.



Şekil 3.4. Güç sistemlerinin kararlılığını belirleyen yöntemler

3.2.2. Senkronizasyon analizi

Her senkron makinesi iki tür bobine sahiptir:

a. Uyartım bobini: Bu bobin rotorun üzerinde yer alır ve DA akışıyla uyartım olur. Rotorun kendisi bir uyarıcı veya bir türbinle döndürülür.
b. Armatür bobini: Bu bobin de stator üzerinde yer almaktadır.

Sonuç olarak uyartım bobinine ait döner manyetik alan, armatür bobininde alternatif gerilim indüksiyonuna neden olur.

Not: Stator bobinlerinde bulunan gerilim ve akış, rotorun dönme hızına bağlıdır.

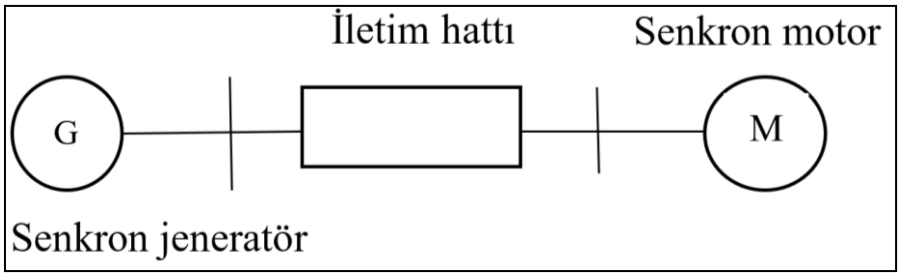
Senkron makinesi, stator bobinlerinde mevcut olan gerilim ve frekans değişkenleri (veya stator değişkenleri) ile rotorun mekanik hızı arasındaki senkron koordinasyonunu sağlayarak dönen alternatif akım makineleridir. Birkaç makinenin birbirine bağlı olduğu durumlarda tüm bağlı makinelerin gerilim ve stator akışları sabit bir frekansa sahip olmalıdır. Dolayısıyla bir güç sisteminin senkron olmasının ilk şartı budur.

3.2.3. Rotorun mekanik hızı

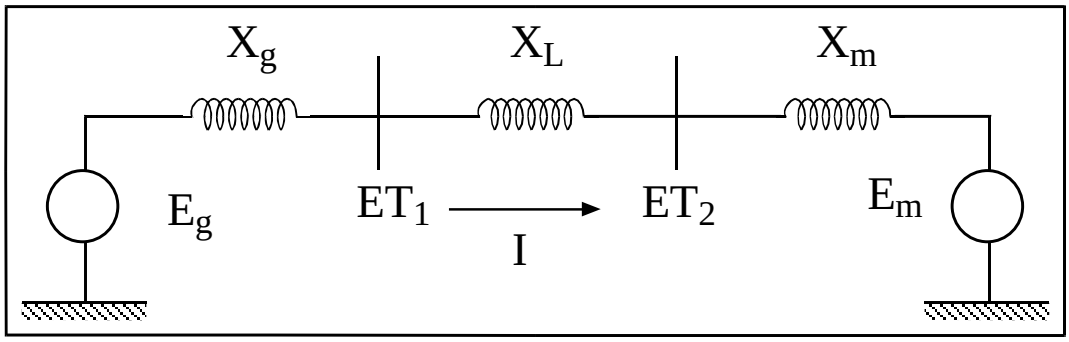
Belirli bir frekansa sahip olan makineler, diğer makinenilerin statoruyla koordine olmalıdır. Çünkü farklı santrallerin mekanik hızı birbirinden çok az farklı olabilir. Örneğin, gaz ve buhar santrallerinde rotor hızı yüksektir; buna rağmen hidrolik santrallerde rotor dönme hızı daha düşüktür.

3.2.4. Rotorun elektrik güç-açı ilişkisi

Güç ve rotor açısı ilişkisini Şekil 3.5'teki gibi bir yük, bir senkron jeneratör ve iletim hattı ile modelleyebiliriz. Ayrıca tek hat olarak Rotorun güç-açı ilişkisi tek hat şeması Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5. Rotor güç-açı ilişkisi



Şekil 3.6. Rotor güç-açı ilişkisi tek hat şeması

Tek hatlı güç sistemi diyagramının ideal modelinde jeneratör, teknik kaynaklarda yer aldığı şekliyle, genellikle Eg ve reaktans Xg ile gösterilir.

Terminal gerilimi ise ET_1 ile gösterilir.

İletim hattı: Çoğu zaman X_L ile gösterilir; ideal hesaplamalarda omik direnç göz ardı edilir.

Senkron motorunda, senkron jeneratörüyle aynı mod vardır ve Em ile gösterilir. Senkron motoru reaktansı ve Senkron motoru terminal gerilimi sırası ile X_m, Em tanımlanır.

Aktarılan güç denklemi

P: Jeneratörden motora aktarılan güç Denklem 3.1'de gösterilmiştir.

$$P=\frac{E_g E_m}{X_{Total}}\sin\delta \qquad (3.1)$$

δ: Delta : Δ

δ_g : Senkron jeneratörünün rotor akısı, stator akısından ileridedir.

$$\delta=\delta_g+\delta_L+\delta_m \tag{3.2}$$

δ_L : Jeneratör barasında bulunan terminal gerilimleri ve rotor akısı arasındaki açı farkını ifade eder. Senkron jeneratörünün stator akısı, senkron motorunun stator akısından öndedir.

Burada aktarılan gücün yönü, jeneratörden rotora doğru incelenmektedir.

δ_m : Motorun dahili rotor açısı: Rotorun, stator kaynaklı alana göre geri olduğu açıdır.

$$X_T=X_g+X_L+X_m \tag{3.3}$$

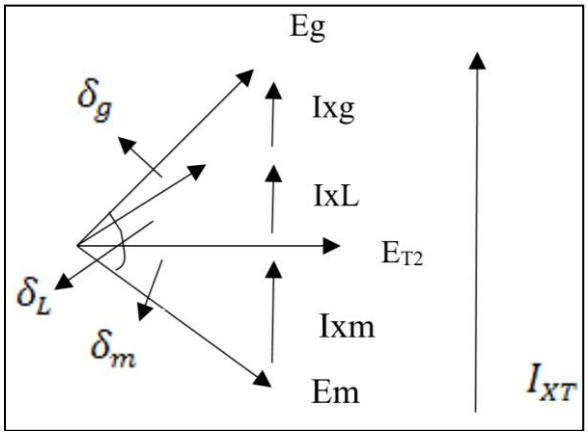
X_T : Toplam reaktans

X_g : Motor reaktansı

X_L : Hat reaktansı

X_m : Jeneratör reakatansı

Rotor güç-açı ilişkisi Fazör diyagram olarak Şekil 3.7'deki gibi olacaktır.



Şekil 3.7. Aktarılan güç fazör diyagramı

$$\delta=\delta_g+\delta_L+\delta_m \tag{3.4}$$

Akım denklemi, Denklem 3.5'de gösterilmiştir:

$$IX_T = IX_g + IX_L + IX_m \tag{3.5}$$

δ'ya ait değişiklikler göz önünde bulundurularak güç, Denklem 3.6'daki gibi gösterilebilir:

$$P = \frac{E_g E_m}{X_T} \operatorname{Sin}\delta \tag{3.6}$$

Dolayısıyla, jeneratörden motora doğru maksimum seviyede güç iletilebilmesi için gerekli ideal denklem aşağıdaki gibidir:

$\delta = 90^\circ$ olursa maksimum gücü aktarmış oluruz.

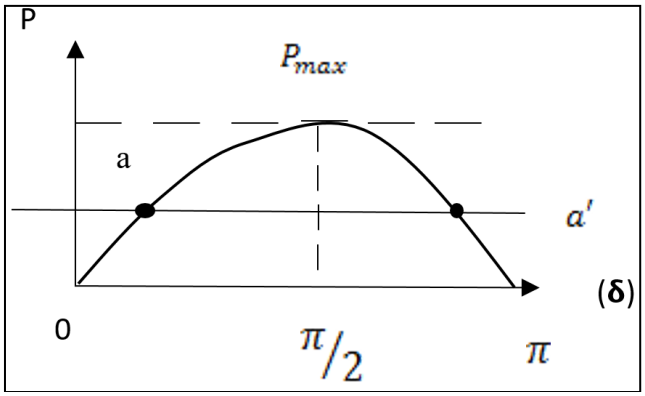
$$\delta = 0 \Rightarrow \sin\delta = 1 \Rightarrow \rho = 0 \tag{3.7}$$

$$\delta = \frac{\pi}{2} \text{ ve ya } 90^\circ \Rightarrow \sin\delta = 1 \Rightarrow P = \frac{E_g E_m}{X_{Total}} P_{MAX} \tag{3.8}$$

Açı faktörü de göz önüne alınarak elektriksel güce ait değişimler Şekil 3.8'deki gibi grafikte gösterilmektedir.

Şekil 3.8'deki Grafikte a′ ve a, enerji rezerv seviyesini göstermektedir. Enerji ihtiyacına göre a′ ve a seviyeleri değiştirilebilir. Bu şekilde güç sisteminde anlık yük giriş çıkışları sırasında meydana gelebilecek kararsızlık durumları da önlenebilir. Şekildeki gibi, eğer a-a′ noktasında bir hata oluşursa veya daha fazla güce ihtiyaç duyulursa, jeneratörde yeterli rezerv bulunduğu için a′ ve a noktaları sistem kararlılığını kaybetmeksizin hareket ettirilebilir.

- a iş noktası: kararlı bir iş noktasıdır.
- a′ iş noktası: kararsız bir iş noktasıdır.

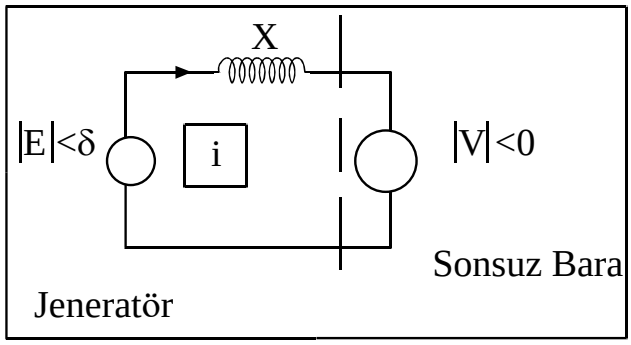


Şekil 3.8. Enerji rezerve eğrisi

3.3. Sonsuz Baraya Bağlı Olan Tek Jeneratörlü Bir Güç Sisteminin Modellenmesi

3.3.1. Sonsuz baranın tanımı

Sonsuz baranı genel anlamda gerilimi 1 pu ve rotor açısının derecesi 0 olan bara olarak Şekil 3.9'daki gibi tanımlanır (Magallones, Singh ve Pinthurat, 2016; Pai, 1981).



Şekil 3.9. SMIB sistem tek hat diyagramı

$$E=jXI+V \Rightarrow I=\frac{E-V}{jX}(KVL) \tag{3.9}$$

Görünür güç: S

$$S=VI^{*}=V(\frac{E-V}{X})^{*} \tag{3.10}$$

Denklem 3.11, Denklem 3.12'de sadeleştirilmiştir.

$$S=\frac{|E||V|}{X}\angle(g_0-\delta)-J\frac{|V|^2}{X} \tag{3.11}$$

$$S=\frac{|E||V|}{X}\text{Sin }\delta+J(\frac{|E||V|}{X}\text{Cos}\delta-\frac{|V|^2}{X}) \tag{3.12}$$

Aktif güç (P) denklemi, Denklem 3.13'te gösterilmiştir.

$$S=P+jQ \Rightarrow P=\frac{|E||V|}{X}\text{Sin}\delta \tag{3.13}$$

Reaktif güç denklemi, Denklem 3.14'te gösterilmiştir.

$$Q=\frac{|E||V|}{X}\text{Cos}\delta-\frac{|v|^2}{X} \tag{3.14}$$

Eğer sonsuz bara kaldırılırsa ve yerine senkron bir makine monte edilirse, yeni senkron makine farklı bir rotor açısına sahip olacaktır. Yani iki senkron makinenin rotor açıları arasındaki fark hiçbir zaman sıfır olamayacaktır.

Eğer türbinin governor vanası daha fazla açılırsa, rotora bağlı olan momentum artacaktır. Böylece "P" de yükseliş gösterecektir. Aktif güç (P) yükseldiğinde ise momentum (T) değeri ve rotor açısı da aktif güç ile doğru orantılı olarak yükselir (Magallones, Singh, ve Pinthurat, 2016; Pai, 1981).

T: momentum

$$T\uparrow=P\uparrow=\delta\uparrow \tag{3.15}$$

Örneğin sonsuz baraya bağlı bir jeneratörün δ, E, Q ve P miktarlarını şöyle hesaplanır.

$X=0.7$ pu $\cos\theta=0.8$ geride $\quad |I|=1$pu

Bir sonsuz barada: $v=1\angle 0^{o}pu$

$\cos\theta=0.8 \Rightarrow \theta=37^{o}$

$I=|I|\angle-\theta \Rightarrow I=1\angle-37^{\circ} \Rightarrow 0.8-j0.6$

Bir makine ve ona bağlı olan sonsuz barada E ilişkisi şöyle yazılabilir:

$E=j\times I+V=J0.7(0.8-J0.6)+1$

$E=1.42+j0.56 \Rightarrow E=1.53\angle 21.5^{o}$

$|E|=1.53PU$

$\delta=21.5^{o}$

Aktif güç $p=\frac{EV}{X}Sin\delta Þ\frac{1.53\times 1}{0.7}Sin21.5^{o}=0.8PU$

Reaktif güç $Q=\frac{EV}{X}Cos\delta-\frac{7^{2}}{x}=\frac{1.53\times 1}{0.7}Cos21.5^{\circ}-\frac{1^{2}}{0.7}$

$Q=0.6PU$

$S=P+JQ=0.8+J0.6$

Söz konusu sistemde arıza meydana geldikten sonar türbinin buhar vanası %20 oranında fazladan açılıyor olsun.

$P^{'}=1.2P \Rightarrow 1.2\times 0.8=0.96PU$

$E^{'}=E=1.53PU$

Üretim rezervi %20 artarsa, eskisine nazaran güç 1,2 kat artış gösterir.

Arızadan sonra gerilim değişmediği için;

Jeneratörün dahili gerilimi $E^{'}=E=1.53PU$

Açı değişimleri $P' = \frac{E'V}{X}\text{Sin}\delta' \Rightarrow \text{Sin}\delta' \Rightarrow \frac{0.96\times0.7}{1.53\times1}\delta' = 26.1^{o}$

'P' arttığı için makinenin δ açısı da artar. $\delta' = 26.1^{o}$ $\delta = 21.5^{\circ}$

Aktif gücün artması sonucunda reaktif güçteki değişim aşağıdaki gibi olur:

$$Q' = \frac{1.53\times1}{0.7}\text{COS}26.1 - \frac{1^2}{0.7} = 0.535\text{PU}$$

Sonuç: Aktif güç yükseldiği zaman, reaktif güç düşecektir.

Güç kontrol sistemiyle (uyarma sistemi) jeneratörün E değeri %20 arttırılırsa değerler şöyle değişecektir:

$$E'' = 1.2E = 1.2\times1.53 = 1.84\text{PU}$$

Uyarıcı sistem, jeneratörün terminaline ait olan gerilimi kontrol eder.

Görüldüğü gibi E'nin artmasıyla, δ azalmıştır.

$$p'' = p = 0.8\text{PU}$$

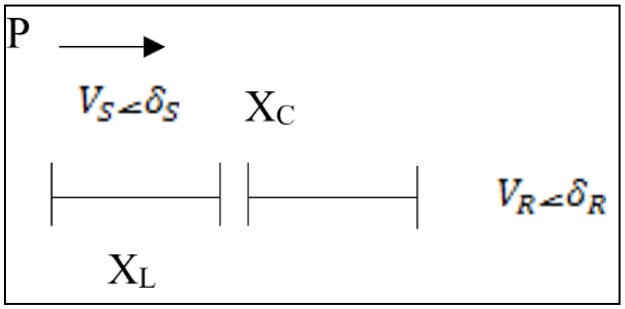
$$\delta'' = 17.8^{o}$$

$$Q'' = \frac{1.84\times1}{0.7}\text{COS}17.8 - \frac{1^2}{0.7} = 1.07\text{PU}$$

Yukarıdaki örnekte, governor türbini kullanılarak çıkış gücü arttırılmış ve sonuçta δ açısı da yükselmiştir. İkinci durumda ise uyarıcı sistem yoluyla E'nin artışı sonucunda δ'nın azaldığı tespit edilmiştir.

Governor türbini kontrol edilerek aktif güç ve senkron makinesinin rotor açısı düzeltilmiştir. Daha sonra ikinci bir yöntem olan güç kontrol sistemi uyarıcıları ile de güç ve açı artışı sağlanmıştır. Aktif güç ve açı artışını sağlayabilmek için kullanabilecek üçüncü bir yöntem

daha mevcuttur. Şekil 3.10'daki gibi sistemin sonuna bir kondansatör eklenmesi veya FACTS elementleri kullanılması yoluyla yapılabilir.



Şekil 3.10. Güç sistemlerinde seri kondansatör

$$-P = \frac{V_S V_R}{X_L - X_C} \text{Sin}\delta \tag{3.16}$$

Arıza anındaki güç ilişkisi (kararsız durum)

$$-P = \frac{V_S V_R}{X_L - X_C} \text{Sin}\delta \tag{3.17}$$

Arıza giderildikten sonraki güç ilişkisi (kararlı durum)

3.4. Zıt Güçler Arasındaki Kararlık-Denge

Bir güç sisteminde sistem kararlı durumda iken; giren mekaniksel momentum ile çıkan elektriksel momentum arasında bir denge mevcuttur. Bu denge, hızın sabit kalmasına neden olur. Kısa devre hataları da dahil edildiğinde söz konusu denge, statik kararlılık konusu içerisinde açıklanabilir.

Güç sistemleri arasında bir hata oluşursa, giren mekanik momentum ve çıkan elektrik momentum arasındaki denge nispeten ortadan kalkar. Dönen cisimlerin hareket kanununa göre senkron makine rotoru pozitif veya negatif bir hıza sahip olacak, böylece diğer jeneratörlere göre yüksek veya düşük hızda dönecektir. Bu koordinasyonsuz dönme rotor açısını değiştirerek sistemin kararlılığını bozacaktır.

Şekil 3.11'de farklı jeneratörlerin rotor açısı zaman bazında derece cinsinden gösterilmektedir.
Bir güç sisteminde, n adet senkron jeneratör olduğu ve bu jeneratörlerin kalıcı durumda çaşlıştıkları varsayıldığında (jeneratörleri $\delta_1, \delta_2, \delta_3 \dots \delta_n$ ile gösterilmiştir) ve bu sistemle ilgili diyagram üç kısıma bölündüğünde:

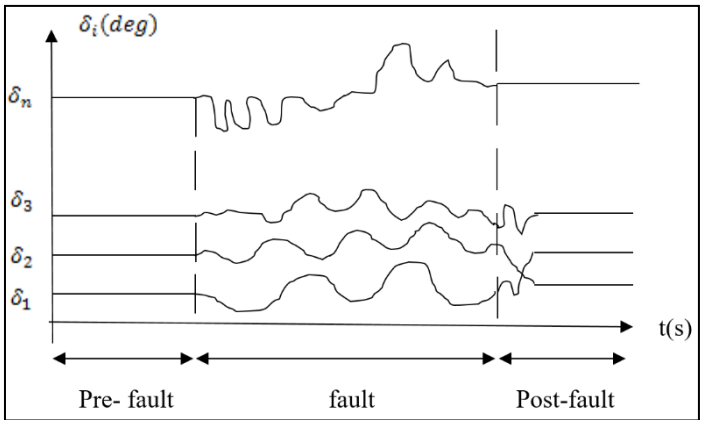
- Pre-fault: hatadan (kısa devreden) önce
- Fault: hata (kısa devre) esnasında
- Post-fault: hatadan (kısa devreden) sonra

Dolayısıyla, diyagram üç farklı zaman dilimine bölünmektedir. Kısa devre hatalarından önce senkron jeneratörlere ait rotor açıları birbiriyle paraleldir. Bu durum ise güç sisteminde bulunan jeneratörlerin koordineli çalıştıklarına dair bir kanıttır.

Eğer jeneratörlerin normal fonksiyonlarında bir hata oluşursa, rotor açılarında değişim olduğunu görürüz. Örneğin sistemde üç faz kısa devresi oluştuğunda koruyucu sistemler devreye girer ve arızanın kısa sürede ortadan kaldırılmasıyla sistem post-fault (hatadan [kısa devreden] sonra) durumuna geçer.

Arıza meydana geldiğinde rotor açıları, Şekil 3.11'de görüldüğü gibi jeneratörler arasında değişiklikler göstermeye başlar; ancak daha da önemlisi hata sonrasında ortaya çıkan ve çıkabilecek durumlardır. Çünkü bu durumda sistemin senkron durumunu koruyup koruyamayacağı görülür.

Şekil 3.11'deki gibi üç farklı durum için de rotorun açı değişimleri göz önünde bulundurulduğunda, güç sisteminin kendi kararlılığını koruduğu görülmüştür. Burada fark edileceği üzere rotor açıları az miktarda değişmiştir. Ama önemli olan nokta, rotor açıları arasındaki senkronizasyonun korunmasıdır. Buradan da anlaşılacağı üzere esasen bu güç sistemi kısa devre arızasından sonra kararlı durumunu korumuştur.



Şekil 3.11. Güç sisteminde hata sonrası rotor açısı değişim şeması

3.5. Senkron Edici ve Sönümleyici Momentumlar

Bir kısa devrenin meydana gelmesi sonucunda senkron bir makinenin momentumu iki bileşene ayrılır:

$$\Delta T_e = T_s \Delta\delta + TD\Delta\omega \qquad (3.18)$$

$T_s\Delta\delta$: Senkron edici momentum

T_s : Senkron edici momentumun katsayısı

$TD\Delta\omega$: Sönümleyici momentum($\Delta\omega$ ile aynı faza sahiptir)

TD: Sönümleyici momentumun katsayısı

Bir güç sisteminin var olması için her iki bileşeninde yeterli ölçüde mevcut olması gerekmektedir.

3.5.1. Güç sisteminde senkron edici ve sönümleyici momentumların eksikliği

Bir güç sisteminde senkron edici momentumların eksikliği rotor açısına bağlı olan ve dalgalanma türünden olmayan kararsızlığa yol açar. Sönümleyici momentumların eksikliği ise dalgalanma türünde bir kararsızlığa neden olur.

3.6. Rotor Açısının Kararlılığı (Küçük Sinyal Kararlılığı)

Rotor açısının kararlılığı, bir güç sisteminde bulunan birbirine bağlı senkron makinelerin, kendilerini senkron modunda tutma gücüdür. Rotor açısının kararlılığı konusunda en önemli faktör, rotor dalgalanmalarına karşı senkron makinenin çıkış sinyalinin davranışıdır. Rotor açısı kararlılığı, birbirine bağlı senkronize makinelerin normal çalışma koşulları altında ve bir kararsızlığa maruz kaldıktan sonra senkron kalma kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, jeneratörler tarafından beslenen toplam aktif elektrik gücü daima yükler tarafından tüketilen aktif güce eşit olmalıdır; bu aynı zamanda sistemdeki kayıpları da içerir. Yük ve üretim arasındaki bu denge, jeneratör girişi veya mekanik tork ile jeneratör çıkışı veya elektrik torku arasındaki denge ile ilişkilendirilebilir. Sistemdeki bir aksaklık bu dengeyi bozabilir, bu da jeneratörlerin rotorlarının hızlanmasına veya yavaşlamasına neden olur. Bir jeneratör geçici olarak diğerinden daha hızlı çalışırsa, rotorunun yavaş makineninkine bağlı olarak açısal konumu artacaktır. Ortaya çıkan açısal fark, teorik olarak bilinen güç açısı ilişkisine bağlı olarak yükün bir kısmını yavaş makineden hızlı makineye aktarır. Bu durum, hız farkını ve dolayısıyla açısal ayrımı azaltma eğilimindedir. Açısal ayrılmanın daha da artması, güç transferinde bir azalmaya yol açarak daha fazla kararsızlığa neden olabilir (Murthy ve Pavella, 1994).

3.6.1. Rotor açısının kararlılığının sınıflandırılması

1.Küçük ya da dalgalı sinyal kararlılığı (Small Signal Stabilitiy)
2.Büyük ya da geçici arıza kararlılığı (Transient Stability)

<u>Küçük ya da dalgalı sinyal kararlılığının incelenmesi</u>

Senkron durumunda olan bir güç sisteminin küçük çaplı arızaların sonrasında tekrar kendini toparlamasına küçük ya da dalgalı sinyal kararlılığı denilir.

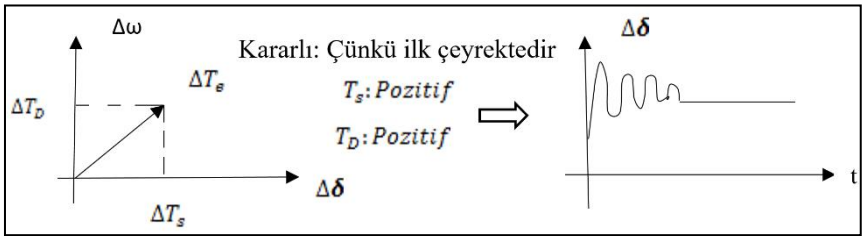
Diğer bir ifadeyle yükte ve enerji üretimindeki küçük ve sürekli değişimler, küçük arıza kararlılığı olarak adlandırılır. Bu durumda güç sisteminin denklemleri lineer olacaktır. Küçük Sinyal Kararlılığı 10 ila 20 saniyelik zaman dilimleri arasında gerçekleşir (McPherson ve Laramore, 1990; Iliceto ve Cinieri, 1977; Murthy ve Pavella, 1994).

3.6.2. Küçük Sinyal Kararlılığı incelemesinde dikkat edilmesi gereken önemli faktörler

Küçük ya da dalgalı sinyal kararlılığının analizinde iki tür karasızlık meydana gelebilir:

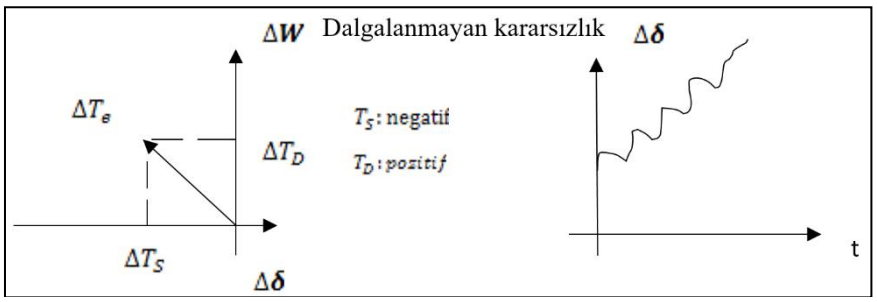
a. Rotor açısı kararsızlığı: Rotorun açısı, senkron edici momentumun eksikliği nedeniyle artar. Bu durum senkron jeneratör üzerinde "Otomatik Gerilim Regülatörü (Automatic Voltage Regulator - AVR)", yani otomatik gerilim ayarlayıcısı bulunmamasından kaynaklanır. Bu durum, senkron momentumunun eksikliğe maruz kalma durumudur. Eğer bu eksiklik meydana gelmezse, rotorun açısı dalgalanmayan bir şekilde çoğalır.

Şekil 3.12'de rotor açısının kısa devre sonrasındaki kararlılığı gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Senkron jeneratör rotor açı dengesizliği

Şekil 3.13'te güç sisteminde momentum eksikliğinden kaynaklanan rotor açısı dengesizliği gösterilmiştir.

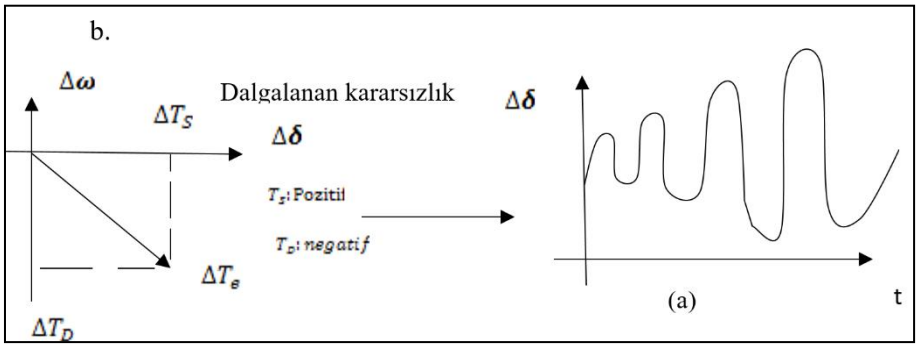


Şekil 3.13. Senkron jeneratör momentum eksikliği

Not: Günümüzde tüm jeneratörlere AVR monte edildiği için, Şekil 3.14'teki türde kararsızlık çok fazla görülmemektedir.

b. Güç sistemlerinde rotor sönümleyici momentumunun azalması: Sönümleyici momentum eksikliğinden dolayı rotor dalgalanmalarının periyodu artar. Bu durumda, sistem rotor açısı kararlılığı yönünden tamamen kararsız duruma gelir. Bu kararsızlık, küçük sinyal kararsızlığı olarak tanımlanır. Dolayısıyla, güç sistemlerinin küçük sinyal analizini yapmak için çoğunlukla rotorda meydana gelen dalgalanmalara ve sönümleyici momentum seviyesinin düşüklüğüne bakılır. Küçük sinyal kararsızlık durumları, sönümleyici momentum eksikliği de göz önünde bulundurularak Şekil 3.14'teki gibi gösterilebilir.

Şekil 3.14'te T_s pozitiftir; yani sönümleyici momentumu eksiktir. T_D ise negatiftir; bu yüzden ortaya çıkan kararsızlık dalgalanan türden olacaktır. Rotor açısı Şekil 3.14'te oluşan dalganın gitgide artan aralığında gözlemlenmektedir. Güç sistemlerinde bu tür dalgalanmalara kararsızlık durumu denilir.



Şekil 3.14. Senkron jeneratör sönümleyici momentum eksikliği

3.6.3. Bir güç sisteminde Küçük Sinyal Kararlılığının iyileştirilmesi için kulanılan yöntemler

a. Makine modları: Bu modlar, bir santralden diğer santrallere olan dalgalanmalardır.
b. Bölgeler arası modlar: Bir bölgede olan birkaç senkron makinenin diğer makinelere göre dalgalanmalarıdır.
c. Kontrol modları
d. Dönemeç modlar: Bu modlar türbinin dönen bileşenleriyle ilgilidir.

3.7. Geçici Sinyal Kararlılığı (Transient stability)

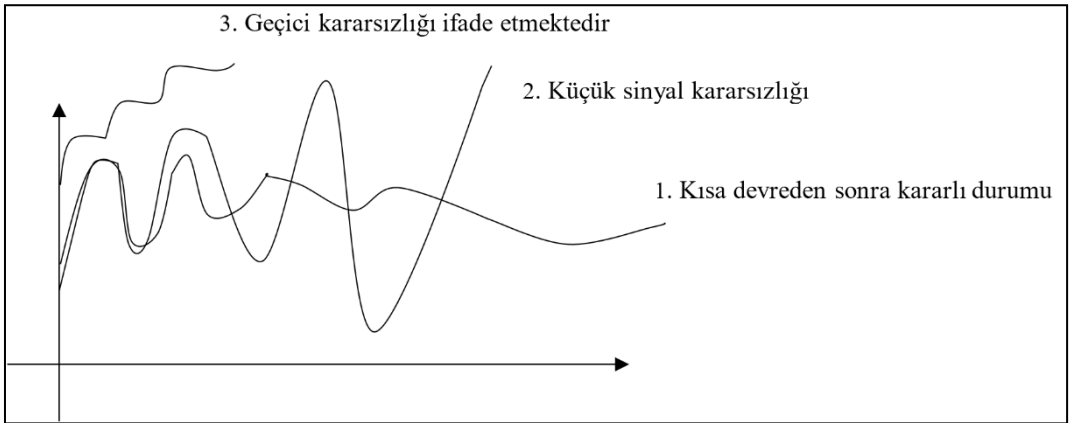
Bir güç sisteminde kısa devre veya benzeri bir arıza meyadana geldiğinde senkron durumunun korunmasına geçici kararlılık denilir (McPherson ve Laramore, 1990; Berrou, Glavieux, ve Thitimajshima, 1993).

3.8. Güç Sistemlerinde Kısa Devre Çeşitleri

a. Üç fazlı kısa devre
b. Faz toprak kısa devresi
c. İki faz arası kısa devre
d. Büyük bir santralin aniden devreye girmesi veya çıkması
e. Ani yüklerin devreye girmesi veya devre dışı bırakılması

Bu aşamada geçici kararsızlık ve küçük sinyaller, Şekil 3.15'te olduğu gibi gösterilebilir:

1. No'lu eğri kısa devreden sonra kararlı durumu göstermektedir.
2. No'lu eğri küçük sinyal kararsızlığı durumunu göstermektedir.
3. No'lu eğri geçici kararsızlığı ifade etmektedir.



Şekil 3.15. Geçici karasızlık ve küçük sinyal kararlılığı

3.9. Güç Sistemlerinin Dinamik Kararlılığı

Farklı çalışmalarda dinamik kararlılık, hem geçici kararlılık hem de Küçük Sinyal Kararlılığı anlamında kullanılmaktadır. Örneğin Kuzey Amerika'da yayımlanan bazı çalışmalarda

dinamik kararlılığı, Küçük Sinyal Kararlılığıyla bir tutulmaktadır; yani bu bölgede dinamik kararlılıktan bahisle Küçük Sinyal Kararlılığı ifade edilmektedir. Ancak Almanya ve Fransa gibi ülkelerde ortaya konulan çalışmalarda dinamik kararlılığı, geçici kararlılıkla bir tutulmaktadır. Dolayısıyla, terimlerde mevcut olan söz konusu belirsizliklerden dolayı hem IEEE hemde CIGRE (International Council of Elektrik Systems) dinamik kararlılık teriminin kullanılmamasını tavsiye etmektedir (Subcommittee, 1994).

3.10. Frekans Kararlılığı

Frekans kararlılığı, bir güç sisteminin şiddetli bir sistem bozulmasından sonra sabit frekansı muhafaza etme kabiliyetini ifade etmektedir; bu da üretim ve yük arasında önemli bir dengesizliğe neden olur. Söz konusu durum, istenmeyen minimum yük kaybıyla sistem üretimi ve yük arasındaki dengeyi koruma veya geri yükleme yeteneğine bağlıdır. Ortaya çıkabilecek dengesizlik, sürekli frekans dalgalanmaları şeklinde meydana gelir. Frekans kararsızlığının tipik bir nedeni, genel sistem frekansının düşmesine neden olan üretim kaybıdır. Genel olarak frekans kararlılığı problemleri, ekipman cevaplarındaki yetersizlikler, kontrol ve koruma ekipmanının zayıf koordinasyonu veya yetersiz üretim rezerviyle ilişkilidir (Subcommittee, 1994).

3.11. Gerilim Kararlılığı ve Çöküşü

Bu konu, bir güç sisteminin arıza veya kısa devre oluştuktan sonra kalıcı duruma ulaşmak için daha önceden belirlenmiş bara gerilimlerini korumasını içerir. Dolayısı ile, gerilimde oluşan kararsızlığın asıl nedeni, güç sisteminin reaktif gücü sağlamada yetersiz kalmasıdır. Diğer bir deyişle, reaktif gücün gerilim ile doğru orantılı olmasından dolayı elektirik güç sistemi kendi ağında gerek duyulan reaktif gücü iyi bir şekilde temin edememiştir (Dhuness, 2012; Padiyar, 2008).

Eğer ağın bir bölümünde bazı nedenlerden dolayı (büyük bir üretim ünitesinin girişi veya çıkışı gibi) gerilim düşerse ve bu düşüşü başka jeneratörler veya reaksiyon gücünü telafi eden sistemler var olan sisteme geri kazandırırsa, gerilim normal haline geri döner. Aksi takdirde gerilim düşüşü, kabul edilemeyen bir ölçüye ulaşıp güç sistem ağının diğer bir bölümünde elektrik kesintisi meydana getirecektir ki bu duruma gerilim çöküşü denir (Taylor, 1994; Lu, Sun ve Mei, 2001; Blackert ve Wilson, 1996).

3.12. Gerilim Kararlılığının Sınıflandırılması

- Büyük arıza, geçici sinyal kararlılığı
- Küçük arıza, Küçük Sinyal Kararlılığı

Genel olarak gerilim kontrol üniteleri aşağıdaki gibi tanımlanırlar:

1) Senkron makinesi üzerine monte edilen AVR'lar
2) FACTS elementleri
3) Seri ve paralel kondansatörler
4) Transformatörlar üzerine monte edilmiş kademe değiştiriciler (Hill, 1993).

Bir elektrik güç sisteminin simüle edilmesinin, elektrik güç sisteminin çok masraflı bir sistem olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Enerjinin üretimi, iletimi ve tüketimi hakkında ayrıntılı bir araştırma yapıldığında bu sistemin ne kadar pahalı olduğu görülecektir. Güç kontrol sistemlerinin incelenmesi esnasında sistem, kararlı halden kararsız hale düşebileceğinden çok büyük maddi zararlara yol açabilecektir. Bu nedenle, sistemin kararlığına bağlı kontrol yöntemlerini test etmek için simülasyonlar kullanılır. Dolayısıyla, modern dünyada çalışmalar ilk başta yazılımlar ile simüle edilip istenilen sonuçlar elde edildikten sonra gerçek sistem üzerinde uygulanırlar. Sonuç olarak, güç sistemi simülasyon ögeleri kararlılık analizi çalışmalarında büyük önem taşımaktadır. Bu hedefe ulaşmak üzere günümüzde, kontrol sistemleri ile ilgili çok sayıda güç simülasyon yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılımlardan bazıları aşağıda sunulmaktadır:

1. Sim Power System (Simulink MATLAB)
2. DIgsILent Power Factory
3. PSS/E: Power System Simulator

MATLAB yazılımında güç sistemlerinde uygulanabilen birkaç adet "Araç Kutusu (*Tool Box*)" mevcuttur. Bu *tool box*lardan birisi "PSAT Power System Analysis tool box"dır. İtalyan bir profesör tarafından icat edilmiştir (Hingorani, 1994). Bu *tool box*, güç sistemlerindeki Küçük Sinyal Kararlılığı çalışmaları için çok önemli bir yol göstericidir. *tool box* vasıtasıyla sistemin tüm kararlı ve karasız modları gösterilebilmektedir. Ayrıca,

kararlılık sağlayıcı sistemin fonksiyonu yine *tool box* yoluyla rahat bir şekilde görülebilecektir (Kundur, 1994).

MATLAB yazılımıyla ilgili bir diğer nokta ise güç kontrol sistemlerinin kodlama yoluyla yazılım sayesinde uygulanabilmesidir. Çünkü güç kontrol sistemleri matematiksel denklemlerce modellenebilir.

4. UYARMA SİSTEMİNİN DİNAMİK FONKSİYON KRİTERLERİ

Bir güç sisteminde mevcut olan en önemli kontrol edici elementlerden biri de uyarma sisteminde bulunan elementlerdir. Güç sisteminde FACTS, HVDC ve governor türbini gibi başka kontrol edici elementler de bulunmaktadır. FACTS elemetleri çok pahalı olup, HVDC elementleri ise sistemin sadece bazı özel noktalarında kullanılmaktadır. Dolayısıyla HVDC ve FACTS elementleri güç sistemlerinin içerisinde sürekli kullanılamazlar. Governor türbinin işlevi ise tamamen farklı olup, frekans kararlılığının kontrolünün sağlanmasıdır. Uyarma sisteminin güç sistemleri üzerindeki en önemli etkisi kararlılığın iyileştirilmesidir (Kundur, 1994).

4.1. Güç Sistemlerinde Kararlılığın İyileştirilmesi

Güç sistemlerinin kararlılığının iyileştirilmesinde, uyarma sisteminin dinamik fonksiyonuna yönelik iki önemli kritere dikkat edilmektedir:

a. Büyük sinyallere göre olan uyarma sistemlerinin fonksiyon kriterleri
b. Küçük sinyallere göre olan uyarma sistemlerinin fonksiyon kriterleri

Büyük ve küçük sinyal terimleri, hem gerilim hem de rotorun açısı için, güç sistemlerinin kararlılığı konusunda açıklanmıştır.

4.1.1. Büyük sinyal kararlılığı fonksiyonuna ait olan kriterler

Büyük sinyal kararlılığı (geçici kararlılık) çerçevesinde bulunan en önemli konu, bir güç sisteminde geçici kararlılık; o sistemin büyük bir arızadan sonra karalılığını koruma ve dalgalanmaları kontrol etme gücüdür (Kundur, 1994). Büyük bir hataya maruz kalmış bir sistemin değişkenleri belli bir zaman içerisinde kararlılığa doğru ilerliyor veya kalıcı değerlere yaklaşıyor ise o sistem kararlı olacaktır. Bu çalışmalarda büyük bir arızanın simülasyonu genelde kısa devre arızası ile yapılır.

Geçici kararlılık incelemelerinde kullanılan en basit yöntem, diferansiyel denklemlerin adım adım çözülmesi yöntemidir. Bu yöntemle hatadan önce, hata sırasında ve hatadan sonraya

ait olan matematiksel denklemler ve farklı ünitelerin yük-açı değişimleri analiz edilir. Eğer tüm yük açıları kararlıysa sistem de kararlı olacaktır.

Hataya maruz kalmış bir güç sisteminin analizini yaptığımız diferansiyel denklemleri üç gruba ayrılır:

a. Birinci grup: Hatadan önce güç sistemine hakim olan denklemler (Pre Fault)
b. İkinci grup: Hata sırasında güç sistemine hakim olan denklemler (During Fault)
c. Üçüncü grup: Hatadan sonra güç sistemine hakim olan denklemler (Post Fault)

Meydana gelmiş arızanın büyük olması durumunda, sistemin hata giderildikten sonraki durumu, hatadan önceki durumuna göre farklılık gösterebilir. Dolayısıyla sistemin kararlı denge noktası (*Stable Equilibrium Point*) hata meydana gelmeden önce ve hata giderildikten sonraki durumda farklı olacaktır.

Geçici kararlılık konusunda tanımlanan en önemli faktörlerden birisi kritik hatanın giderildiği zaman dilimidir (*Critical Time*). Bu zaman diliminde röleler çalışmadığı takdirde sistem, senkronize durumunu kaybedecektir. Kritik zaman dilimini belirtmek için iki önemli faktör göz önünde bulundurulmalıdır:

a. Rölelerin hatadan sonraki tepki zamanının belirlenmesi (*Cleaning Time*): Rölelerin işleme başlama zamanı, kritik hatanın giderilmesi için gereken zaman diliminden daha kısa olmalıdır.
b. Güvenlik İndeksi (*Security Index*): Bu faktör, bir güç sisteminin güvenliğini belirlemede kullanılır. Bu indeks ne kadar büyük olursa, hata sırasında sistemin işlevselliği de bir o kadar kararlı olacaktır. Bu indeksin, diferansiyel denklemlerin doğrudan adım adım çözülmesi suretiyle bulunması mümkün değildir. Kritik zamanın bulunması için tüm hata durumlarında sistemin birkaç defa simüle edilmesi gerekmektedir.

4.1.2. Küçük Sinyal Kararlılığı fonksiyonuna ait kriterler

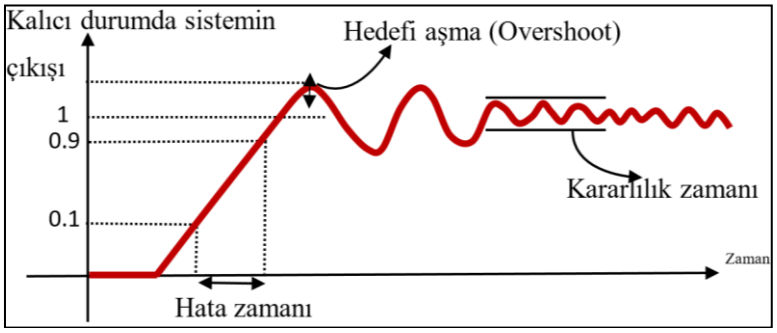
Bu kriterler bazı indekslere göre tanımlanırlar. En önemli nokta, küçük sinyali kullanmak suretiyle jeneratörün uyarma sisteminin kararlı çalışma noktası etrafında lineer yapılabilmesidir. Diğer bir önemli nokta ise Küçük Sinyal Kararlılığının, sistemin lineer

olması dikkate alınarak, geri besleme (feedback) fonksiyon indeksleri yoluyla analiz edilebilmesidir. Dolayısıyla, Küçük Sinyal Kararlılığı için iki grup tanımlanabilir:

a. Sistemin zamanına bağlı olan indeksler
1. Hata zamanı
2. Hedefi aşma (*Overshoot*) ölçüsü
3. Kararlılık zamanı

b. Sistemin frekans yanıtına bağlı olan indeksler

Hata zamanı, overshoot ölçüsü ve kararlılık zamanı indeksleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu şekilde yatay eksende "zaman", dikey eksende ise "sistemin çıkışı" belirtilmektedir.



Şekil 4.1. Güç sisteminde kalıcı durumda sistemin durumu

Ani hatadan sonra sistem çıkışı sıfır olarak kabul edilirse, sistem belli bir dalgalanma durumundan sonra kararlılık durumuna ulaşır.

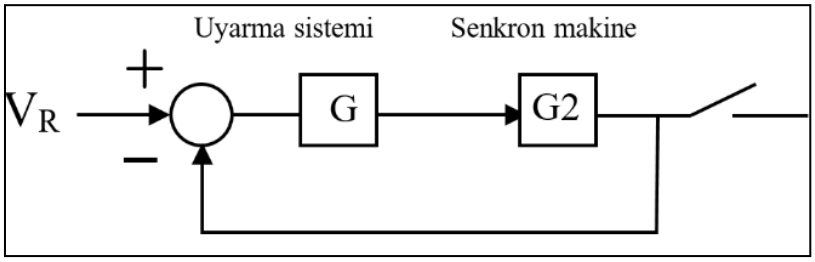
Hata zamanı, sistemin çıkışını %10'dan %90'a ulaştırmak için gereken zaman dilimidir.

Overshoot ise sistemin kalıcı durumuna göre maksimum çıkış miktarıdır.

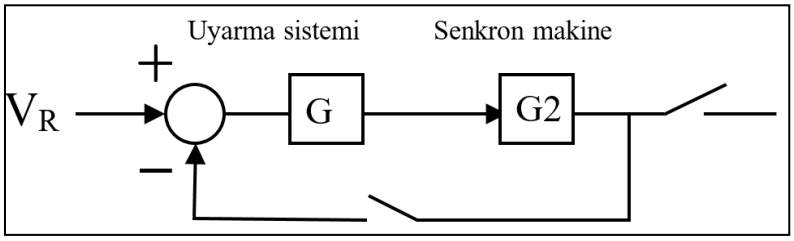
Kararlılık zamanı, sistemin çıkışının kalıcı duruma sadece ±%5 sapmayla geri dönme zamanıdır. Genelde Küçük Sinyal Kararlılığı için overshoot zamanı düşük tutulmaya çalışılır, çünkü yüksek overshoot miktarı sisteme zarar verebilmektedir. Kararlılık zamanının da sistem arızası sonrasında kararlılığa daha erken ulaşılması maksadıyla düşük tutulmasına gayret gösterilir.

4.2. Küçük Sinyal Kararlılığında Frekans Yanıtı İndeksleri

Şekil 4.2 ve 4.3'te Küçük Sinyal Kararlılığında frekans yanıtının analiz edilebilmesi için, açık halka ve kapalı halka kontrol durumlarında sistemin yük olmadan incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.2. Kapalı kontrol halka sistem bloğu



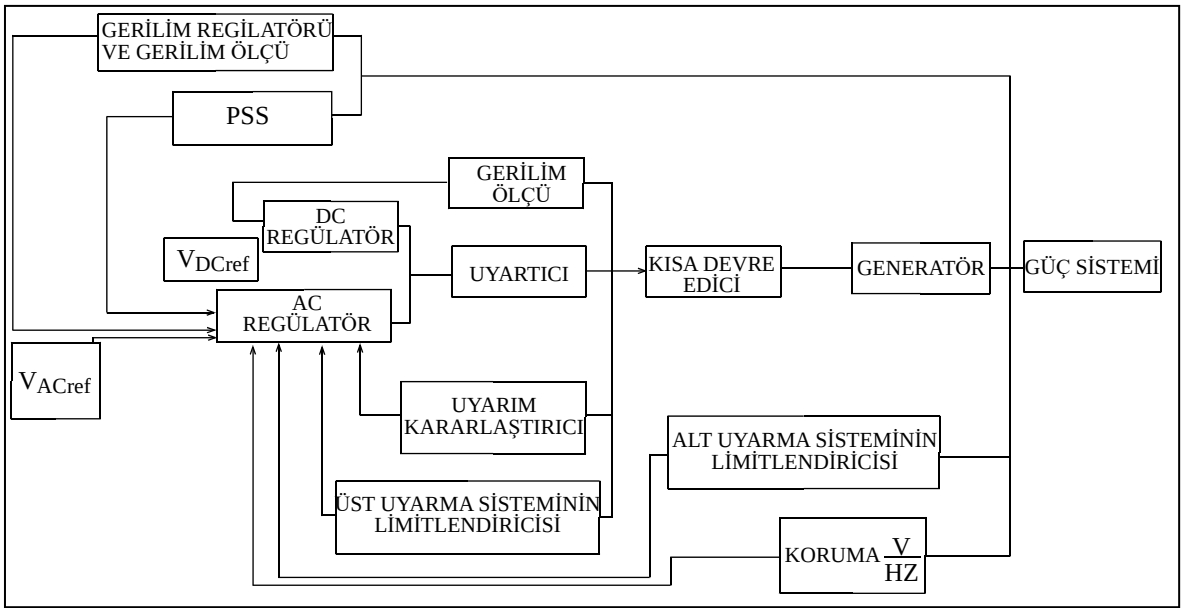
Şekil 4.3. Açık kontrol halka sistem bloğu

4.2.1. Frekans indekslerinin küçük sinyal kararlığında gruplandırılması

a. Düşük frekans verimi (G): G yüksek bir değerde olduğunda kalıcı durumda gerilimin daha iyi ayarlandığı ifade edilebilir.
b. Kapanma frekansı: Bu frekans (ω_C) ile gösterilir. ω_C'nin yüksek değerli olması sistemin işlevselliğinin ve yanıtlama süresinin hızlı olduğunu gösterir.
c. Faz sınırı ve verim sınırı (ω_m, G_m): ω_m ve G_m'in her ikisinin de yüksek değerde olması ise kapalı halka sistemin kararlı olduğunu kanıtlar.

4.3. Küçük Sinyal Kararlılığında Uyarma Sisteminin Kontrolü ve Koruma Fonksiyonları

Bu fonksiyonlar Şekil 4.4'teki diyagramda görülebilir:



Şekil 4.4. Uyarma sisteminin kontrol şeması

Kontrol ve koruma fonksiyonlarının açıklamaları:

1. AA ve DA ayarlayıcıları: AA ayarlayıcısı, stator gerilimini en başta belirlendiği gibi kararlı tutar. Esasen jeneratörün terminal gerilimini ayarlar. DA ayarlayıcısı ise jeneratörün uyarma gerilimini sabit tutar.
2. Alt uyarma ayarlayıcısı: Uyartımın özellikle küçük sinyal kararlığından çıkma düzeyine kadar düşmesini engeller; yani kısa devre gibi durumlarda oluşan bazı uyarmaları önler.
3. Ultra uyarma sınırlayıcısı: Çok fazla ve uzun süreli akışlarda jeneratörü aşırı ısınmaya karşı korur.
4. $\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{Hz}}$ koruması: Bu koruma ile terminal gerilimi aşağıdaki gibi hesaplanır:

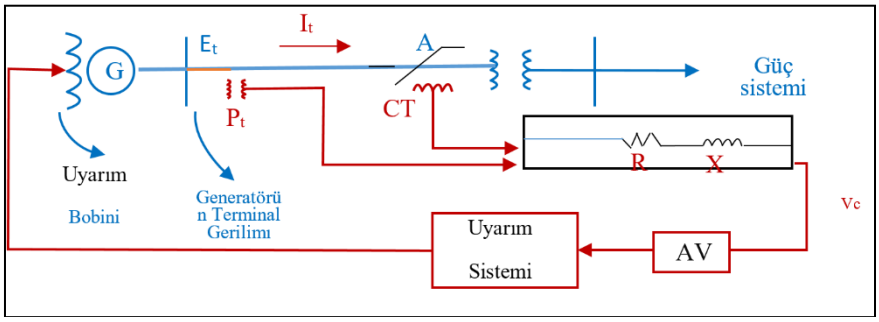
a. $\mathrm{E} = \mathrm{k}\varphi\mathrm{w} \rightarrow \varphi \simeq \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{w}} \sim \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{Hz}}$

Örnek olarak, eğer jeneratörün frekansı azalıp gerilimi artarsa, yani $\frac{V}{Hz}$ artarsa, çekirdekte bulunan manyetik akı miktarı da aşırı derecede artacaktır. Bu durumda sistemin kayıpları ciddi miktarda yükselir. Sonuç olarak, $\frac{V}{Hz}$ koruması generatörü ve tranformatörü manyetik akı artmasına karşı korur.

5. Uyarma sisteminin gerilim sınırlama devresi: Uyarma sisteminde tek yönlü çalışan elementler kullanıldığı zaman, akış güç sisteminin zıt yönünde yol alamaz. Sistemde bir

kısa devre meydana geldiğinde uyarma sisteminin ürettiği gerilim aşırı derecede artabilir ve bu da jeneratörün bobinine ciddi zarar verebilir. Sistemde bu tür arızaları önlemek için gerilim sınırlama devresi ile kısa devre yaptırılarak, uyarma sistemi tarafından üretilebilecek aşırı gerilimlerin jeneratör sistemine zarar vermesi önlenir.

6. Uyarma sisteminin stabilizeri: Stabilizerler uyarma sisteminde kararlı işlevin sağlanması için kullanılılırlar. Uyarma sistemin stabilizeri kendi içinde olmalıdır. Uyarma sisteminin dışındaki kararlılığın sağlanması için PSS kullanılır.
7. Gerilim regülatörü: Yukarıdaki diyagramda gerilim ölçme ve gerilim regülatörü adında bir ünite mevcuttur. Gerilim ölçme ünitesi jeneratörün terminal gerilimini ölçer. Diğer yandan, gerilim regülatörü ise jeneratörün kendi sargısındaki gerilimi veya ana bara üzerindeki gerilimi kontrol eder. Gerilim regülatörü ünitesinin analizleri Şekil 4.5'teki şema üzerinden yapılabilir.



Şekil 4.5. Uyarma sisteminin kontrol şeması

R_c: Jeneratör terminalinin rezistansını

X_c: Jeneratör terminalinin indüktansını

A noktası üzerinden gerilimin kontrolü sağlanır. Akım ve gerilim transformatörları kullanılarak V_c gerilim düşüşü Denklem 4.1'deki gibi hesaplanır.

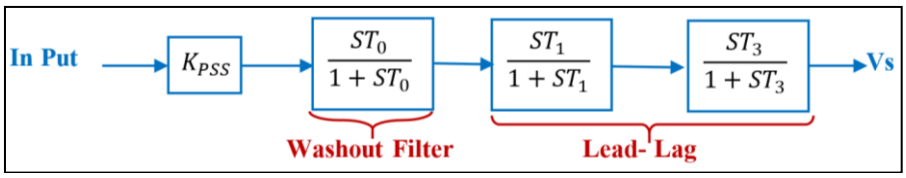
$$V_c = \left|\tilde{E}_t + (R_e + gx_i)I_t\right| \tag{4.1}$$

8. Güç sisteminin stabilizeri (PSS): PSS'nin görevi, uyarma sistemi için gerekli bilgi sinyallerini üreterek güç sisteminin dinamik işlevini iyileştirmektir. PSS aslında dalgalanmaların etkisini azaltarak küçük sinyal sisteminin kararlılığını arttırır. PSS'ye giren sinyaller üç gruba ayrılırlar:

1) Senkron jeneratörün hız değişimleri
2) Frekans değişimleri
3) Senkron jeneratörün hızlandırma gücü

4.4. PSS'nin Genel Diyagramı

Şekil 4.6'da PSS genel kontrol bloğu verilmiştir.



Şekil 4.6. PSS genel kontrol bloğu

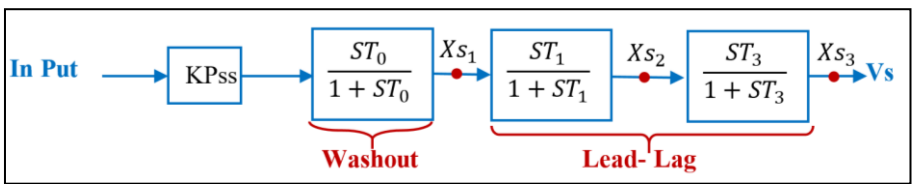
Input: PSS'ye giren sinyal, K_{PSS}: PSS verimi

Washout filter fonksiyonu: Sabit bir ωr değeri vardır. Washout filter fonksiyonu sadece açısal hızda değişiklik olduğunda PSS'ye tepki verdirmek suretiyle açısal hızın sabit değere eşitlenmesini sağlar (Kundur, 1994).

Not: PSS şu an için güçleri 50 MW'ın üzerinde olan jeneratörler üzerinde monte edilebilir. Çünkü 50 MW altı jeneratörler için ekonomik değildir.

İleri Faz-Geri Faz Gerilim düzenleyicisi (Phase Lead-Lag): Devredeki faz öncesi ve sonrası telafi işlevini PSS uygular.

Şekil 4.7'de PSS'nin genel kontrol bloğu verilmiştir. Blokda verildiği üzere PSS durumunun meydana gelebildiği noktalara $X_{S3}; X_{S_2}; X_{S_1}$ adı verilir.



Şekil 4.7. PSS genel kontrol kontrol bloğu

$$\dot{X}_{S_1} = -\frac{1}{T_5} X_{S_1} + K_{PSS} \Delta\omega r \tag{4.2}$$

$$\text{input} \Rightarrow \begin{cases} \Delta\omega r \\ Pa \\ Pa + \Delta\omega r \end{cases} \quad \text{hızlanma gücünün değişimleri}$$

$$\dot{X}_{S_2} = \frac{1}{T_2}\left(1 - \frac{T_1}{T_5}\right) X_{S_1} - \frac{1}{T_2} X_{S_2} + K_2 \frac{T_1}{T_2} \Delta\dot{\omega} r \tag{4.3}$$

$$X_{S_3} = V_s = \frac{T_3}{T_2 T_4}\left(1 - \frac{T_1}{T_0}\right) X_{S_1} - \frac{1}{T_4}\left(1 - \frac{T_3}{T_2}\right) X_{S_2} - \frac{1}{T_4} V_s + KPSS \frac{T_3 T_1}{T_2 T_4} \Delta\dot{\omega} r \tag{4.4}$$

4.5. PSS ve AVR'nin Genel Farkı

AVR, güç sisteminin geçici kararlılığını iyileştirmekle görevlidir ve bu görevi senkron edici momentumu kullanarak yerine getirir. PSS ise Küçük Sinyal Kararlılığını geliştirmek için kullanılır.

4.6. Küçük Sinyal Kararlılığı

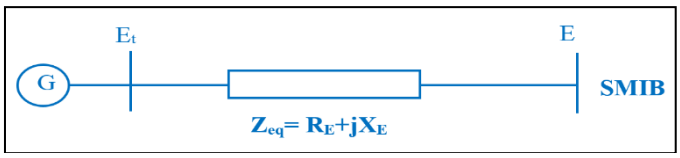
Bir güç sisteminde yüklerin sürekli devreye girmesi ve çıkması sonucunda meydana gelen küçük arızalardan sonraki sistem kararlığına Küçük Sinyal Kararlılığı denilir.

4.6.1. Küçük Sinyal Kararlılığının özellikleri

a. Küçük Sinyal Kararlılığında güç sistemi, çalışma noktası etrafında lineer olabilir.
b. Küçük Sinyal Kararlılığı analiz ve inceleme zamanı 10 ile 20 saniye arasındadır.
c. Matematiksel olarak Küçük Sinyal Kararlılığında özdeğer verilerinin elde edilmesi gerekir. Bu veriler elde edildiği takdirde güç sistemlerinde kararlılık analizi kolaylıkla yapılabilecektir. Eğer hesaplamalardan elde edilen sonuç negatif bir matematiksel değerse, bu durum sistemin kararlı olduğu anlamına gelecektir. Eğer sonuç pozitif ise sistem kararsız demektir. Sonuç sıfır olduğunda ise sistem kararlılığı sınırdadır ve her an meydana gelen küçük bir arıza ile güç sistemi kararsızlığa doğru gidebilir.

4.6.2. Tek makine ve sonsuz bara (SMIB) sisteminde Küçük Sinyal Kararlılığı

SMIB diyagramı Şekil 4.8'deki gibi çizilebilir:



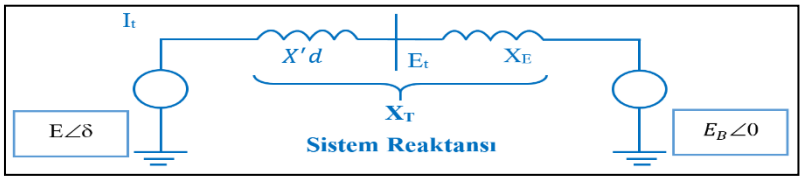
Şekil 4.8. Sonsuz bara tanıtım diyagramı

Sonsuz bara tanımı

Sonsuz bara, gerilimi ve frekansı sabit olan bir gerilim kaynağıdır. Sonsuz bara olması nedeniyle jeneratörün dinamiği, E_B gerilimi ve frekansında değişiklik yapmayacaktır. Küçük Sinyal Kararlılığı konusunda, küçük sinyali göstermek amacıyla hem uzay hem de bloklu gösterge türleri kullanılır. Küçük Sinyal Kararlılığı için ilk bloklu diyagram Heffron-Phillips tarafından önerilmiştir ve bu diyagram yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Kararlığa bağlı konularda ise jeneratörü modellemek maksadıyla klasik model kullanılmaktadır (Kundur, 1994).

SMIB sisteminde klasik modelleme yöntemi

Bu modelde jeneratör, reaktansa bağlı olan bir gerilim kaynağı olarak modellenmekle birlikte jeneratörün veya senkron makinenin içerisinde olan tüm dirençler gözden çıkartılır. Lineer diyagramının klasik model için çizimi Şekil 4.9'daki gibidir.



Şekil 4.9. SMIB sisteminin klasik model devresi
Akım denklemleri kullanılarak ağda bulunan kompleks ve aktif güçlerin hesaplanması:

$$X_T = X'_d + X_E \tag{4.5}$$

$$\tilde{I}_t = \frac{E'\angle_0 - E_B\angle -\delta}{JX_T} = \frac{E' - E_B\overbrace{(Cos\delta - JSin\delta)}^{\delta}}{JX_T} \quad (4.6)$$

'P' hava mesafesinin gücüdür. P, terminal jeneratörün gerilimini göstermez.
Ancak jeneratör modeli klasik olarak gösterilirken stator direnci göz ardı edildiğinden P, terminal jeneratörün gücü olarak da gösterilir ve böylelikle diğer analizler de yapılabilir.

$$S = P + JQ = \tilde{E}'\tilde{I}_t \quad (4.7)$$

$$S = \frac{E'E_B}{X_T}Sin\delta + J\frac{E'(E' - E_B Cos\delta)}{X_T} \quad (4.8)$$

Diğer önemli nokta, hava mesafesi momentumunun, hava mesafe gücüyle eşit olmasıdır. Hava mesafesi momentumu Denklem 4.9'daki gibidir.

$$Te = P = \frac{E'E_B}{X_T}Sin\delta \quad (4.9)$$

Rotor açısı kararlılığıyla ilgili olan en önemli denklemlerden birisi hava mesafesi momentumu denklemi, diğeri ise dalgalanma denklemidir (hareket denklemi). Her iki diferansiyel denklemden 3. Bölüm'de bahsedilmiştir.

4.6.3. Küçük sinyal kararlılığında denklemlerin lineer yapilma modeli ($Sin\delta, Cos\delta$)

Küçük Sinyal Kararlılığının yapılması için hava mesafesi momentumunun, $\delta = \delta_0$ çalışma noktası etrafında lineer bir denkleme dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu hedefe ulaşmak amacıyla ilk olarak hava mesafesi denklemindeki sinüs lineer edilir; böylece daha sonra hava mesafesi denkleminin tümü lineer hale getirilebilir (Kundur, 1994).

$\delta = \delta_0$ denge noktası etrafında $Sin\delta, Cos\delta$ lineer yapılması: $\Delta\delta$ ile gösterilen küçük bir sapma aşağıdaki denklemlerdeki gibi lineer hale getirilebilir.

$$\Delta\delta = \delta - \delta_0 \Rightarrow \delta = \Delta\delta + \delta_0 \quad (4.10)$$

δ_0= denge noktasındaki rotor açısı

$\mathrm{Sin}\delta, \mathrm{Cos}\delta$ denklemleri ve trigonometrik ilişkileri baz alarak:

$$\mathrm{Cos}\delta = \mathrm{Cos}(\delta_0 + \Delta\delta) = \mathrm{Cos}\delta_0 . \mathrm{Cos}\Delta\delta - \mathrm{Sin}\delta_0 . \mathrm{Sin}\Delta\delta \quad (4.11)$$

$$\mathrm{Sin}\delta = \mathrm{Sin}(\delta_0 + \Delta\delta) = \mathrm{Sin}\delta_0 . \mathrm{Cos}\Delta\delta + \mathrm{Cos}\delta_0 . \mathrm{Sin}\Delta\delta \quad (4.12)$$

Yukarıdaki denklemlerden elde edilen en önemli sonuç $\Delta\delta = 1$ olmasıdır.

$$\begin{cases} \mathrm{Cos}(\delta_0 + \Delta\delta) = \mathrm{Cos}\delta_0 + \Delta\delta . \mathrm{Sin}\delta_0 \\ \mathrm{Cos}(\delta_0 + \Delta\delta) - \mathrm{Cos}\delta_0 = \Delta\delta . \mathrm{Sin}\delta_0 \\ \mathrm{Sin}(\delta_0 + \Delta\delta) - \mathrm{Sin}\delta_0 = \Delta\delta . \mathrm{Cos}\delta_0 \end{cases} \quad (4.13)$$

Yukarıdaki denklemler dikkate alınarak $\mathrm{T_e}$, $\delta = \delta_0$ olan çalışma noktasında lineer hale getirildiğinde Denklem 4.14'teki gibi olur.

$$\mathrm{T_e} = \frac{\partial \mathrm{T_e}}{\partial \delta}\Delta\delta = \frac{\mathrm{EE'_B}}{\mathrm{X_T}}\mathrm{Cos}\delta_0(\Delta\delta) \quad (4.14)$$

Daha önce bir dalgalanma denkleminden, senkron jeneratör için iki adet difreansiyel denklem elde edilmişti. Bu iki denklem, Denklem 3.15'te gösterilmiştir. Söz konusu denklemleri, Denklem 3.16'daki denklemlerdeki gibi lineer hale getirebiliriz.

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H}(\mathrm{T_m} - \mathrm{T_e} - \mathrm{K_D}\Delta\omega_r) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_0\Delta\omega_r \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\rightarrow \begin{cases} \frac{\mathrm{d}\Delta\omega_\mathrm{r}}{\mathrm{dt}} = \frac{1}{2\mathrm{H}}(\mathrm{T_m} - \mathrm{K_s}\Delta\delta - \mathrm{K_D}\Delta\omega_\mathrm{r}) \\ \frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{dt}} = \omega_0\Delta\omega_\mathrm{r} \end{cases} \quad (4.16)$$

$\mathrm{T_m}$: Mekanik momentumdur; bu sebeple lineer hale getirilmesine gerek bulunmamaktadır.
$\mathrm{K_s}$: Senkron edici momentum kat sayısıdır ve açılımı Denklem 4.17'de gösterilmiştir.

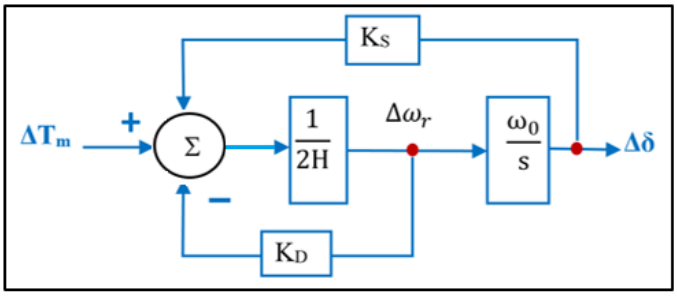
$$K_s = \left[\frac{E' E_B}{X_T}\right] Cos\delta_0 \qquad (4.17)$$

Son olarak, Küçük Sinyal Kararlılığı denklemi, Denklem 4.16'daki gibi olacaktır. Bu denklem dikkate alınarak, ana verileri elde etmek suretiyle Küçük Sinyal Kararlılığı analiz edilebilir.

Denklem 4.16'daki lineer edilmiş denklemin uzay matrisinde gösterimi Denklem 4.18'de yer aldığı gibidir.

$$\dot{X} = AX + BU$$
$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}r \\ \Delta\dot{\delta} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{KD}{2H} & -\frac{Ks}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix}}_{A} \begin{bmatrix} \Delta\omega r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix}}_{B} \Delta Tm \qquad (4.18)$$

Denklem 4.18'deki uzay matrisine istinaden sistemin blok diyagramı (SMIB), Küçük Sinyal Kararlılığı için Şekil 4.10'daki gibi gösterilebilir.



Şekil 4.10. SMIB sisteminin klasik model bloğu

K_s = Senkron edici momentum katsayısı
K_D = Kararlaştırıcı momentum katsayısı (kararlaştırıcı)
H = Eylemsizlik katsayısı

Şekil 4.10'daki diyagram üzerinden sistemin girdi ve çıktısı hesaplanabilir. Sistemin girdi ve çıktısı dikkate alınarak sisteme ait olan denklemler belirlenir; sonrasında ise bu denklemler kullanılarak sistemin ana verileri bulunur ve sistemin Küçük Sinyal Kararlılığı incelenebilir.

$$\Delta\delta = \frac{\omega_0}{S}\left[\frac{1}{2HS}(-K_s\Delta\delta - K_D\Delta\omega_r + \Delta T_m)\right] \quad (4.19)$$

$$\Delta\delta = \frac{\omega_0}{S}\left[\frac{1}{2HS}\left(-K_s\Delta\delta - K_D S\frac{\Delta\delta}{\omega_0} + \Delta T_m\right)\right] \quad (4.20)$$

Yukarıdaki denklemler düzenlendiğinde, Denklem 4.21 ve 4.22'deki gibi olur.

$$S^2(\Delta\delta) + \frac{kD}{2H}S(\Delta\delta) + \frac{ks}{2H}\omega_0(\Delta\delta) = \frac{\omega_0}{2H}\Delta T_m \quad (4.21)$$

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta T_m} = \frac{\frac{w_0}{2H}}{S^2+\frac{kD}{2H}S+\frac{ks.\omega_0}{2H}} \quad (4.22)$$

Bu aşamada, ana verilerin bulunabilmesi için Denklem 4.23'teki denklemin sıfıra eşitlenmesi gerekmektedir:

$$S^2 + \frac{kD}{2H}S + \frac{ks.\omega_0}{2H} = 0 \quad (4.23)$$

İkinci dereceden olan denklemlerin genel gösterimi ise Denklem 4.24'teki gibi olacaktır:

ζ = Kararlılık oranı

$$S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2 = 0 \quad (4.24)$$

Denklem 4.23 ve 4.24'teki denklemler kullanılarak ω_n ve ζ'e ait denklemler de bulunabilir:

$$\omega_n = \sqrt{k_s\frac{\omega_0}{2H}}\left(\frac{rad}{s}\right) \quad (4.25)$$

$$\xi = \frac{1}{2}\frac{kD}{2H\omega_n} = \frac{1}{2}\frac{kD}{\sqrt{k_s 2H\omega_0}} \quad (4.26)$$

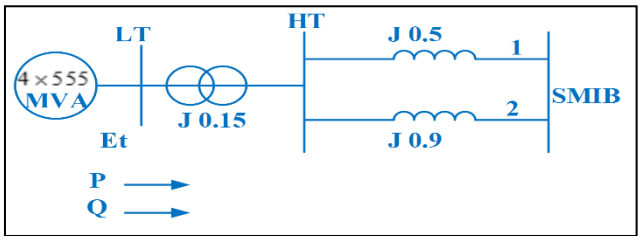
Yukarıdaki denklemlerden aşağıdaki sonuçlar elde edilecektir:

a. Ks'nin artmasıyla; doğal frekans artar, kararlılık oranı azalır.
b. kD'nin artmasıyla kararlılık oranı artar.

c. H'nin artmasıyla, hem ω_n oranı hem de kararlılık oranı ζ azalır.

Küçük Sinyal Kararlılığı ve ana verilerin bulunması konusunun daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıdaki örnek verilebilir.

Örneğin bir jeotermal santraline bağlı, aşağıdaki özelliklere sahip bir SMIB sisteminin olduğunu varsayalım. Bu santralde 4 adet enerji üretim ünitesi vardır ve her biri 555 MVA kapasiteli jeneratörlerle santral içerisindeki baralara bağlanır. Bu baralar LT (düşük basınç) ve HT (yüksek basınç) ile gösterilir ve jeneratörden üretilen gerilim transformatör kullanılmak suretiyle yükseltilerek iki hat ile sonsuz baraya bağlanır.



Şekil 4.11. SMIB sistem ve ona bağlı paralel hat devresi

Bu örnekte, ideal direnç varsayımı yapılmıştır.
Sistemin reaktans değerleri 24kV ve 2220 MVA'dır.

Güç sisteminin kararlı durumda olduğunu varsayalım. Sistemdeki ikinci hattın devre dışı kalması durumunda, Küçük Sinyal Kararlılığının incelenebilmesi için öncelikli olarak sistemin, hatadan önceki durumunun bilinmesi gerekmektedir. Böylelikle çalışma noktasının veya denge noktasının koordinatı, hatadan önceki durum için elde edilebilir. Bu örnekteki hata öncesi durum, matematiksel değerlerle birlikte aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

Hatadan önceki gerçek güç: P = 0.9 pu
Reaktif güç: Q: 0.3 pu
Generatörün terminal gerilimi: $E_t = 36^o$
Sonsuz bara gerilimi (SMIB): $E_B = 0.995$

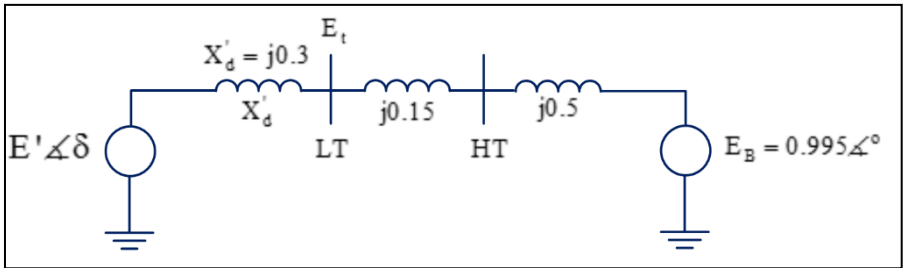
Santralin tümü tek bir jeneratör olarak düşünülür. Verilen bilgiler dikkate alınarak senkron jeneratörün geçici reaktansı (X'd) ve eylemsizlik katsayısı (H) aşağıdaki gibi belirtilebilir.

$X'_d = 0.3Pu$ $H = 3,5$

Öncelikle sistemin lineer denklemleri çalışma noktası etrafında elde edilir. Sistemin lineere dönüştürülmesinin ardından lineer denklemlere ait olan farklı indekslerin miktarı aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Küçük Sinyal Kararlılığı, verilen bu KD değerlerine göre incelenecektir.

$KD = 0$ $KD = -10$ $KD = 10$

Ayrıca, sistemin hangi koşullarda kararlı ve hangi koşullarda kararsız olduğu belirlenerek sistem içinde oluşması muhtemel diğer koşullar da analiz edilecektir. İkinci hat devreden çıktığı zaman, sistem de dengeden çıkacak ve sonra tekrar normale dönecektir. Bu denge devresi, çalışma noktası etrafında Şekil 4.12'deki gibi çizilebilir.



Şekil 4.12. Örnek SMIB sistem tek hat diyagramı

E_t referans fazör kabul edilerek, akım hesaplanır ve dalgalanma denklemleri elde edilir. $(E_t = 1\angle^o)$

$$\tilde{I}_t = \frac{(P + jQ)^*}{E_t^*} = \frac{0.9 - j0.3}{1} = 0.9 - j0.3$$

$$S = E_t I_t^* \Rightarrow I_t = \frac{S^*}{E_t^*} \Rightarrow I_t = \frac{(P + jQ)^*}{E_t^*}$$

$\delta_\circ$, esasen bulunmak istenen denge noktasıdır. Bu nokta kullanılarak ks (senkron edici momentum katsayısı) hesaplanabilir. Son aşamada ise Küçük Sinyal Kararlılığının analiz edilmesi için sistemin karakteristik denklemi yazılabilir:

$$\tilde{E}' = \tilde{E}_t + jX'd\tilde{I}_t$$
$$\tilde{E}' = 1 + j0.3 \times (0.9 - j0.3) = 1.09 + j0.27$$
$$\tilde{E}' = 1.123\angle 13.92^o pu$$

δ_o açısı, E''nin E_B'ye göre geri olduğu faz açısıdır.

$$\delta_o = 13.92^o + 36^o(Et) = 49.92^o$$

İkinci hattın çıkışıyla, sistemin genel reaktansı için şöyle yazılabilir:

Sistemin genel reaktansı $X_T = 0.3 + 0.15 + 0.5 = 0.95pu$

K_s (senkron edici momentumun katsayısı) ise şöyle hesaplanır:

$$K_s = \frac{E'E_B}{X_T}\cos\delta_o \Rightarrow Ks = \frac{1.123 \times 0.993}{0.95}\cos 49.92^o \Rightarrow 0.777pu$$

Şimdi sistemin lineer edilmesi için gerekli tüm veriler mevcuttur.

Lineer edilmiş denklemlerde katsayıları $-\frac{kD}{2H}$ olan $\Delta\overset{o}{\omega}_r$ ve $\Delta\delta$ mevcuttur. Sorunun anlatımında K_D Küçük Sinyal Kararlılığı için üç farklı değer de verilmiştir. İkinci katsayı ise$-\frac{ks}{2H}$. olarak belirtilmiştir.

Lineer denklemler: $\begin{bmatrix}\dot{\Delta\omega r}\\ \dot{\Delta\delta}\end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix}-\frac{KD}{2H} & -\frac{Ks}{2H}\\ \omega_0 & 0\end{bmatrix}}_{A}\begin{bmatrix}\Delta\omega r\\ \Delta\delta\end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix}\frac{1}{2H}\\ 0\end{bmatrix}}_{B}\Delta T_m$

$$\begin{bmatrix}\dot{\Delta\omega r}\\ \dot{\Delta\delta}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-0.143kD & -0.108\\ 377 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\omega r\\ \Delta\delta\end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix}0.143\\ 0\end{bmatrix}}_{B}\Delta T_m$$
$$\omega_o = 2\pi f \Rightarrow 2\pi \times 60^o \Rightarrow 377$$

Mod matrisinin ana verileri yukarıdaki matrise göre şöyle yazılabilir:

$$\det(A - \lambda I) = 0$$
$$\begin{vmatrix}-0.143KD - \lambda & 0.108\\ 377 & -\lambda\end{vmatrix} = 0$$

Determinant sıfıra eşitlenirse sistemin karakteristik denklemi elde edilebilir:

$$\begin{cases}\lambda^2 + 0.143KD\lambda + 40.79 = 0 \\ \lambda^2 + 2\xi w_n\lambda + \omega_n^2 = 0\end{cases}$$

$$\omega_n = \sqrt{40.79} = 6.387\frac{rad}{s} = 1.0165Hz$$

$$\xi = \frac{0.143KD}{(2 \times 6.387)} = 0.0112KD$$

Kararlık oranı, K_D cinsinden bir değer olup, doğal frekans Hz cinsinden bir miktara eşit olacaktır. Sonuç olarak, K_D'nin sadece kararlılık oranı üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

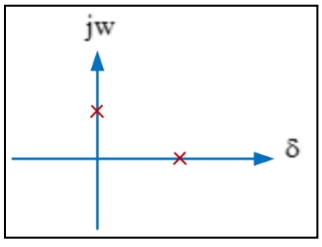
Denklemlerin kökleri alınarak, değeri λ_1, λ_2'e göre şöyle hesaplanabilir:

$$\lambda_1, \lambda_2 = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$$
$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$$

K_D'yi belirten her üç değer için de elde edilebilir:

$$K_D = 0 \begin{cases}\lambda_1, \lambda_2 = 0, j6.39 \\ \omega_d = 1.0165Hz \\ \xi = 0 \\ \omega_n = 1.0165Hz\end{cases}$$

$K_D = 0$ olduğunda kutup denklemlerinde gerçek kısmın sıfır olduğu ve geriye yalnızca sanal kısmın kaldığı görülmektedir. Bu durumda, sistemin çizilecek diyagramına göre, sistemin bir sınır kararlılığına sahip olduğu belirtilebilir. K_D sıfır olduğu zaman, küçük bir arıza meyadana gelmesi durumunda sistem kararlılığını kaybedebilir. Şekil 4.13'te Kompleks sayfa sınırında kararlılık sınırını gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 4.13. Kompleks sayfa sınırında kararlılık grafiği

Kd = -10 olduğunda;

$$K_D = -10 \begin{cases} \lambda_1, \lambda_2 = 0.714 \pm j6.36 \\ \omega_d = 1.0101Hz \\ \xi = -0.112 \\ \omega_n = 1.0165Hz \end{cases}$$

Koşulları göz önünde bulundurulduğunda; bir sistemin λ_1, λ_2 pozitif gerçek kısmı varsa sistem kararsızdır ve bu güç sisteminde $K_D = 10$ olduğu takdirde sistem kararlı olacaktır.

$$K_D = 10 \begin{cases} \lambda_1, \lambda_2 = -0.714 \pm j6.36 \\ \omega_d = 1.0101Hz \\ \xi = 0.112 \\ \omega_n = 1.0165Hz \end{cases}$$

K = 10 durumunda gerçek kısmın miktarı negatiftir ve kutuplar çift katlıdır. Sistem bu durumda kararlıdır.

Görüldüğü gibi K_D katsayıları bir güç sistemi üzerinde etkilidir. Bu noktayakadar sistem ikinci derece türünden modellenmiş ve bu model lineer hale getirilmiştir.

4.7. Senkron Jeneratörlerde Uyartım Sistemi ve 4. Dereceden AVR Modellenmesi

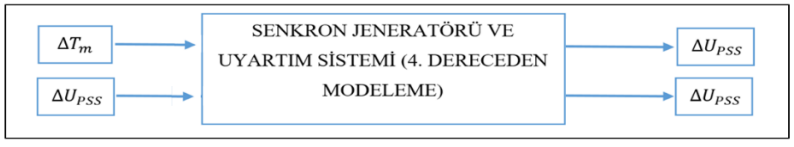
Bu modeli geliştirmek üzere yeni bir dört modlu sistem önerilmiştir. Bu modelde jeneratör için ζ mod (üç denklem diferansiyeli) ve AVR için bir mod vardır. Bu koşullara bağlı olarak sistemin girdi ve çıktıları Şekil 4.14'teki gibi gösterilebilir:

ΔTm: Giriş mekanik momentumu

ΔU_{PSS}: PSS'den uyarma sistemine giren sinyaller

$\Delta\delta$: Rotor açısının değişimleri

ΔV: Uyarma alanı



Şekil 4.14. Senkron jeneratörlerde uyartım sistemi 4.dereceden blok şeması

Dalgalanma denklemi = $\Delta\dot{\omega} = \frac{w_o}{2H}(\Delta T_m - \Delta T_e)$ (4.27)

Rotor açısı = $\Delta\dot{\delta} = \Delta\omega$ (4.28)

Uyarma alanı denklemi = $\Delta E'_q = \dot{\omega} = \frac{w_o}{2H}(\Delta T_m - \Delta T_e)$ (4.29)

Hava mesafesi momentumu = $\Delta T_e = k_1\Delta\delta + k_2\Delta E'_q$ (4.30)

Terminal gerilimi değişimleri = $\Delta V_t = k_5\Delta\delta + k_6\Delta E'_q$ (4.31)

Uyarma sistemi: $\Delta E_{fd} = \frac{k_A}{1+ST_A}\Delta U_E$ (4.32)

Heffron-Phillips modeli farklı kitaplarda değişik şekillerde açıklanmıştır. Örneğin Prabha Kundur'un *Power System Stability and Control* adlı kitabında dirençler de hesaba katıldığından denklemler karmaşık bir hal almıştır. Bu sebeple tez çalışmasında Heffron-Phillips modelini göstermek üzere en basit model ve denklemler seçilmiştir.

K1 için:

$$k_1 = \frac{X_q - X'_q}{X_e + X'_d} I_{q_0} \sin\delta_0 + \frac{E_{q_0} V_0}{X_e + X_q} \cos\delta_0 \quad (4.33)$$

K2 için:

$$k_2 = \frac{V_0 \sin\delta_0}{X_e + X'_d} \quad (4.34)$$

K3 için:

$$k_3 = \frac{X'_d + X_e}{X_e + X'_d} \quad (4.35)$$

K4 için:

$$k_4 = \frac{X_d - X'_d}{X_e + X'_d} V_0 \sin\delta_0 \quad (4.36)$$

K5 için:

$$k_5 = \frac{X_q}{X_e+X_q}.\frac{V_{d_0}}{V_{t_0}}V_0\cos\delta_0 - \frac{X'_d}{X_e+X'_d}.\frac{V_{q_0}}{V_{t_0}}V_0\sin\delta_0 \quad (4.37)$$

K6 için:

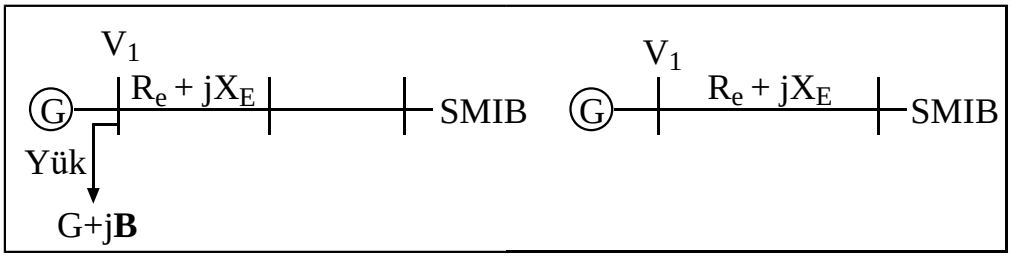
$$k_6 = \frac{X_e}{X_e+X'_d}\frac{V_{q_0}}{V_0} \quad (4.38)$$

K parametreleri, sistemin lineer edilmesi için yukarıdaki denklemlerce elde edilmiştir. Bu denklemlerde Vq0 ve Vd0, denge noktasında olan d ve q eksenlerinin gerilimini ifade etmektedir.

V_{t_0}: Jeneratörün terminal gerilimi

I_{q_o}, I_{d_o}: Denge noktasında olan d ve q eksenlerinin akımı

Not: $I_{d_o}, I_{q_o}, V_{t_o}, V_{d_o}, V_{q_o}$ parametreler güç akış analizi ile elde edilebilir.



Şekil 4.15. SMIB sistemine yüklü ve yüksüz tek hat diyagramı

Xe: Sistemin reaktansı

Şekil 4.15 için aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$R_e + jX_e = \frac{R_e+jX_e}{1+(R_E+jX_e)(G+j_B)} \quad (4.39)$$

Akımlar ve gerilimleri hesaplamak için Denklem 4.40 yazılabilir.

$$
\begin{aligned}
V_{do} &= \frac{P_o V_{t_o}}{\sqrt{P_o^2 + (Q + \frac{V_{t_o}}{X_q})^2}} \\
V_{qo} &= \sqrt{V_{to}^2 + V_{do}^2} \\
I_{do} &= \frac{P_o - I_{q_o} V_{t_o}}{V_{do}} \Rightarrow \frac{Q_o + I_{d_o} V_{d_o}}{V_{qo}} \\
I_{q_o} &= \frac{V_{do}}{X_d} = \frac{E'_q - X'_d I_{d_o}}{X_q} \\
\delta o &= \text{tag}^{-1} \frac{V_{do}}{V_{qo}}
\end{aligned}
\tag{4.40}
$$

Yukarıdaki denklemler dikkate alınarak, sonsuz baraya bağlı olan her bir jeneratör için lineer edilmiş parametrelerin denklemi elde edilebilir:

Önemli noktalar:

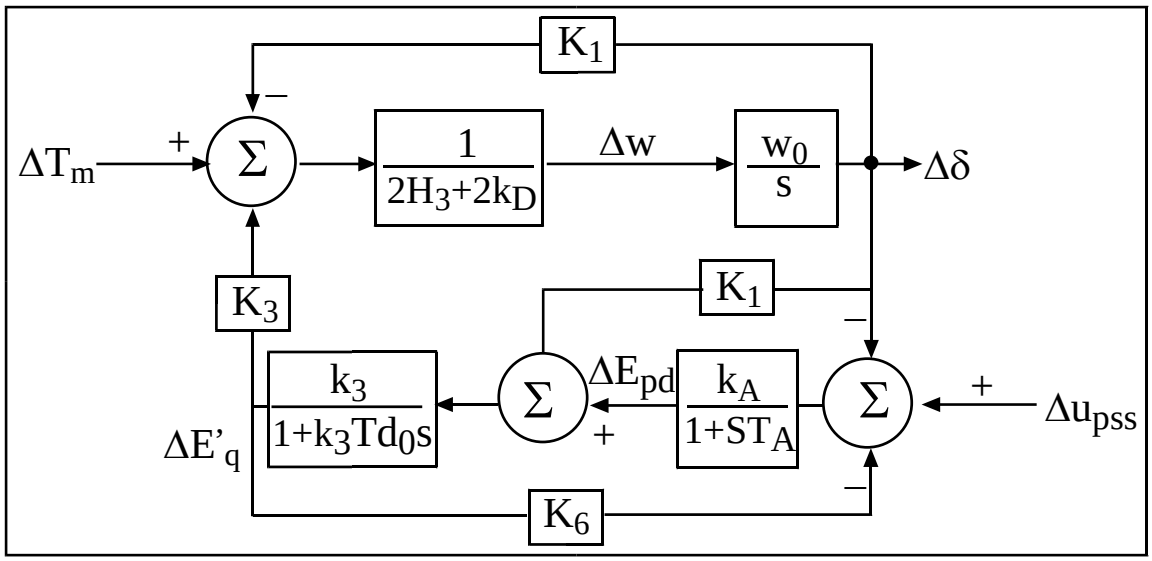
a. k3 hariç, tüm k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6 parametreleri makinenin çalışma noktasına bağlıdır.
b. k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6 parametrelerinin hepsi pozitif katsayılara sahiptirler. Sadece k5 bazen negatif ve bazen pozitif olabilir.

4.8. SMIB Sistemi için Heffron-Phillips'in Eksiksiz Modeli

Lineer edilmiş sistemin tüm denklemleri bulunduğundan Heffron-Phillips'in eksiksiz modeli ile denklemlerin sadece blok diyagramı elde edilir. Dolayısıyla, Heffron-Phillips modeli k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6 parametrelerine sahip olup ilk olarak 1952 yılında Heffron-Phillips tarafından önerilmiştir.

Bir SMIB sisteminde Küçük Sinyal Kararlılığını incelemek üzere genelde Heffron-Phillips modeli kullanılır. Çünkü bu model küçük sinyal araştırmalarında daha güvenilir bilgi sağlar.

Aynı zamanda, Küçük Sinyal Kararlılığı çalışmalarında, Heffron-Phillips modeli kullanılırken PSS etkisi de dikkate alınır. Heffron-Phillips modelinde esasen ΔT_m ve ΔUPSS olarak iki giriş mevcuttur.



Şekil 4.16. Heffron-Phillips'in genel modeli

4.8.1. Heffron-phillips modelinin uzay düzlemindeki diyagramı

Lineer sistemde kararlılık analizleri için yüksek önem taşıyan A matrisi kullanılır. Diğer modları elde etmek için ise B matrisi kullanılır. Ama burada hedef, küçük sinyalin analizi olduğu için A matrisi daha detaylı analiz edilecektir.

$$\dot{X} = AX + BU$$

Heffron-Phillips modelinin blok diyagramında dört farklı durumun olduğu görülmüştür:

$\Delta\delta, \Delta\omega$: Dalgalanma denklemiyle ilişkilidirler.
$\Delta E'_q$: Uyarma alanı
ΔE_{fd}: Jeneratörün uyarma sistemi

$$X = \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta E_{q'} \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix}$$

Giriş sinyalleri ΔT_m ve ΔUPSS'dir. ΔT_m için, Küçük Sinyal Kararlılığı açısından governor türbininin etkisi göz önünde bulundurulmaz ve sıfır olarak varsayılır. Dolayısıyla, Küçük Sinyal Kararlılığında bulunan en önemli faktör ΔUPSS olacaktır.

4×4 olan A matrisi elde etmek için:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_1}{2H} & -\frac{k_2}{2H} & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_4}{T'_{d_0}} & -\frac{1}{T'_{d_0}k_3} & -\frac{1}{T'_{d_0}} \\ 0 & -\frac{k_A k_5}{T_A} & -\frac{k_A k_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Bu matris kullanılarak Heffron-Phillips modeli elde edilir ve denklemlerin ana verileri bulunur. Bu matris, farklı problemlerin çözümü ve analizi için de kullanılabilir ki bunlardan biri Heffron-Phillips modeli yoluyla küçük sinyal analizidir. Ana veriler tek tek bulunduğundan sistemin kararlı ya da kararsız olduğu veya sınırlı kararlılığa sahip olduğu anlaşılabilecektir.

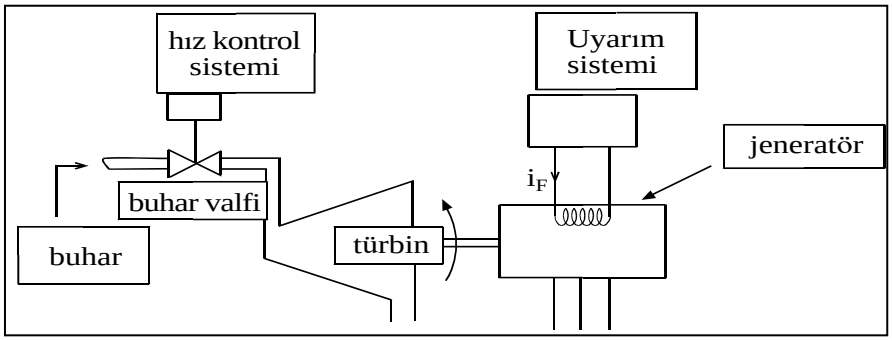
Bu modeli elde etmek amacıyla matris dönüşümü yönteminden farklı olarak dönüşüm fonksiyonu yöntemi de kullanılabilir. Küçük Sinyal Kararlılığı çalışmalarında sistem, klasik modelde gösterildiğinden ΔT_m değişmeyip sıfıra eşit olacaktır.

$\Delta\omega$, ΔUPSS çıkışları arasındaki dönüşüm fonksiyonu için $\Delta T_m = 0$ olarak baz alındığında dönüşüm fonksiyonu Denklem 5.42'deki gibi olacaktır.

$$G(s) = \frac{\Delta\omega}{\Delta u_{Pss}} = S^4 + \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T'_{d0}k_3}\right)S^3 + \left(\frac{1}{T'_{d0}T_A k_3} + \frac{k_A k_6}{T'_{d0}T_A} + \frac{k_1 w_o}{2H}\right)S^2 + \dots$$
$$\dots\left(\frac{k_1\omega_o}{2HT'_{d0}k_3} + \frac{k_1\omega_o}{2HT_A} + \frac{k_4 k_2\omega_o}{2HT'_{d0}}\right)S + \left(\frac{k_A k_6 k_1\omega_o}{2HT'_{d0}T_A} + \frac{k_1\omega_o}{2HT'_{d0}T_A} - \frac{k_2 k_4\omega_o}{2HT'_{d0}T_A} - \frac{k_4 k_5 k_2\omega_o}{2HT'_{d0}T_A}\right) \quad (4.42)$$

Genelde Denklem 4.42'deki dönüşüm fonksiyonu, hem PSS tasarımında hem de güç sistemlerindeki Küçük Sinyal Kararlılığı analizinde kullanılır.

4.9. Rotor Açısı Küçük Sinyal Kararlılığında Uyarma Sisteminin Rolü



Şekil 4.17. Newton'un ikinci yasasına göre senkron jeneratörün rotor hareket şeması (Kundur, 1994)

$\Delta\delta$ ve uyarma sisteminin ilişkisini sağladığından, ilk önce $\Delta E'_q$ hesaplanmalıdır.

$$\Delta E'_q = \frac{k_3}{1+T'_{d0}k_3 s}(-k_4\Delta\delta - (\frac{k_A}{1+sT_A})(k_5\Delta\delta + k_6\Delta E'_q)) \quad (4.43)$$

Yukarıdaki denklem $\Delta\delta$ ve $\Delta E'_q$'ya göre düzenlendiğinde:

$$\Delta E'_q = \frac{-k_3[k_4(1+sT_A)+k_5k_A]\Delta\delta}{s^2(k_3T'_{d0}T_A)+s(T'_{d0}k_3+T_A)+1+k_3k_6k_A} \quad (4.44)$$

$\Delta E'_q$, uyarma sisteminden kaynaklı alan geriliminin değişimini gösterir.

$$\Delta T_e \Big|_{\Delta E'_q} = k_2\Delta E'_q \quad (4.45)$$

$\Delta E'_q$, S'ye göre kategorize edildiğinde Denklem 4.46'daki gibi olacaktır.

$$\Delta E'_q = \frac{-k_3k_4T_A}{T(s)}s\Delta\delta - \frac{k_3k_4+k_3k_5k_A}{T(s)}\Delta\delta \quad (4.46)$$

'S' değeri, i jω değerine Denklem 4.47'deki gibi dönüştürülür.

$k_S(\Delta E'_q)\Delta\delta$: Senkron edici momentum

$k_D(\Delta E'_q)$: Kararlaştırıcı momentum

$$\Delta T_e \Big|_{\Delta E'_q} = k_S(\Delta E'_q)\Delta\delta + k_D(\Delta E'_q)j\Delta\delta \quad (4.47)$$

4.10. AVR'nin Küçük Sinyal Kararlılığı Üzerindeki Etkisi

Bu etkiyi incelemek için birkaç önemli noktaya ihtiyaç vardır.

$\frac{k_A}{1+sT_A}$: Kararlaştırıcı momentum katsayısı = AVR Katsayısı

AVR'nin momentum edici katsayısı ne kadar artarsa, senkron edici momentumun katsayısı da bir o kadar artacaktır. Bu bilgiler baz alınarak şöyle yazılabilir:

1) k_A verimi yüksek olursa, sistemin senkron edici momentumu artar ve bu da sistemin geçici kararlılığını iyileştirir.
2) K_A katsayısının yüksek olması, kararlaştırıcı momentumların negatif olmasına yol açar.
3) Negatif kararlaştırıcı momentumlar, güç sisteminde yoğun dalgalanmalara sebep olur.
4) AVR verimi ne kadar yüksek seçilirse, sistemin Küçük Sinyal Kararlılığı da bir o kadar zayıflayacaktır. Bu nedendenle, negatif kararlaştırıcı momentumları ortadan kaldırmak için PSS (Power System Stabilizer) adında yeni bir kontrol edici bölüm kullanılır.

4.11. Gücün Stabilizasyonu (PSS)

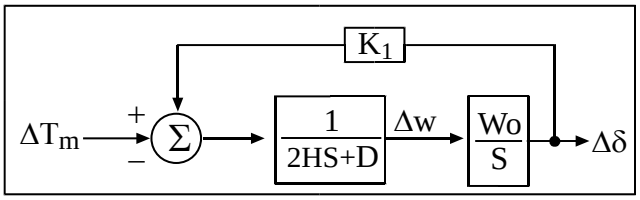
PSS'nin en önemli rolü, senkron makinenin rotorundaki elektromanyetik dalgalanmaların kararlılığını arttırmaktır. Aslında PSS, hızla orantılı olarak değişen bir elektrik momentum bileşeni üretir. Bu da kararlaştırıcı momentumların artmasına yol açar.

4.12. SMIB Sistemi İçin PSS'nin Tasarlanması

Bu işlem beş farklı durumda gerçekleştirilmektedir:

1) Güç sistemlerinde jeneratöre ait dalgalanma denklemlerinin zaman katsayısı, senkron makinenin elektrik bölümlerine ait zaman katsayısından daha büyüktür. Dolayısıyla, mekanik modlar, elektrik modlardan ayrıştırılabilir. Heffron-Phillips modelinde PSS

tasarlandığında, elektrik bölümü göz ardı edilerek ve mekanik halka baz alınarak PSS tasarlanır. Mekanik halka ise Şekil 4.18'deki gibi çizilir.



Şekil 4.18. Heffron-Phillips modelinin PSS blok diyagramı

Şekil 4.18'den yola çıkılarak Denklem 4.48'deki dönüşüm foksiyonu elde edilebilir:

$$G(s) = \frac{\Delta\delta(s)}{\Delta T_m(s)} = \frac{2H}{w_0}s^2 + \frac{D}{w_0}s + k_1 \qquad (4.48)$$

Denklem 4.48'deki lineer denklem dikkate alınarak Küçük Sinyal Kararlılığına ait denklemler analiz edilebilir:

$\omega_d = \sqrt{\frac{k_1\omega_0}{2H} - (\frac{D}{2H})^2}$: Sistem dalgalanmarına ait frekans

$\xi = \frac{D}{\sqrt{8Hk_1\omega_0}}$: Kararlılık oranı

Mekanik halkayla ilişkili dalgalanma frekansı (fn) genelde 1 Hz'e eşittir. Bu nedenle söz konusu frekanslar, düşük dalgalanma frekansları olarak adlandırılır.

2) PSS tasarımının ikinci aşamasında, uyartım sisteminden kaynaklı gecikme hesaplanır.

Uyartım sisteminin kararlılık momentumunun üzerinde etkili olabilmesi için bu gecikmenin yok edilmesi gereklidir. Bu hedefe Denklem 4.49'daki gibi Δ ve Δu_{pss} arasındaki faz dönüşüm foksiyonu hesplanarak ulaşılır.

$$T(s) = \frac{k_A k_3}{(1+sT_A)(1+sT'_{d0}k_3)+k_4k_2k_6}$$
$$T(s)\big|_{s=j\omega_n} = |T(j\omega_n)|\angle^{T(j\omega_n)} \qquad (4.49)$$

3) Üçüncü aşamada Te (S) adı verilen ileri faz ayarı yapan bir kompansatör, bahse konu gecikmeyi telafi etmek için tasarlanır. Bu tasarım, Denklem 4.51'deki gibi her $s = j\omega_n$ için sistem fazını telafi etmelidir ki gecikme ortadan kaldırılabilsin.

$$\angle^{\mathrm{Tc(s)}} + \angle^{\mathrm{T(s)}} = 0 \tag{4.50}$$

PSS'ye ait olan gecikmeyi geri kazandırıcı bölüm:

$$\mathrm{G(s)} = (\frac{1+\mathrm{sT_1}}{1+\mathrm{sT_2}})^{\mathrm{n}} \tag{4.51}$$

Kompansatör ileri faz cinsinden olduğu için: $\begin{matrix}\mathrm{n} = 1{,}2 \\ \mathrm{T_1} \succ \mathrm{T_2}\end{matrix}$ olur.

4) PSS veriminin hesaplanması: Bu verimin hesaplanması için 0.1 ve 0.3 aralığında bir ξ_n kararlılık katsayısı seçilerek $\mathrm{K_{pss}}$ hesaplanır:

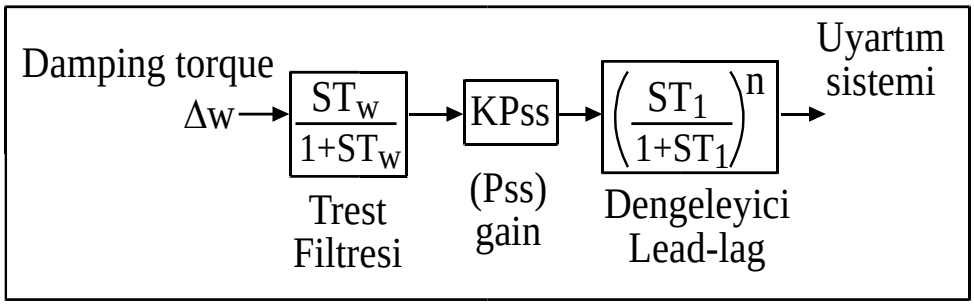
$$\mathrm{K_{pss}} = \frac{2\mathrm{H}\omega_\mathrm{n}\xi_\mathrm{n}}{\mathrm{k_2}|\mathrm{Tc(j\omega)}||\mathrm{T(j\omega_n)}|} \tag{4.52}$$

5) Blok Eklenmesi: Sadece düşük frekans dalgalanmalarını yok etmek için PSS rotasına bir blok konulur. Bu blok aslında bir filtre görevi yapar. $\mathrm{T_{rest}}$ ile gösterilir:

$$\mathrm{T_{rest}} = \frac{\rho\mathrm{T_\omega}}{1+\mathrm{sT_\omega}} \tag{4.53}$$

$$|\mathrm{T_{rest}(j\omega_n)}|\angle\mathrm{T_{reast}(j\omega_n)} \cong 1\angle^{\mathrm{o}} \tag{4.54}$$

$\mathrm{T_{rest}}$'in ω_n için frekansı 1Hz'e, açısı ise sıfır dereceye eşittir. Dolayısıyla PSS, ω_n frenkansında devreye girer. Diğer frekanslarda ise devre dışı kalır.
Güç sistemlerinde PSS'nin genel yapısı:

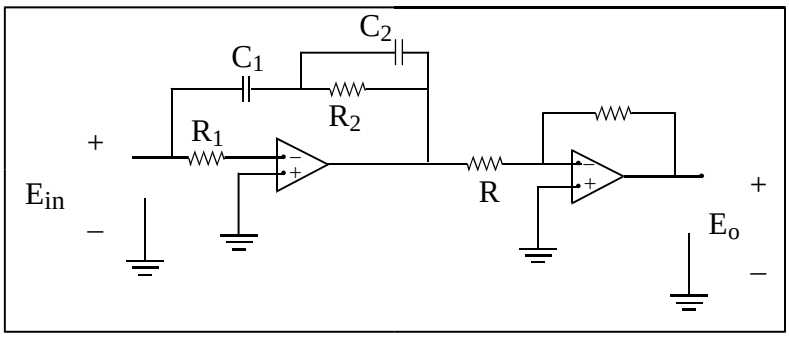


Şekil 4.19. Güç sistemlerinde genel PSS blok diyagramı

4.13. PSS'nin Uygulama Şeması

PSS genellikle uyartım sistemiyle birlikte santrale yerleştirilir. Günümüzdeki sistemlerin bölgesel dalganlanmaları, güç sistemlerinin çok büyük olmasından dolayı geniş çeşitliliktedirler. Santraldeki bir PSS ile uzak noktalardaki dalgalanmaların bile bertaraf edilebilmesi imkanı bulunmaktadır. Bunu yapmak için Δω ile ilişkili sinyaller farklı noktalardan toplanır ve bu sinyallerin çıkışı santralde bulunan PSS'ye iletilir. PSS'ye giren sinyaller sadece bir santral ile sınırlı değildir. PSS'nin pratik tasarlanması için Denklem 4.55'teki dönüşüm fonksiyonu yazılabilir.

$$G_{PSS}(s) = K_{pss}\left(\frac{s+z_1}{s+z_2}\right) \tag{4.55}$$



Şekil 4.20. İşlemsel kuvvetlendiriciler ile PSS tasarımı

$$\frac{E_o(s)}{E_{in}(s)} = \left(\frac{C_1}{C_2}\right)\left(\frac{s+\frac{1}{R_1C_1}}{C+\frac{1}{R_2C_2}}\right) \tag{4.56}$$

5. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ UYGULANMASI

Tezin bu bölümünde Modern kontrol tekniklerini kullanarak lineer olmayan sistemlerin lineer yapılma modelleri gösterilmektedir sistem analizi ve tasarımına ilişkin temel bilgileri içeren Güç sistemlerinde Küçük Sinyal Kararlılığının yapılmasında dıkkat edilmesi gereken konulardan birincisi hava mesafesi momentumunun çalışma noktası etrafında lineer bir denkleme dönüştürülmesidir. Bu hedefe ulaşmak amacıyla ilk olarak hava mesafesi denklemindeki sinüs lineer edilir; böylece daha sonra hava mesafesi denkleminin tümü lineer hale getirilebilir lineer olmayan sistemin lineer hale dönüştürülmesi ile sistemin matematiksel çözümü daha kolay olacaktır ve sistemin değişkenlerinden dolayı üretilen büyük ve çözülmesi zor olan matrislerin çözümü ise daha kolaylaştırılacaktır ve böylelikle elde edilen tahmini sonuçlar ise daha gerçek bir kompleks alanda gösterilecektir (Kundur, 1994).

5.1. Dinamik Sistemlerin Kontrolü

Bir dinamik sistemde, sistemin x_i değişkenleri birbirini etkiler. Sistemin her bir değişkeni, zaman cinsinden bir fonksiyondur. Dinamik sistemlerin analizindeki amaç, sistemin gelecekteki davranışlarının incelenmesidir. Bu davranışlar, denge noktalarının (*critical point*) ve limit çemberlerin bulunmasını (*limit cicle*), sistem kararlılığının incelenmesini (*stabilitiy*), çatallamaların incelenmesini (*biforcation*) ve kaos kontrolünü içermektedir (*chaos control*).

n değişkenli lineer olmayan bir sistem için Denklem 5.1'deki denklemler yazılabilir.

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t)=f_1\left(t;x_1(t),x_2(t),...,x_n(t)\right) \\ \dot{x}_2(t)=f_2\left(t;x_1(t),x_2(t),...,x_n(t)\right) \\ \qquad\qquad M \\ \dot{x}_n(t)=f_n\left(t;x_1(t),x_2(t),...,x_n(t)\right) \end{cases} \tag{5.1}$$

Bunun basitleşmiş hali Denklem 5.2'deki gibidir.

$$x_i=x_i(t), x=\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & L & x_n \end{bmatrix}^T, f=\begin{bmatrix} f_1 & f_2 & L & f_n \end{bmatrix}^T \tag{5.2}$$

Dolayısıyla, n değişkenli lineer olmayan bir sistem Denklem 5.3'teki gibi gösterilebilir.

$$\dot{x}=f\left(t;x\right) \tag{5.3}$$

Sistem denklemlerinde zaman gözardı edildiğinde, o sisteme özerk (*autonomus*) sistem denilmektedir. n değişkenli lineer olmayan özerk bir sistem, Denklem 5.4'teki gibi gösterilebilir.

$$\dot{x}=f\left(x\right) \tag{5.4}$$

$x=x^{*}$ noktası, eğer Denklem 5.5'teki gibi olursa; 'sabit', 'denge' veya 'kritik bir nokta (critical point)' şeklinde adlandırılır:

$$f\left(x^{*}\right)=0 \tag{5.5}$$

Başka bir deyişle, kritik bir noktada hiçbir türlü hareket yoktur ve hız sıfıra eşittir $\dot{x}=0$. Ayrıca fonksiyondaki (5.5) sabit noktalarının bulunması için n denklemli ve n lineer olmayan değişkeni içeren $f\left(x\right)=0$ eşitliği çözülmelidir. Bu denklem eşitliği, diferansiyel türünden olmamasına rağmen analiz şeklinde çözülemez; çünkü lineer değildir. Dolayısıyla, Newton yöntemi gibi rakamsal yöntemlerle sonuç yaklaşık olarak elde edilebilir.

Örnek 1: Denklem 5.6'daki lineer olmayan dinamik sistem dikkate alındığında;

$$\begin{cases} \dot{x}_1=x_1\left(1-\dfrac{x_1}{2}-x_2\right) \\ \dot{x}_2=x_2\left(x_1-1-\dfrac{x_2}{2}\right) \end{cases} \tag{5.6}$$

Sistemin sabit noktalarının bulunması için Denklem 5.7'deki lineer olmayan eşitlik çözülmelidir:

$$\begin{cases} x_1\left(1-\frac{x_1}{2}-x_2\right)=0 \\ x_2\left(x_1-1-\frac{x_2}{2}\right)=0 \end{cases} \tag{5.7}$$

Bu eşitlik lineer olmamasına rağmen Denklem 5.8'deki gibi çözülebilir:

$$\begin{aligned} &x_1=0 \Rightarrow x_2\left(-1-\frac{x_2}{2}\right)=0 \Rightarrow \begin{cases} x_2=0 \\ x_2=-2 \end{cases} \\ &\left(1-\frac{x_1}{2}-x_2\right)=0 \Rightarrow x_2=1-\frac{x_1}{2} \\ &\left(1-\frac{x_1}{2}\right)\left(x_1-1-\frac{1-\frac{x_1}{2}}{2}\right)=0 \Rightarrow x_1=\frac{6}{5} \Rightarrow x_2=\frac{2}{5} \\ &x_2=0 \Rightarrow x_1\left(1-\frac{x_1}{2}\right)=0 \Rightarrow \begin{cases} x_1=0 \\ x_1=2 \end{cases} \end{aligned} \tag{5.8}$$

Yukarıdaki verilerde mevcut olan sabitler ile denge noktası, Denklem 5.9'daki gibi gösterilebilir:

$$x^*=(0,0),x^*=(0,-2),x^*=(2,0),x^*=(1.2,0.4) \tag{5.9}$$

Sistem $\dot{x}=f(x)$ gücü olmayan dinamik bir sistemdir.

Bir dinamik sistemin davranışlarının ve çıkışının kontrol altında tutulması için söz konusu sistem dışarıdan gelen bir güce maruz bırakıldığında(kararlılık açısından incelemek için), bu sistem Denklem 5.10'daki gibi gösterilebilir.

$$\begin{cases} \dot{x}=f(x,u) \\ y=g(x,u) \end{cases} \tag{5.10}$$

Bu eşitlik, Denklem 5.11'deki gibi transpoze edilir.

$$u_i=u_i(t),u=\begin{bmatrix}u_1 & u_2 & L & u_n\end{bmatrix}^T,g=\begin{bmatrix}g_1 & g_2 & L & g_n\end{bmatrix}^T \tag{5.11}$$

Dinamik sistemlerin konularına ilaveten, kontrol edilebilirlik ve gözlemlenebilirlik gibi başka konular da ortaya çıkacaktır. Bu tez çalışmasının ana konusu küçük sinyallerin analizidir ve küçük sinyallerin de sistemin sabit noktaları civarında lineer edilebilmesi için bu bölümün geri kalan kısmında sadece lineer sistemler üzerine odaklanılacaktır.

5.1.1. Dinamik bir sistemin lineer yapılması

Dinamik sistem Denklem $\dot{x}=f(x)$ 5.4'ü göz önünde bulunduralım. Eğer x^* bu sistemin sabit bir noktasıysa, $x_{new}=x_{old}-x^*$ değişkeni değiştirilerek sistemin sabit çalışma noktası başlangıç noktasına iletilebilir. Dolayısıyla, sadece $x^*=0$ için sabit çalışma noktası civarında lineer edilmesi incelenecektir. Lineer olmayan Denklem $\dot{x}=f(x)$ ve Denklem 5.10 sistemleri, sabit çalışma noktası civarında lineer edilebilir. Eğer $A=J(x^0)$; (5.4) ve (5.10) sistemlerinin vektör fonksiyonunun i bileşeniyse, Taylor serisinin yardımıyla Denklem 5.12'deki gibi yazılabilecektir.

$$f_i(x_1,x_2,...,x_n)\approx f_i(x_1^*,x_2^*,...,x_n^*)+(x_1-x_1^*,x_2-x_2^*,...,x_n-x_n^*)\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1},\frac{\partial f_i}{\partial x_2},...,\frac{\partial f_i}{\partial x_n}\right)^T_{x=x^*} \tag{5.12}$$

Kısacası:

$$f_i(x)\approx f_i(x^*)+(x-x^*)^T\nabla f_i(x^*) \tag{5.13}$$

Ki bu denklemde $\nabla f_i(x^*)$, x^* sabit noktasında, f_i'nin gradyanı Denklem 5.15'teki gibidir.

$$\nabla f_i(x^*)=\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1},\frac{\partial f_i}{\partial x_2},...,\frac{\partial f_i}{\partial x_n}\right)^T_{x=x^*} \tag{5.14}$$

$$f(x)\approx f(x^*)+J(x^*)(x-x^*) \tag{5.15}$$

Ki $J(x^*)$, f 'nin x^* sabit noktasında Jacobiyan matrisidir:

$$J(x^*)=\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{x=x^*} \tag{5.16}$$

$$\begin{cases} \dot{x}^*=f(x^*) \\ \dot{x} \approx f(x^*)+(x-x^*)J(x^*) \end{cases} \Rightarrow \Delta\dot{x}=J(x^*)(x-x^*) \tag{5.17}$$

Bu durumda $\Delta\dot{x}=\dot{x}-\dot{x}^*$, ki eğer $\Delta x=x-x^*$ konulursa ve x^* sabit noktasını x^0 çalışma noktasıyla değiştirirsek Denklem 5.18'deki gibi olur.

$$\Delta\dot{x}=A\Delta x \tag{5.18}$$

$A=J(x^0)$ matrisi, lineer edilmiş sistemin mod matrisi olarak adlandırılır.

Dinamik sistem, Denklem 5.4'teki gibi, kontrol sistemi Denklem 5.10 da Denklem 5.19 gibi lineer edilecektir:

$$f_i(x,u) \approx f_i(x^0,u^0)+(x-x^0,u-u^0)^T \nabla f_i(x^0,u^0) \tag{5.19}$$

Bu defa hem gradyan vektörü hem de $(x-x^0,u-u^0)$vektörü 2n boyutlu vektörlerdir. Bu iki vektörün dahili çarpılması sonucunda aşağıdaki Denklem 5.20 elde edilebilir.

$$(x-x^0,u-u^0)^T \tilde{N} f_i(x^0,u^0)=\sum_{j=1}^{n}(x_j-x_j^0)\left.\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|_{(x,u)=(x^0,u^0)}+\sum_{j=1}^{n}(u_j-u_j^0)\left.\frac{\partial f_i}{\partial u_j}\right|_{(x,u)=(x^0,u^0)} \tag{5.20}$$

Dolayısıyla, Denklem 5.18'de olduğu gibi Denklem 5.10'a ait olan lineer edilmiş kontrol sistemi, Denklem 5.21'deki gibi yazılabilecektir:

$$\begin{cases} \Delta\dot{x}=A\Delta x+B\Delta u \\ \Delta y=C\Delta x+D\Delta u \end{cases} \tag{5.21}$$

Öyle ki bu eşitlik de Denklem 5.22'deki gibi olacaktır:

$$\begin{aligned} A&=J_1\left(x^0,u^0\right)=\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right)_{(x,u)=\left(x^0,u^0\right)}, B=J_2\left(x^0,u^0\right)=\left(\frac{\partial f_i}{\partial u_j}\right)_{(x,u)=\left(x^0,u^0\right)} \\ C&=J_3\left(x^0,u^0\right)=\left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j}\right)_{(x,u)=\left(x^0,u^0\right)}, D=J_4\left(x^0,u^0\right)=\left(\frac{\partial g_i}{\partial u_j}\right)_{(x,u)=\left(x^0,u^0\right)} \end{aligned} \tag{5.22}$$

5.2. Dinamik ve Lineer Kontrol Sistemleri

Bir önceki bölümde lineer olmayan sistemlerin çalışma noktası civarında nasıl lineer edildiğinden bahsedildi. Elbette lineer etme sadece çalışma noktası civarında geçerlidir. Farklı yaklaşımla, eğer Δu ve Δx küçük sinyaller değillerse, Denklem 5.18 ve 5.21'deki lineer etme durumları geçerli olmayacaktır. Yani söz konusu iki lineer etme yalnızca çalışma noktasının çok az sapmasıyla geçerli olacaktır.

Şimdi, daha fazla analiz için, sistem Denklem 5.18 dikkate alınacaktır. Bu sistemi çözmek üzere birinci dereceden lineer olan diferansiyel denklemi, Denklem 5.23'teki gibi yazılabilecektir:

$$\Delta\dot{x}=A\Delta x \Rightarrow \Delta x\left(t\right)=ce^{At} \tag{5.23}$$

Eğer λ_i'lar özel miktarlar ve V özel matris vektörleriyse, bu durumda e^{At} Denklem 5.24'teki gibi yazılabilecektir:

$$e^{At}=Ve^{\Lambda(t)}V^{-1}$$
$$e^{\Lambda(t)}=\mathrm{diag}\left\{e^{\lambda_1 t},e^{\lambda_2 t},...,e^{\lambda_n t}\right\} \quad (5.24)$$

Eğer $\Delta x(t_0)=\Delta x^0$ sistemin ilk durumuysa, sabit c matrisinin belirlenmesi için Denklem 5.25 yazılabilir.

$$\Delta x(t_0)=ce^{At_0}=\Delta x^0 \Rightarrow c=\Delta x^0 e^{-At_0}=\Delta x^0 V^{-1}e^{-\Lambda(t_0)}V \quad (5.25)$$

Nihayet eşitliğin cevabı, Denklem 5.26'daki gibi elde edilir:

$$\Delta x=\Delta x^0 V^{-1}e^{-\Lambda(t_0)}V\left(Ve^{\Lambda(t)}V^{-1}\right) \quad (5.26)$$

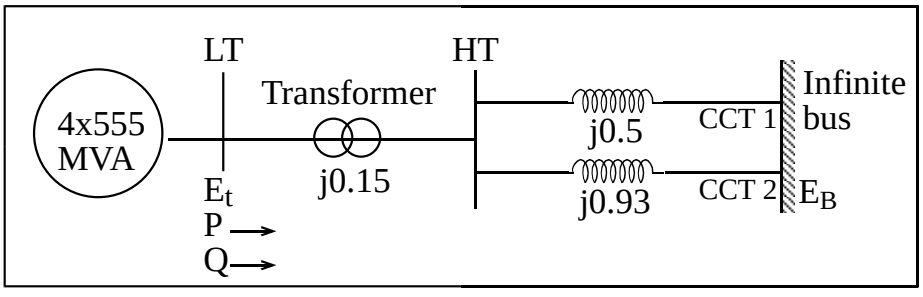
Ya da Laplas dönüşümlerinden yardım alarak Denklem 5.27 ve 5.28'deki gibi yazılabilir.

$$L[\Delta\dot{x}]=L[A\Delta x]\Rightarrow sL[\Delta x]-\Delta x^0=AL[\Delta x]\Rightarrow(sI-A)L[\Delta x]=\Delta x^0$$
$$L[\Delta x]=(sI-A)^{-1}\Delta x^0 \quad (5.27)$$

$$\Delta x(t)=L^{-1}\left\{(sI-A)^{-1}\Delta x^0\right\} \quad (5.28)$$

$(sI-A)$ matrisi, sistemin çözücü matrisi olarak adlandırılır.

5.3. Senkron Makinelerin Dinamiği ve Küçük Sinyal Analizi



Şekil 5.1. Birleştirilmiş 4 adet senkron jeneratör ve sonsuz baraya bağlı olan paralel enerji nakil hattı [36]

Senkron bir makinede klasik olarak Denklem 5.29'daki denklem gösterilebilir:

$$\begin{cases} \Delta\dot{\omega} = \dfrac{1}{2H}\left\{\Delta T_m - K_D\Delta\omega - K_S\Delta\delta\right\} \\ \Delta\dot{\delta} = \omega_0\Delta\omega \end{cases} \tag{5.29}$$

K_S senkron katsayısı aşırı şekilde lineer değildir:

$$K_S = \frac{E_t E_B}{X_T}\mathrm{Cos}(\delta) \tag{5.30}$$

Taylor serisi yardımıyla Denklem 5.31'deki denklem yazılabilir.

$$K_S = \frac{E_t E_B}{X_T}\mathrm{Cos}(\delta_0) - \frac{E_t E_B}{X_T}\mathrm{Sin}(\delta_0)\Delta\delta - \frac{E_t E_B}{X_T}\mathrm{Cos}(\delta_0)\frac{(\Delta\delta)^2}{2!} + \ldots \approx \frac{E_t E_B}{X_T}\mathrm{Cos}(\delta_0) \tag{5.31}$$

Dolayısıla, lineer olmayan yukarıdaki sistem, $\Delta\delta$ sinyalinin küçük olması varsayılarak, Denklem 5.32'deki gibi lineer edilebilecektir:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{-K_D}{2H} & \dfrac{-K_S}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix}\Delta T_m \tag{5.32}$$

Denklem 5.32'de denklemin her iki tarafının Laplas dönüşümü yapıldığında Denklem 5.33'teki gibi olacaktır.

$$\dot{\Delta\delta} = \omega_0\Delta\omega \Rightarrow L\left[\dot{\Delta\delta}\right] = L\left[\omega_0\Delta\omega\right] \Rightarrow sL\left[\Delta\delta\right] - \Delta\delta(0) = \omega_0 L\left[\Delta\omega\right] \Rightarrow L\left[\Delta\delta\right] = \frac{\omega_0}{s}L\left[\Delta\omega\right] + \frac{\Delta\delta(0)}{s} \tag{5.33}$$

Eğer $\Delta\delta(0) = 0$ (yani sistem geçici anlarda dengeli durumda ve rotor açısında herhangi bir sapma olmamış)

$$L[\Delta\delta]=\frac{\omega_0}{s}L[\Delta\omega] \tag{5.34}$$

Denklem 5.32'deki denklemin her iki tarafının Laplas dönüşümü yapıldığında Denklem 5.35'teki gibi olacaktır:

$$L\left[\dot{\Delta\omega}\right]=L\left[-\frac{K_D}{2H}\Delta\omega-\frac{K_S}{2H}\Delta\delta+\frac{1}{2H}\Delta T_m\right]$$

$$sL[\Delta\omega]-\Delta\omega(0)=-\frac{K_D}{2H}L[\Delta\omega]-\frac{K_S}{2H}L[\Delta\delta]+\frac{1}{2H}L[\Delta T_m]=-\frac{K_D}{2H}L[\Delta\omega]-\frac{K_S}{2H}\left\{\frac{\omega_0}{s}L[\Delta\omega]+\frac{\Delta\delta(0)}{s}\right\}+\frac{1}{2H}L[\Delta T_m] \tag{5.35}$$

Basitleştirildikten sonra:

$$\left\{s+\frac{K_D}{2H}+\frac{K_S}{2H}\frac{\omega_0}{s}\right\}L[\Delta\omega]=\Delta\omega(0)-\frac{K_S}{2H}\frac{\Delta\delta(0)}{s}+\frac{1}{2H}L[\Delta T_m] \tag{5.36}$$

Veya:

$$\left\{2Hs^2+K_Ds+K_S\omega_0\right\}L[\Delta\omega]=\left(2H\Delta\omega(0)+L[\Delta T_m]\right)s-K_S\Delta\delta(0) \tag{5.37}$$

Dolayısıyla:

$$L[\Delta\omega]=\frac{\left(2H\Delta\omega(0)+L[\Delta T_m]\right)s-K_S\Delta\delta(0)}{\left\{2Hs^2+K_Ds+K_S\omega_0\right\}} \tag{5.38}$$

Sonuç denklemi, Denklem 5.39'daki gibi olur:

$$\Delta\omega=L^{-1}\left[\frac{\left(2H\Delta\omega(0)+L[\Delta T_m]\right)s-K_S\Delta\delta(0)}{\left\{2Hs^2+K_Ds+K_S\omega_0\right\}}\right] \tag{5.39}$$

Denklem 5.39'un kesirinde bulunan sıfırlar, Denklem 5.32'deki sistemin kararlılığında önemli rol oynamaktadır. Bu sıfırlara *high systematic* kutupları adı verilir. Kutupların bulunması için ikinci dereceden olan Denklem 5.40'daki denklem çözülmelidir.

$$s^2+\frac{K_D}{2H}s+\frac{K_S}{2H}\omega_0=0 \tag{5.40}$$

Bu denklemin standart şekli:

$$s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2=0 \tag{5.41}$$

Denklem 5.40 ve 5.41'deki denklemler kıyaslandığında, Denklem 5.42 elde edilir:

$$\begin{aligned}\omega_n^2&=\frac{K_S}{2H}\omega_0 \Rightarrow \omega_n=\sqrt{\frac{K_S}{2H}\omega_0}\\ 2\xi\omega_n&=\frac{K_D}{2H} \Rightarrow \xi=\frac{K_D}{4H\omega_n}=\frac{K_D}{\sqrt{8HK_S\omega_0}}\end{aligned} \tag{5.42}$$

Dolayısıyla, stabilite frekansı ve stabilite oranı şöyle olacaktır:

$$\omega_n=\sqrt{\frac{K_S}{2H}\omega_0} \tag{5.43}$$

$$\xi=\frac{K_D}{\sqrt{8HK_S\omega_0}} \tag{5.44}$$

Denklem 5.41'deki denkleme ait köklerin aşağıdaki gibidir

$$s_1,s_2=\omega_n\left(-\xi\pm\sqrt{\xi^2-1}\right) \tag{5.45}$$

Sonuç olarak:

$$s_1,s_2=\frac{-K_D\pm\sqrt{(K_D)^2-4(2H)(K_S\omega_0)}}{4H} \tag{5.46}$$

$L[\Delta\omega]$ bulunduktan sonra rotor açı değişimi denklemi kullanılarak, Denklem 5.46'daki gibi yazılabilecektir.

$$L[\Delta\delta]=\frac{\omega_0}{s}\left\{\frac{(2H\Delta\omega(0)+L[\Delta T_m])s-K_S\Delta\delta(0)}{\{2Hs^2+K_Ds+K_S\omega_0\}}\right\} \tag{5.47}$$

$$\Delta\delta=L^{-1}\left[\frac{\omega_0}{s}\left\{\frac{(2H\Delta\omega(0)+L[\Delta T_m])s-K_S\Delta\delta(0)}{\{2Hs^2+K_Ds+K_S\omega_0\}}\right\}\right] \tag{5.48}$$

Sistemin cevabı, kutupların karmaşık yüzeydeki pozisyonuna bağlıdır. s_1,s_2'yi elde edildikten ve $\Delta\omega$ ile $\Delta\delta$'ye ait ters Laplas dönüşümü çok küçük kesirlere indirgendikten sonra bu dönüşüm uygulanabilir. Böylece $\Delta\delta$ ve $\Delta\omega$ zamana göre bulunabilir.

Eğer rotor açısında ve hızında hiçbir değişiklik yoksa (yani $\Delta\omega(0)=\Delta\delta(0)=0$) ve aynı zamanda mekanik momentumunda da hiçbir değişiklik ortaya çıkmazsa ($\Delta T_m(t)=0$) sistem kendi kararlı durumunu sürdürecektir.

Örnek olarak $\Delta T_m(t)=0,\Delta\omega(0)=0,\Delta\delta(0)=5^o\approx 0.0875$ Rad varsayalım. Sönümlendirici ve senkronlaştırıcı ve H (Atalet Sabiti) katsayıları da aşağıdaki gibi olursa:

$K_D=10$, $K_S=0.757$, $H=3.5$, $\omega_0=377.0$

Yani:

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{\omega}\\ \Delta\dot{\delta}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{-10}{7} & \frac{-0.757}{7}\\ 377.0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\omega\\ \Delta\delta\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\frac{1}{7}\\ 0\end{bmatrix}0$$
$$=\begin{bmatrix}\frac{-10}{7} & \frac{-0.757}{7}\\ 377.0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\omega\\ \Delta\delta\end{bmatrix}$$

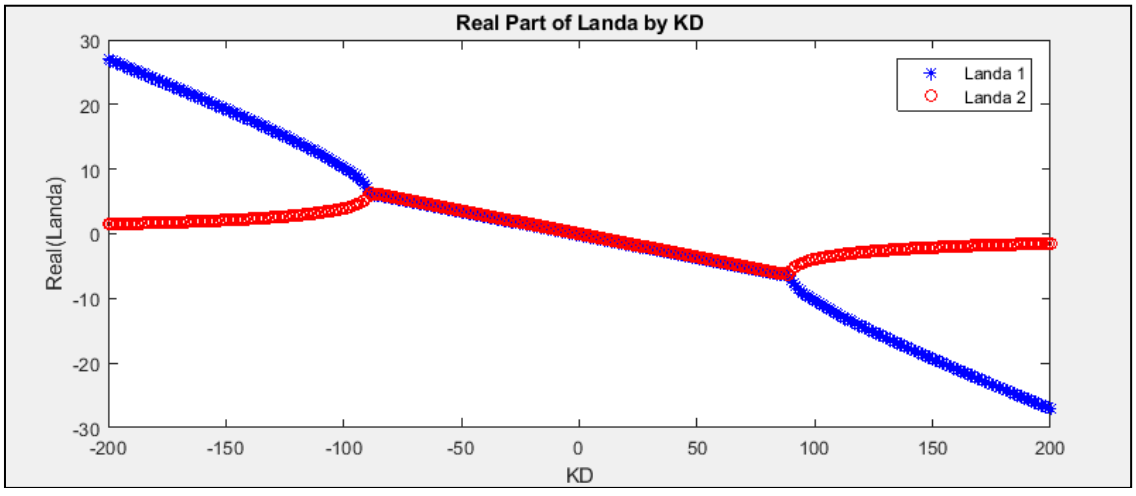
Sistemin ana verileri şöyle hesaplanır:

$$\det\left(\begin{bmatrix}\frac{-10}{7}-\lambda & \frac{-0.757}{7}\\ 377.0 & 0-\lambda\end{bmatrix}\right)=0$$

Bu denklem ikinci derecedendir. Bu denklemin kökleri, sistemin ana verileridir.

$$\begin{cases}\lambda_1 = -0.7143 + 6.3450i;\\ \lambda_2 = -0.7143 - 6.3450i;\end{cases}$$

Her iki miktarın da hakiki kısımları negatiftir, dolayısıyla sistem kararlıdır. Şekil 5.2'de diyagram her bir ana verinin sönümlendirici katsayısının değişimleriyle adım adım çizilmiştir.



Şekil 5.2. Sistem ana verilerinin reel kısımlarına ait konum grafiği

Bu sistemde kararlaştırıcı momentum katsayısı 0.757 atalet momentum 376.99 ve kararlaştırıcı katsayısı ise -200 ve 200 aralığında verilmiştir.

K_s=0.757, H=3.5, ω_0=376.99, $-200 \le K_D \le 200$

Şekil 5.2'ye ait olan MATLAB kodları Ek 1'de verilmiştir.

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi, $-100 \le K_D \le 100$ için her iki miktarın reel kısmı eşittir. Ama bu aralık dışında birbirlerinden farklıdır. $K_D = 0$ olunca, her iki miktarın hakiki kısmı sıfıra eşit olur ve $K_D > 0$ olduğunda her iki miktarın hakiki kısmı negatif olur. $0 < K_D \le 200$ aralığında her iki miktarın negatifte kaldığı gösterilmektedir. Dolayısıyla sistem $0 < K_D \le 200$ aralığında kararlıdır. Çizelge 5.1, Şekil 5.2'deki sistemin ana verilerini göstermektedir. Senkron edici momentumlar atalet momentumu ve açısal hız ve kararlılık oranına göre çözülmüştür. Kararlılık oranı -20 ve 20 aralığında baz değer alınmıştır.

Çizelge 5.1. Sistem ana verileri

KD	Landa1	Landa2
-20	1.428571428571429-6.223179202606583i	1.428571428571429+6.223179202606583i
-19	1.357142857142857-6.239145693089065i	1.357142857142857+6.239145693089065i
-18	1.285714285714286-6.254255710298062i	1.285714285714286+6.254255710298062i
-17	1.214285714285715-6.268515447725032i	1.214285714285715+6.268515447725032i
-16	1.142857142857143-6.281930695678368i	1.142857142857143+6.281930695678368i
-15	1.071428571428571-6.294506853647253i	1.071428571428571+6.294506853647253i
-14	1.000000000000000-6.306248941667757i	1.000000000000000+6.306248941667757i
-13	0.928571428571429-6.317161610749446i	0.928571428571429+6.317161610749446i
-12	0.857142857142857-6.327249152414871i	0.857142857142857+6.327249152414871i
-11	0.785714285714286-6.336515507399175i	0.785714285714286+6.336515507399175i
-10	0.714285714285714-6.344964273552143i	0.714285714285714+6.344964273552143i
-9	0.642857142857143-6.352598712980637i	0.642857142857143+6.352598712980637i
-8	0.571428571428572-6.359421758465216i	0.571428571428572+6.359421758465216i
-7	0.500000000000000-6.365436019180909i	0.500000000000000+6.365436019180909i
-6	0.428571428571428-6.370643785748655i	0.428571428571428+6.370643785748655i

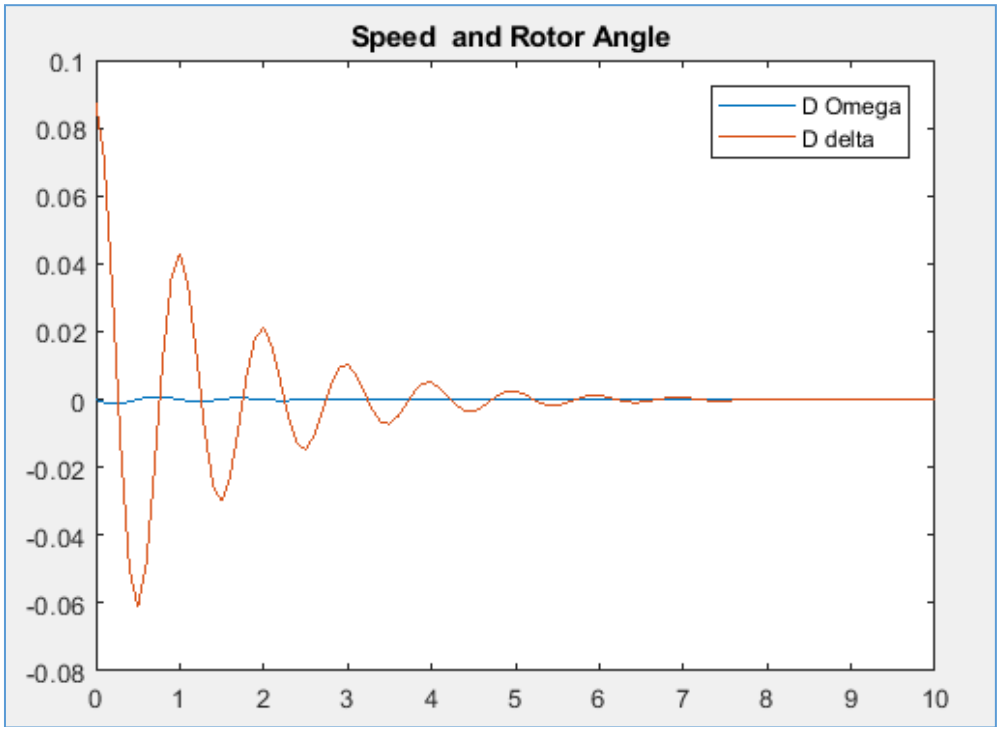
Çizelge 5.1. (devam) Sistem ana verileri

KD	Landa1	Landa2
-5	0.357142857142857-6.375047034640415i	0.357142857142857+6.375047034640415i
-4	0.285714285714286-6.378647431958008i	0.285714285714286+6.378647431958008i
-3	0.214285714285714-6.381446336602603i	0.214285714285714+6.381446336602603i
-2	0.142857142857143-6.383444802849040i	0.142857142857143+6.383444802849040i
-1	0.071428571428571-6.384643582336400i	0.071428571428571+6.384643582336400i
0	0.000000000000000-6.385043125483626i	0.000000000000000+6.385043125483626i
1	-0.071428571428571-6.384643582336400i	-0.071428571428571+6.384643582336400i
2	-0.142857142857143-6.383444802849040i	-0.142857142857143+6.383444802849040i
3	-0.214285714285714-6.381446336602603i	-0.214285714285714+6.381446336602603i
4	-0.285714285714286-6.378647431958008i	-0.285714285714286+6.378647431958008i
5	-0.357142857142857-6.375047034640415i	-0.357142857142857+6.375047034640415i
6	-0.428571428571428-6.370643785748655i	-0.428571428571428+6.370643785748655i
7	-0.500000000000000-6.365436019180909i	-0.500000000000000+6.365436019180909i
8	-0.571428571428572-6.359421758465216i	-0.571428571428572+6.359421758465216i
9	-0.642857142857143-6.352598712980637i	-0.642857142857143+6.352598712980637i
10	-0.714285714285714-6.344964273552143i	-0.714285714285714+6.344964273552143i
11	-0.785714285714286-6.336515507399175i	-0.785714285714286+6.336515507399175i
12	-0.857142857142857-6.327249152414871i	-0.857142857142857+6.327249152414871i
13	-0.928571428571429-6.317161610749446i	-0.928571428571429+6.317161610749446i
14	-1.000000000000000-6.306248941667757i	-1.000000000000000+6.306248941667757i
15	-1.071428571428571-6.294506853647253i	-1.071428571428571+6.294506853647253i
16	-1.142857142857143-6.281930695678368i	-1.142857142857143+6.281930695678368i
17	-1.214285714285715-6.268515447725032i	-1.214285714285715+6.268515447725032i
18	-1.285714285714286-6.254255710298062i	-1.285714285714286+6.254255710298062i
19	-1.357142857142857-6.239145693089065i	-1.357142857142857+6.239145693089065i
20	-1.428571428571429-6.223179202606583i	-1.428571428571429+6.223179202606583i

Çizelge 5.1'e ait MATLAB kodları Ek-2'de verilmiştir. Denklem 5.32'deki sistemin cevabı, $K_s = 0.757$, H=3.5, $\omega_0 = 376.99$ koşullarında farklı miktarlar baz alınarak Şekil 5.3-5.5 10 saniyeye kadar çizilmiştir. Bu diyagram, rotorun açı ve hız değişimlerini 10 saniyeye kadar gösterir.

Şekil 5.3 ve Denklem 6.32 sisteminin $K_s = 0.757$, H= 3.5, $\omega_0 = 376.99$, $K_D = 10$ koşullarına yanıtı;

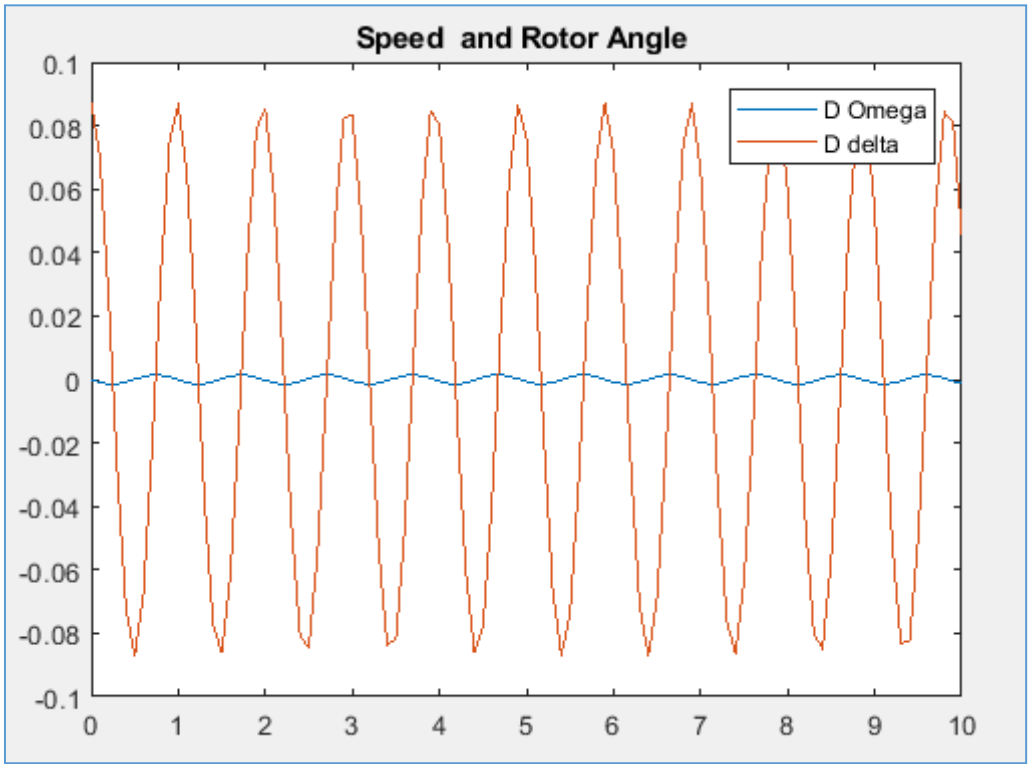
Eğer yukarıdaki örnekte sönümlendirici katsayısı $KD = 0$ olursa, sistemin yanıtı ve ana verilerinin çözümü şöyle olacaktır $\lambda_1 = 0.0000 + 6.385$ ve $\lambda_2 = 0.0000 - 6.385$ görüldüğü gibi her iki λ_1 ve λ_2 de reel kısımlar pozitif bir değere sahibler ve sistem kararlılık ve kararsızlık sınırındadır her an küçük bir arızanın meydane gelmesi ile sistem hemen kararsızlığa doğru gidecektir ve hata sistemin çökmesine sebebiyet verecektir bu yüzden sonuçlara dayanarak kararlaştırıcı ve ya sönümlendiirici kat sayısının değeri çok önemli bir rol oynamaktadir.



Şekil 5.3. Rotor açısı ve hız değişimi

Şekil 5.4'de Denklem 5.32 sisteminin $K_s = 0.757$, $H = 3.5$, $\omega_0 = 376.99$, $K_D = 0$ koşullarına yanıtı verilmiştir.

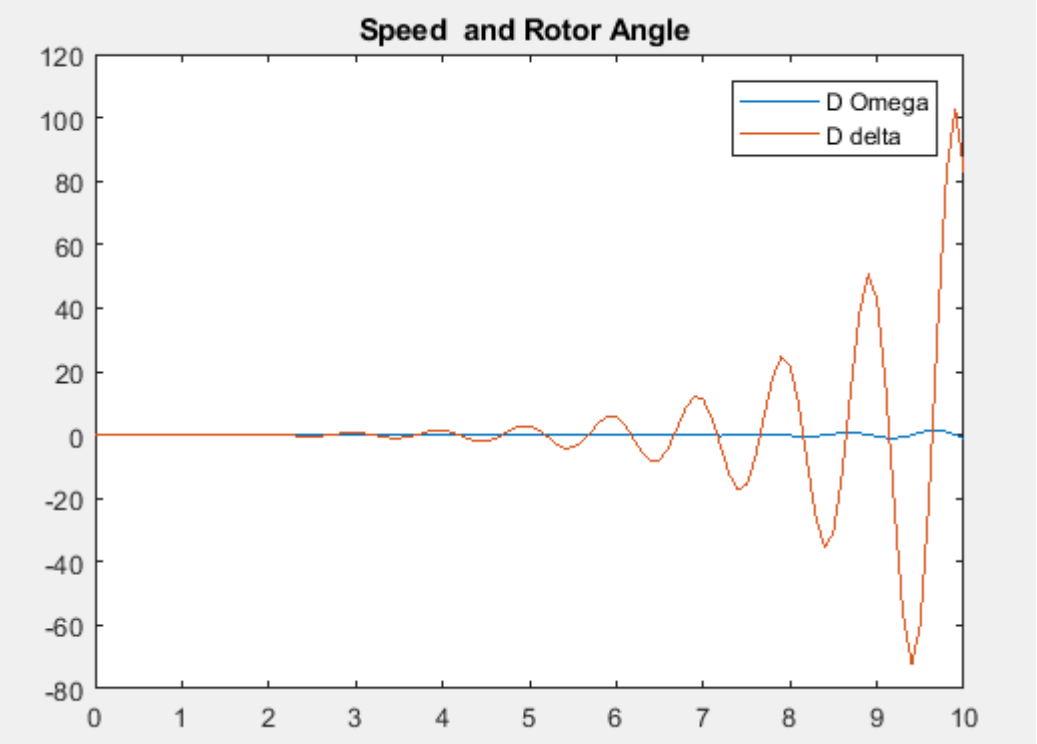
Her iki ana verinin reel kısmı sıfıra eşittir. Dolayısıyla, sistem ne sıfıra (kararlığa) ne de sonsuzluğa (kararsızlığa) doğru yönelir. Bunların yerine, kendi dalgalanma durumuna devam eder.



Şekil 5.4. Kararlılık ve kararsızlık arasında dalgalanan sistemin yanıtı

Başka bir durumda her zaman sönümlendirici katsayısı KD= -10 olarak değişirse, ana veriler ve sistemin yanıtı da Şekil 5.5'teki gibi olur.

$\lambda_1 = 0.7143 + 6.3450i$
$\lambda_2 = 0.7143 - 6.3450i$



Şekil 5.5. Kararsızlığın zamanla doğrusal ilişkisi olan sistem yanıtı

Şekil 5.4. $K_s = 0.757$, H= 3.5, $\omega_0 = 376.99$, $K_D = -10$ koşullarına Şekil 5.5'in sistem yanıtı görüldüğü üzere her iki miktar da pozitiftir. Dolayısıyla sistem grafiğide kararsızdır ve zaman ilerledikçe sistemin dalgalanma aralıkları çoğalmaktadır. Şekiller 5.3, 5.4, ve 5.5'e ait olan MATLAB kodları Ek 3'te verilmiştir. Senkron jeneratörünün uyarma sistemine ait denklemler bir senkron jeneratörün dinamiği, uyarma devresi dikkate alınarak şöyle yazılır.

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\psi}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-K_D}{2H} & \frac{-K_1}{2H} & \frac{-K_2}{2H} \\ \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L'_{ads} & \frac{-\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left\{ 1 - \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} - m_2 L'_{ads} \right\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta\psi_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} \quad (5.49)$$

Matris 5.49'un parametreleri aşağıdakı gibi ayrıştırılır.

$$R_T = R_a + R_E$$
$$X_{Td} = X_E + \left(L'_{ads} + L_l \right) = X_E + X'_{ds}$$
$$X_{Tq} = X_E + \left(L_{aqs} + L_l \right) = X_E + X_{qs}$$
$$D = R_T^2 + X_{Td} X_{Tq}$$

$$L'_{ads} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}}}$$

$$m_1 = \frac{E_B(X_{Tq}\mathrm{Sin}\delta_0 - R_T\mathrm{Cos}\delta_0)}{D}$$

$$n_1 = \frac{E_B(R_T\mathrm{Sin}\delta_0 + X_{Td}\mathrm{Cos}\delta_0)}{D}$$

$$m_2 = \frac{X_{Tq}}{D}\frac{L_{ads}}{L_{ads}+L_{fd}}$$

$$n_2 = \frac{R_T}{D}\frac{L_{ads}}{L_{ads}+L_{fd}}$$

$$K_1 = n_1\left(\psi_{ad0} + L_{aqs}i_{d0}\right) - m_1\left(\psi_{aq0} + L'_{aqs}i_{q0}\right)$$

$$K_2 = n_2\left(\psi_{ad0} + L_{aqs}i_{d0}\right) - m_2\left(\psi_{aq0} + L'_{aqs}i_{q0}\right) + \frac{L'_{aqs}}{L_{fd}}i_{q0}$$

$X_d = 1.81, X_q = 1.76, X'_d = 0.3, X_l = 0.16$

$R_a = 0.003, T_{d0} = 8.0\ \mathrm{s}, H = 3.5, K_D = 0$

$A_{sat} = 0.031, B_{sat} = 6.93, \psi_{T1} = 0.8$

$L_{adu} = 1.65, L_{aqu} = 1.60, L_l = 0.16$

$R_a = 0.003, R_{fd} = 0.0006, L_{fd} = 0.153$

$K_{sd} = K_{sq} = 0.8491, \delta_i = 43.13^o$

$e_{d0} = 0.6836, e_{q0} = 0.7298, i_{d0} = 0.8342, i_{q0} = 0.4518$

$\delta_0 = 79.13^o, E_{fd0} = 2.395, K_{sd(incr)} = K_{sq(incr)} = 0.434$

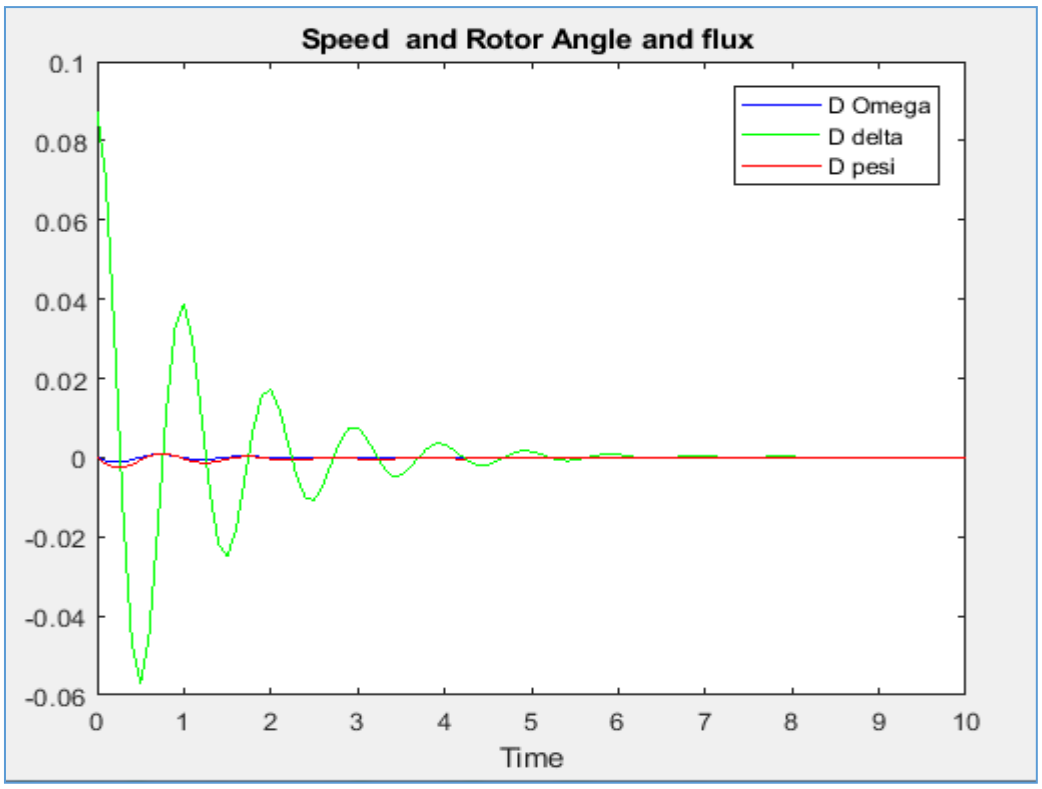
Örnek olarak sistemin mod matrisinin aşağıdaki gibi olduğu varsayıldığında:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\psi}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -0.1092 & -0.1236 \\ 376.991 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1938 & -0.4229 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta\psi_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} \qquad (5.50)$$

Sistemin ana verileri şöyle olacaktır:

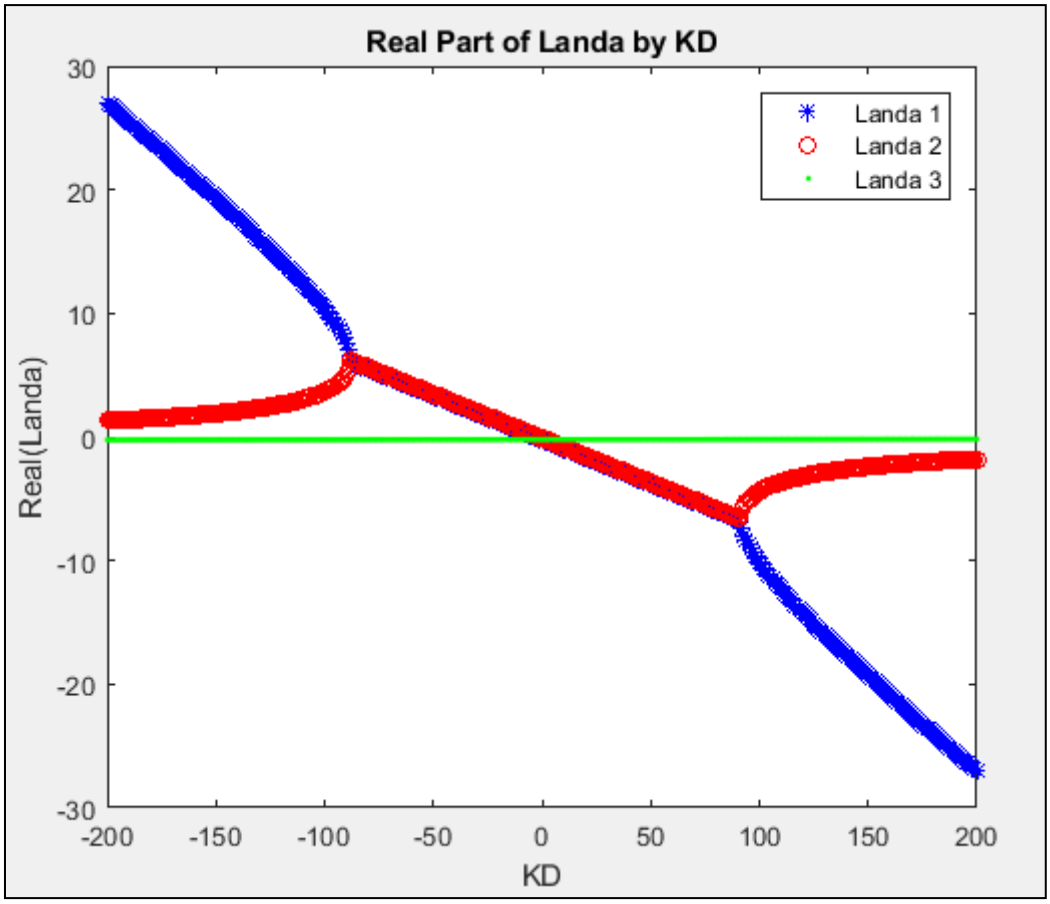
λ_1 = -0.109566427056039 + 6.411750243806709i
λ_2 = -0.109566427056039 - 6.411750243806709i
λ_3 = -0.204767145887922 + 0.000000000000000i

Tüm ana verilerin reel kısımları negatiftir, dolayısıyla sistem kararlıdır. Eğer rotor açısı 5 derece küçük bir sapma ile oynarsa $\Delta\omega = \Delta\psi_{fd} = 0$, $\Delta\delta = 5^o$ » 0.087266462599716 Rad diğer değişkenler de Şekil 5.6'daki gibi değişirler.



Şekil 5.6. Hız-rotor açısı ve manyetik akı grafiği

Şekil 5.6 ve Denklem 5.21 sisteminin, $\Delta\omega$=0, $\Delta\delta$=5°, $\Delta\psi_{fd} = 0$ başlangıç koşullarında sonraki 10 saniyede yanıtı Şekil 5.6'ya ait MATLAB kodları Ek-4'te verilmiştir. Ana verilerin reel kısmı, mutlak büyüklükleri küçük olan negatif rakamlar olduğundan sistem dengesini yavaş yavaş geri kazanır. Sistemde yer alan diğer ΔT_m,ΔE_{fd} iki değişken sistemin giriş değişkenleri olup, sistemin kontrolünde görev alırlar. Bunları kullanmak suretiyle sisteme dışardan bir güç uygulanırsa, sistemin kararlı hale getirilmesi mümkün olacaktır. Şekil 5.7'de ana verilerin reel kısımlarına ait konum diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.7. λ'nın KD ile olan reel kısmı

Şekil 5.7 ve Denklem 5.21 sisteminin $-200 \le K_D \le 200$ aralığında ana miktarların hakiki kısmına ait konum diyagramı Şekil 5.7'ye ait MATLAB kodları Ek-5'te verilmiştir. Güç sistemi ve uyartım system denklemleri Bir senkron jeneratörün dinamik denklemleri, uyartım sistemi dikkate alındığında aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\psi}_{fd} \\ \Delta\dot{v}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta\psi_{fd} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \qquad (5.51)$$

Üçüncü ve dördüncü satır bileşenleri aşağıdaki gibidir. Geri kalanlar ise Denklem 5.50'deki gibidir.

$$a_{34} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A$$

$$a_{42}=\frac{K_5}{T_R},a_{43}=\frac{K_6}{T_R},a_{44}=\frac{1}{T_R}$$

$$K_5=\frac{e_{d0}}{E_{t0}}\left[-R_a m_1+L_l n_1+L_{aqs} n_1\right]+\frac{e_{q0}}{E_{t0}}\left[-R_a n_1-L_l m_1-L'_{ads} m_1\right]$$

$$K_6=\frac{e_{d0}}{E_{t0}}\left[-R_a m_2+L_l n_2+L_{aqs} n_2\right]+\frac{e_{q0}}{E_{t0}}\left[-R_a n_2-L_l m_2-L'_{ads}\left(\frac{1}{L_{fd}}-m_2\right)\right]$$

5.4. PSS'le İlgili Olan Sistem Denklemleri

Pss içeren senkron bir jeneratörün dinamiği aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{\omega}\\ \Delta\dot{\delta}\\ \Delta\dot{\psi}_{fd}\\ \Delta\dot{v}_1\\ \Delta\dot{v}_2\\ \Delta\dot{v}_s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_{11}&a_{12}&a_{13}&0&0&0\\ a_{21}&0&0&0&0&0\\ 0&a_{32}&a_{33}&a_{34}&0&0\\ 0&a_{42}&a_{43}&a_{44}&0&0\\ a_{51}&a_{52}&a_{53}&0&a_{55}&0\\ a_{61}&a_{62}&a_{63}&0&a_{65}&a_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\omega\\ \Delta\delta\\ \Delta\psi_{fd}\\ \Delta v_1\\ \Delta v_2\\ \Delta v_s\end{bmatrix} \qquad (5.52)$$

Beşinci ve altıncı sütunlara ait elemanlar ile beşinci ve altıncı satırların elemanları şöyle elde edilir:

$$a_{51}=K_{STAB}a_{11},a_{52}=K_{STAB}a_{12},a_{53}=K_{STAB}a_{13},a_{55}=-\frac{1}{T_w}$$

$$a_{61}=\frac{T_1}{T_2}a_{51},a_{62}=\frac{T_1}{T_2}a_{52},a_{63}=\frac{T_1}{T_2}a_{53},a_{65}=\frac{T_1}{T_2}a_{55}+\frac{1}{T_2},a_{66}=-\frac{1}{T_2}$$

Kundur'un (12.5) örneği baz alarak, sistemin denklemlerini aşağıdaki gibi varsayalım (Kundur, 1994).

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{\omega}\\ \Delta\dot{\delta}\\ \Delta\dot{\psi}_{fd}\\ \Delta\dot{v}_1\\ \Delta\dot{v}_2\\ \Delta\dot{v}_s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&-0.1092&-0.1236&0&0&0\\ 376.99&0&0&0&0&0\\ 0&-0.1938&-0.4229&-27.3172&0&0\\ 0&-7.3125&20.8391&-50.0&0&0\\ 0&-1.0372&-1.1738&0&-0.7143&0\\ 0&-4.8404&-5.4777&0&26.9697&-30.3030\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\omega\\ \Delta\delta\\ \Delta\psi_{fd}\\ \Delta v_1\\ \Delta v_2\\ \Delta v_s\end{bmatrix} \qquad (5.53)$$

Sistemin ana verileri şu şekilde elde edilir:

$\lambda_1 = -39.0967 + 0.0000i$
$\lambda_2 = -1.0055 + 6.6073i$
$\lambda_3 = -1.0055 - 6.6073i$
$\lambda_4 = -0.7385 + 0.0000i$
$\lambda_5 = -19.7970 + 12.8224i$
$\lambda_6 = -19.7970 - 12.8224i$

Ana verilerin tüm reel kısımları negatiftir, dolayısıyla sistem kararlıdır. Diğer bir ifadeyle, sistem değişkenlerinde olan küçük değişimler sistemin kararlılığını etkileyemez ve kısa bir süre sonra sistem denge (sabit veya kritik) noktasına geri dönecektir.

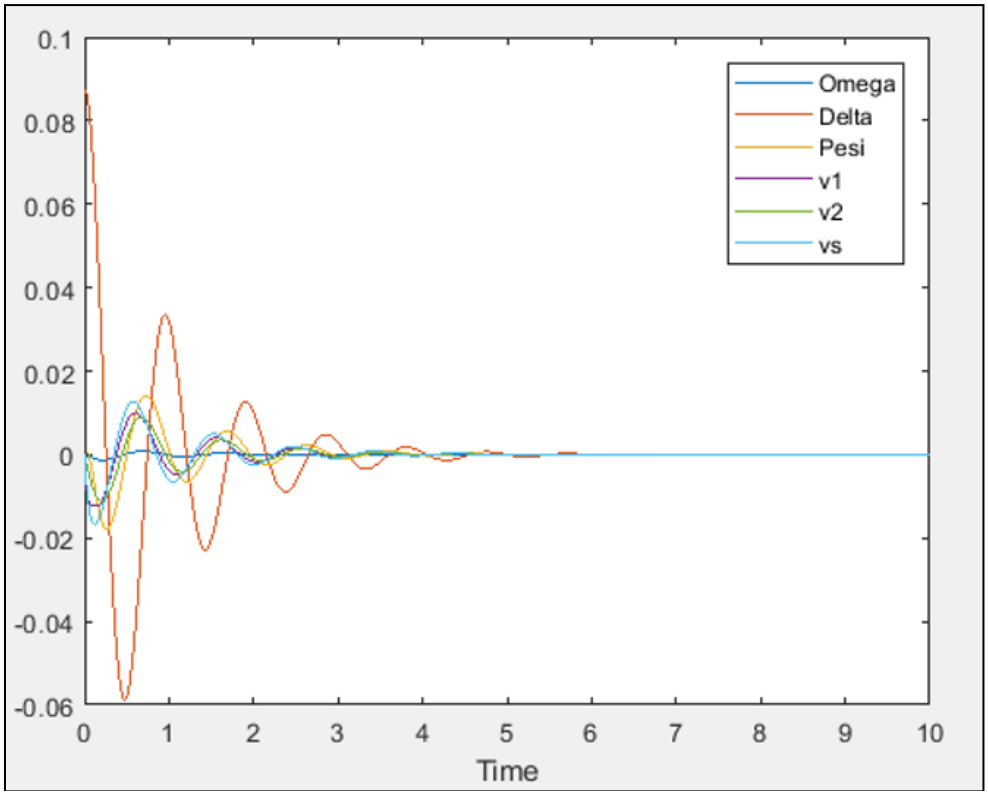
Sağ tarafta başlangıç miktarlarında olan her türlü değişim, tüm değişkenleri etki altında bırakabilir. Sistem değişkenlerinde değişim meydana gelmediği sürece sistem kararlı durumunu koruyacaktır.Başka bir deyişle, eğer $\Delta\omega=\Delta\delta=\Delta\psi_{fd}=\Delta v_1=\Delta v_2=\Delta v_s=0$ olursa, sistem kararlı bir şekilde işlemine devam edecektir.

$t=0$'da $\Delta\delta$'nin miktarının aniden değiştiği ve kondisyon değişkenlerinin de aşağıdaki gibi değiştiği varsayıldığında:

$\Delta\omega=\Delta\psi_{fd}=\Delta v_1=\Delta v_2=\Delta v_s=0, \quad \Delta\delta=5^o=0.0875\text{rad}$

Bu durumda, tüm değişkenler gelecek anlarda bu vaziyetten etkileneceklerdir. Şekil 5.8'de olaydan 10 saniye sonraki durumu göstermektedir.

Şekil 5.8. Denklem 5.53'teki sistemin $\Delta\omega=\Delta\psi_{fd}=\Delta v_1=\Delta v_2=\Delta v_s=0$, $\Delta\delta=5^o=0.0875$ rad başlangıç koşullarında olaydan 10 saniye sonraki yanıtı, Şekil 5.8'e ait MATLAB Kodları Ek-6'da verilmiştir. Diyagramda görüldüğü gibi sistem kararlı halini geri kazanmaktadır ve tüm değişkenler yeniden sıfıra meyletmektedirler ve sistem kararlılığına ulaşmaktadır. Geçen örneklerde de görüleceği üzere makine parametrelerindeki her türlü değişim, ana verilerin konum pozisyonlarını etki altında bırakacaktır ve böylece küçük sinyaller de dahil olmak üzere sistemin kararlılığını tehdit edecektir. Yine önceki örneklerde görüldüğü gibi ana verilerin konum değişimleri, K_D sönümleyici katsayısı değişimlerine göre çizilmektedir.

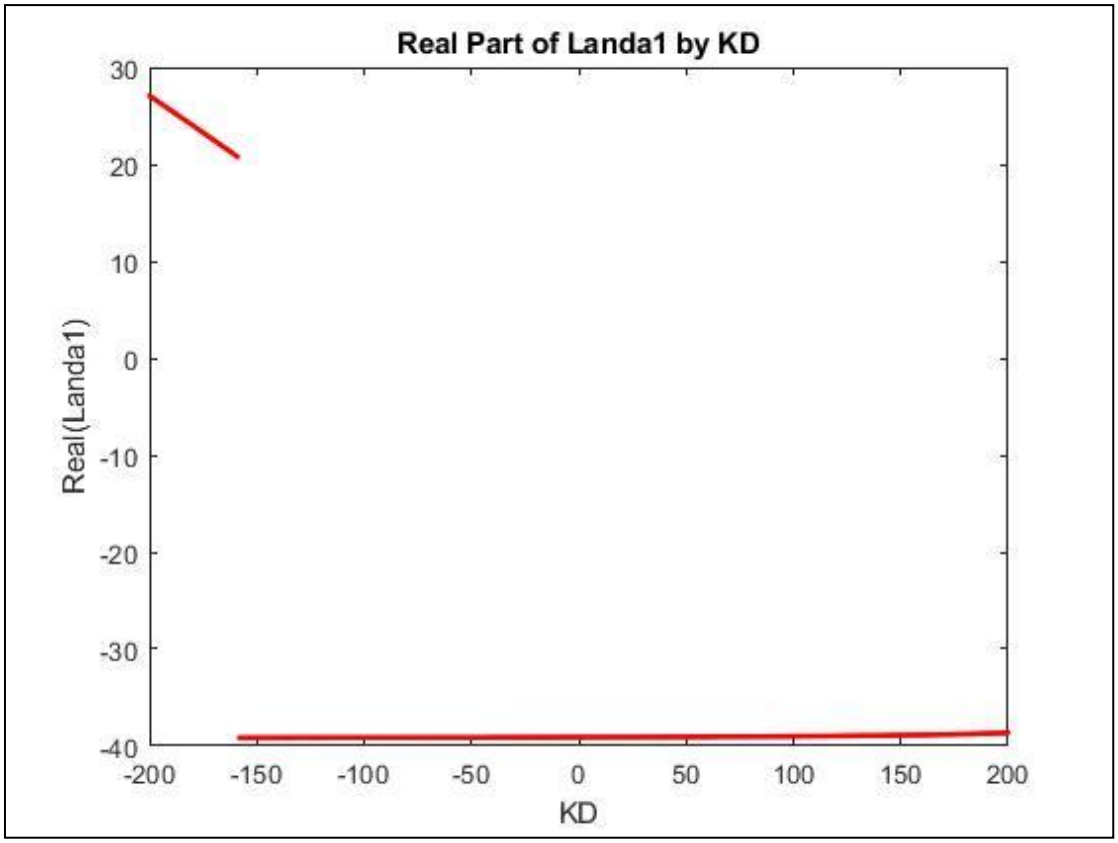


Şekil 5.8. Sistem kararlılığının 10 saniyeye kadar yanıtı

Şekil 5.9 sistemi için, $-200 \le K_D \le 200$ sönümleyici katsıyısı aralığında, ilk ana verilere ait reel kısımların konum değişimleri.

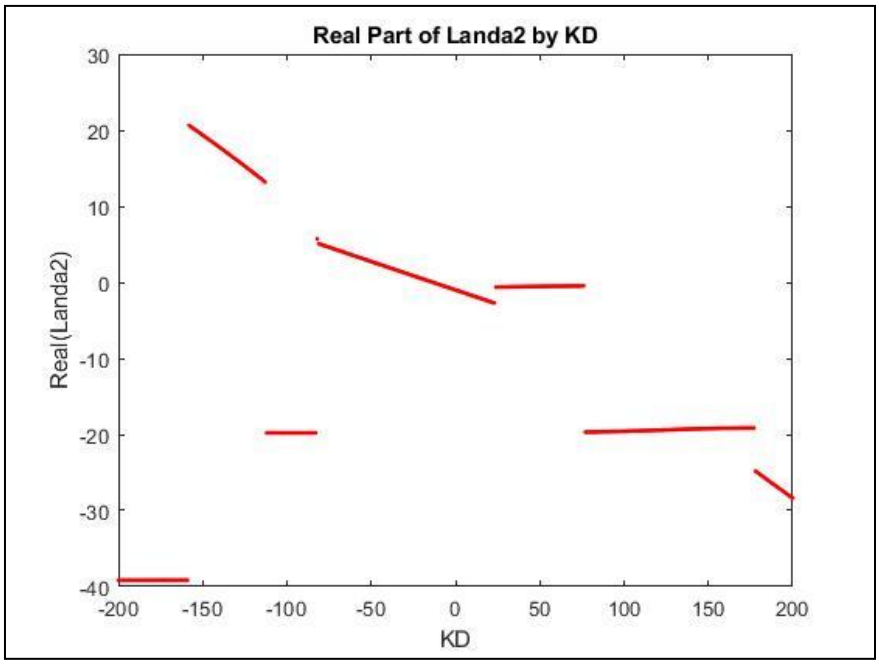
Şekil 5.9, $-160 \le K_D \le 200$ katsayısı aralığı için ilk ana veri reel kısımların henüz negatif kaldığını ama $-200 \le K_D \le -160$ katsayısı aralığında hakiki kısımların pozitif olduklarını ve sistemin kararsız olacağını göstermektedir. Devam eden bölümlerde Şekil 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 ve 5.14'te sırayla ikinci, üçüncü, dördüncü, beşinci ve altıncı ana verilerin reel kısımları $-200 \le K_D \le 200$ katsayısı aralığında çizilmiştir.

Her bir aralıkta, ana verilerin yalnız birisi bile pozitif olursa, sistemin kararsızlığına yol açacaktır. Yukarıda bahsedilen diyagramlar incelenerek, Şekil 5.9 sistemi için sönümlendirici değişkeni değiştiğinde, tüm aralıklarda negatif olan ana verileri bulmak mümkündür. Örneğin $K_D = -50$'de ilk ana verilerin reel kısımları negatiftir, ama aynı katsayıda ikinci ve üçüncü ana verilerin reel kısımları pozitif görünmektedir. Dolayısıyla $K_D = -50$ kararlı katsayı aralığında yer alamaz.



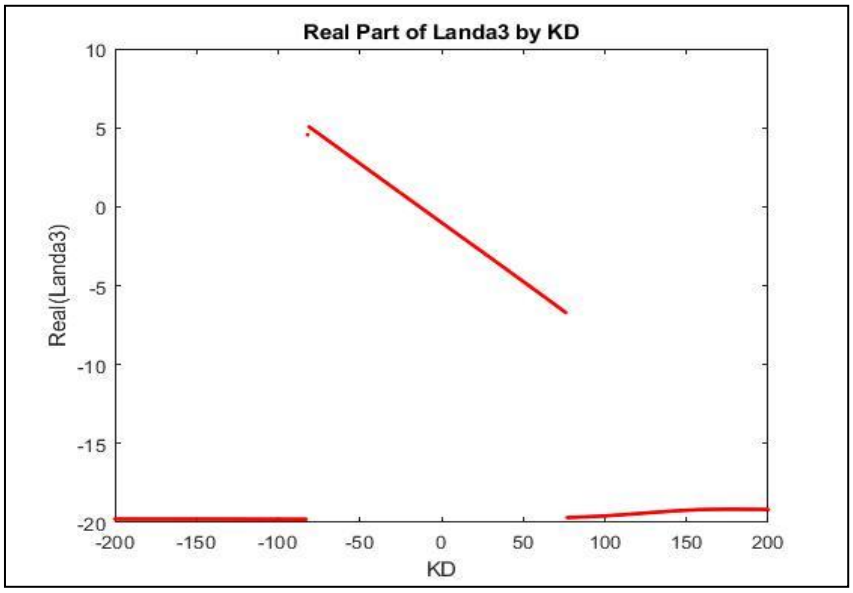
Şekil 5.9. Sistem ana verilerinin konum değişimi

Şekil 5.10, Denklem 5.53 sistemi için $-200 \le K_D \le 200$ sönümleyici katsıyısı aralığında, ikinci ana verilerine ait hakiki kısımların konum değişimleri yinede tamamen konum pozitif kısımdan negatif kısımlara taşınmamaktadır ve sistemde meydane gelen küçük sapmalar sistemin kararlılığını tehdit edecek seviyelerdedir.



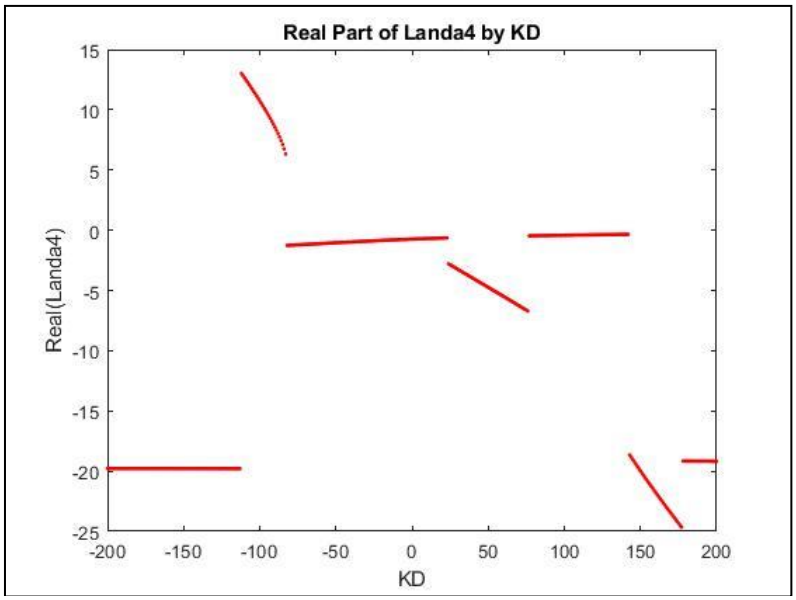
Şekil 5.10. Sistemin ikinci ana verilerine ait hakiki kısımların konum değişimi

Şekil 5.11, Denklem 5.53 sistemi için $-200 \le K_D \le 200$ sönümleyici katsıyısı aralığında, üçüncü ana verilerine ait reel kısımların konum değişimleri.



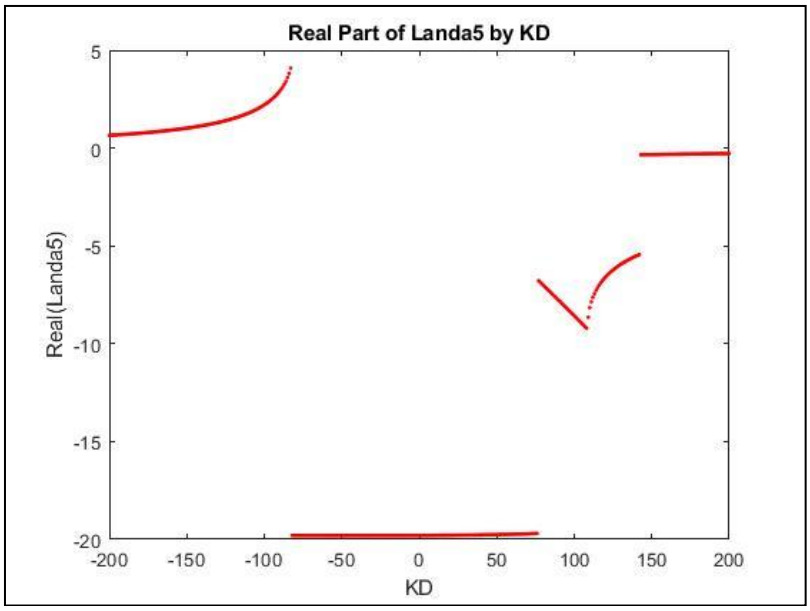
Şekil 5.11. Sönümleyici katsıyısı aralığında, üçüncü ana verilerine ait reel kısımların konum değişimi

Şekil 5.12, Denklem 5.53 sistemi için $-200 \le K_D \le 200$ sönümlendirici katsıyısı aralığında, dördüncü ana verilerine ait reel kısımların konum değişimleri.



Şekil 5.12. Sönümlendirici katsıyısı aralığında, dördüncü ana verilerine ait reel kısımların konum değişimi

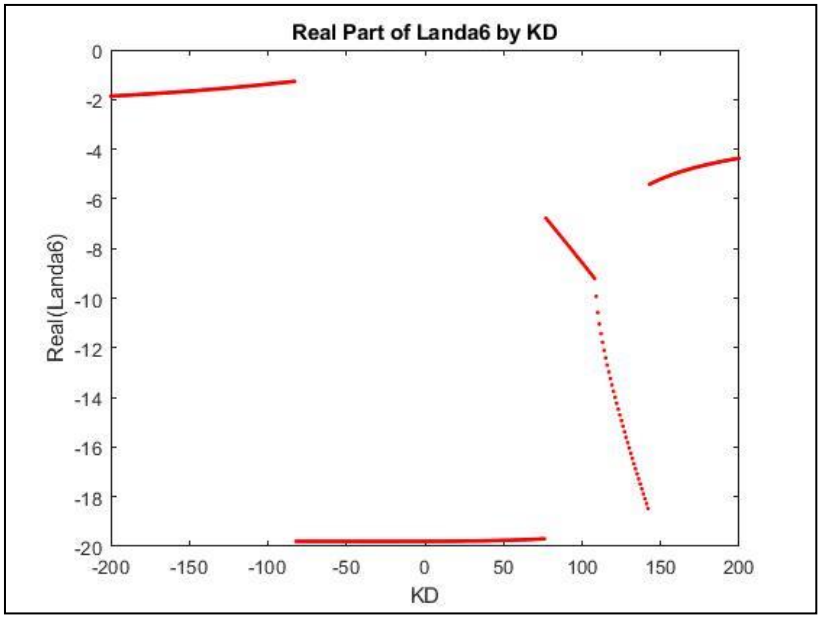
Şekil 5.13, Denklem 5.53 sistemi için $-200 \le K_D \le 200$ sönümlendirici katsıyısı aralığında, beşinci ana verilerine ait hakiki kısımların konum değişimleri.



Şekil 5.13. Sönümlendirici katsıyısı aralığında, beşinci ana verilerine ait hakiki kısımların konum değişimleri

Şekil 5.14, Denklem 5.53 sistemi için $-200 \le K_D \le 200$ sönümlendirici katsıyısı aralığında, altıncı ana verilerine ait reel kısımların konum değişimleri görülmektedir. Şekiller 5.9, 5.10,

5.11, 5.12, 5.13 ve 5.14'de ise ana verilere ait reel kısımların konumları için MATLAB Kodları Ek-7'de verilmiştir. K_D gibi başka her bir parametre için kararlılık aralığını incelemek mümkündür. Örneğin H'nin değişimiyle ana verilerin konumunda oluşan etki gözlemlenebilir.



Şekil 5.14. Sönümlendirici katsıyısı aralığında, altıncı ana verilerine ait reel kısımların konum değişimleri

5.4. Çok-Makineli Senkron Sistemler

Önceki kısımlarda bahsedildiği üzere mod matrisinin ana verileri sistem kararlılığında önemli rol oynamaktadır. Bu miktarların reel kısımları üstel değişimler, uzay matris kısımlarıysa sinus cinsinden olan dalgalanma değişimleri gösterirler. Eğer reel kısım negatifse, yanıtın üstel kısmı sıfıra yönelecektir. Sonuç olarak, dalgalanan kısım da bundan etkilenerek sıfıra doğru yönelecektir.

$$e^{a+ib} = e^{a} e^{ib} = e^{a}\left(\mathrm{Cos}(b) + i\mathrm{Sin}(b)\right) \tag{5.54}$$

Ancak bazı ana verilerin negatif olmayan reel kısımlar içermesi halinde, yanıtlar zaman geçtikce sıfıra meyletmeyeceklerdir. Buna karşın, ya büyüyen dalgalanmalarla sonsuzluğa yönelecektir (ana veriler pozitif ise) ya da önceki dalgalanmayla yoluna devam edecektir (ana verileri negatif ise). Dolayısıyla, küçük bir kaos bile sistemin dengesini bozmaya

yetecektir. Bu açıklamalardan anlaşılacağı üzere lineer sistemlerin analizinde karmaşık yüzeyde olan ana verilerin konumunu bilmek yeterli olmakla birlikte ana verilerin reel kısmında olan işaret bile yeterlidir. Devam eden kısımlarda büyük sistemlerde ana verilerin bulunma yöntemleri incelenecektir.

5.5. Küçük Sinyallerin Büyük Ağlarda Bıraktığı Etki

K baralı ve n senkron makineli büyük bir ağ olduğu varsayıldığında, senkron makineler akımı ağa iletirler ve iletim hatları belirli edmitansa sahip olurlar. Ağ dengelidir; bu bölümde hatalar, parazitler veya herhangi bir başka kaynaktan oluşan küçük sinyalin sistem üzerindeki etkisi incelenecektir. Örneğin, rotor açısında veya jeneratörlerin dönme hızında küçük bir değişim meydana geldiğinde, ağda bulunan akımlar nasıl etkilenecektir? Net olarak, elde edilen sonuçların doğruluk şartı, oluşan sinyallerin küçük sinyal olmasıdır (çünkü büyük sinyaller için sistem lineer varsayılamaz). Dolayısıyla, bazı jeneratörlerin işlev dışı kalması ve bazı iletim hatlarında meydana gelen kısa devreler gibi olaylar küçük sinyal konusunu aşar ve bu olaylar küçük sinyal konseptleriyle analiz edilemez.

İlk olarak eğer ağın edmitans matrisi aşağıdaki şekildeyse:

$$Y_N = \begin{bmatrix} y_{N_{11}} & y_{N_{12}} & L & y_{N_{1k}} \\ y_{N_{21}} & y_{N_{22}} & L & y_{N_{2k}} \\ M & M & O & M \\ y_{N_{k1}} & y_{N_{k2}} & L & y_{N_{kk}} \end{bmatrix}_{k\times k} \qquad (5.55)$$

Akım ve gerilim arasındaki ilişki şu şekilde olacaktır:

$$I = Y_N V \qquad (5.56)$$

Ve her birinin değişimi, aşağıdaki ilişkide olduğu gibi bir diğerini etkiler:

$$\Delta I = Y_N \Delta V \qquad (5.57)$$

Ki burada:

$$\Delta V=\begin{bmatrix}\Delta v_1\\ \Delta v_2\\ M\\ \Delta v_k\end{bmatrix},\Delta I=\begin{bmatrix}\Delta I_1\\ \Delta I_2\\ M\\ \Delta I_k\end{bmatrix} \qquad (5.58)$$

Δv_i düğüm noktasında olan gerilim değişimini gösterir. ΔI ise jeneratördeki düğüm noktasından, sisteme enjekte olan akım değişimini gösterir; dolayısıyla ΔI_i 'nin bileşenleri hiç bir jeneratörde bağlı olmayan düğüm noktası ile uyumlu ve sıfır değerinde olacaktır. Diğer bir ifadeyle, eğer N (jeneratör sayısı), K bara sayısından az olursa:

$$\Delta I_i=0,i=N+1,N+2,...,k$$

Her makineye ait dinamik sistem aşağıdaki Denklem 5.59'daki şekildeyse:

$$\dot{x}=Ax \qquad (5.59)$$

Ki burada:

$$A=\begin{bmatrix}a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0\\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0\\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0\\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & 0\\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & a_{65} & a_{66}\end{bmatrix},x=\begin{bmatrix}\Delta\omega\\ \Delta\delta\\ \Delta\psi_{fd}\\ \Delta v_1\\ \Delta v_2\\ \Delta v_s\end{bmatrix} \qquad (5.60)$$

Bu makineler müstakil çalıştıkları sürece birbirlerini etkilemeyeceklerdir. Ama n sayıda makine ağa akım gönderirse, her birinde gerçekleşen bileşen değişikliği, diğer makinelerin bileşenlerini de değiştirebilir. Şimdi, yukarıdaki n jeneratör K baradan oluşan bir ağa akım enjekte edildiğini varsayalım. Bu durumda kontrol sistemi Denklem 5.61 ve 5.62 deki gibi yazılacaktır:

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{x}_1\\ \Delta\dot{x}_2\\ M\\ \Delta\dot{x}_n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_1 & O & O & O\\ O & A_1 & O & O\\ O & O & O & O\\ O & O & O & A_n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta x_1\\ \Delta x_2\\ M\\ \Delta x_n\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}B_1\\ B_2\\ M\\ B_n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta v_1\\ \Delta v_2\\ M\\ \Delta v_k\end{bmatrix} \tag{5.61}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta I_1\\ \Delta I_2\\ M\\ \Delta I_k\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_1 & O & O & O\\ O & C_2 & O & O\\ O & O & O & O\\ O & O & O & C_k\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta x_1\\ \Delta x_2\\ M\\ \Delta x_n\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}Y_1\\ Y_2\\ M\\ Y_k\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta v_1\\ \Delta v_2\\ M\\ \Delta v_k\end{bmatrix} \tag{5.62}$$

Ki burada:

$$B_i=\begin{bmatrix}(b_{11})_i & (b_{12})_i & L & (b_{1k})_i\\ (b_{21})_i & (b_{22})_i & L & (b_{2k})_i\\ M & M & O & M\\ (b_{61})_i & (b_{62})_i & L & (b_{6k})_i\end{bmatrix}_{6\times k} \tag{5.63}$$

$$C_i=\begin{bmatrix}(c_1)_i & (c_2)_i & L & (c_6)_i\end{bmatrix}_{1\times 6} \tag{5.64}$$

$$Y_i=\begin{bmatrix}(y_1)_i & (y_2)_i & \cdots & (y_k)_i\end{bmatrix}_{1\times k} \tag{5.65}$$

Şimdi, ağa ait olan denklemler kulanılarak ΔI , aşağıdaki gibi denklemlerden çıkartılabilir:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}\Delta I_1\\ \Delta I_2\\ \vdots\\ \Delta I_k\end{bmatrix}&=\begin{bmatrix}y_{N_{11}} & y_{N_{12}} & \cdots & y_{N_{1k}}\\ y_{N_{21}} & y_{N_{22}} & \cdots & y_{N_{2k}}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ y_{N_{k1}} & y_{N_{k2}} & \cdots & y_{N_{kk}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta v_1\\ \Delta v_2\\ \vdots\\ \Delta v_k\end{bmatrix}\\ &=\begin{bmatrix}C_1 & O & O & O\\ O & C_1 & O & O\\ O & O & \ddots & O\\ O & O & O & C_k\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta x_1\\ \Delta x_2\\ \vdots\\ \Delta x_n\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}(y_1)_1 & (y_2)_1 & \cdots & (y_k)_1\\ (y_1)_2 & (y_2)_2 & \cdots & (y_k)_2\\ & & \vdots & \\ (y_1)_k & (y_2)_k & \cdots & (y_k)_k\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta v_1\\ \Delta v_2\\ \vdots\\ \Delta v_k\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{5.66}$$

Veya:

$$\begin{bmatrix}\Delta v_1\\ \Delta v_2\\ M\\ \Delta v_k\end{bmatrix}=\left(\begin{bmatrix}y_{N_{11}} & y_{N_{12}} & L & y_{N_{1k}}\\ y_{N_{21}} & y_{N_{22}} & L & y_{N_{2k}}\\ M & M & O & M\\ y_{N_{k1}} & y_{N_{k2}} & L & y_{N_{kk}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}(y_1)_1 & (y_2)_1 & \cdots & (y_k)_1\\ (y_1)_2 & (y_2)_2 & \cdots & (y_k)_2\\ & & M & \\ (y_1)_k & (y_2)_k & \cdots & (y_k)_k\end{bmatrix}\right)^{-1}_{k\times k}\begin{bmatrix}C_1 & O & O & O\\ O & C_1 & O & O\\ O & O & O & O\\ O & O & O & C_n\end{bmatrix}_{k\times 6n}\begin{bmatrix}\Delta x_1\\ \Delta x_2\\ M\\ \Delta x_n\end{bmatrix} \qquad (5.67)$$

ΔV 'i sistem denklemleri de yerleştirildiğinde:

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{x}_1\\ \Delta\dot{x}_2\\ M\\ \Delta\dot{x}_N\end{bmatrix}=$$

$$\left\{\begin{bmatrix}A_1 & O & O & O\\ O & A_1 & O & O\\ O & O & O & O\\ O & O & O & A_n\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}B_1\\ B_2\\ M\\ B_n\end{bmatrix}\left(\begin{bmatrix}y_{N_{11}} & y_{N_{12}} & L & y_{N_{1k}}\\ y_{N_{21}} & y_{N_{22}} & L & y_{N_{2k}}\\ M & M & O & M\\ y_{N_{k1}} & y_{N_{k2}} & L & y_{N_{kk}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}(y_1)_1 & (y_2)_1 & \cdots & (y_k)_1\\ (y_1)_2 & (y_2)_2 & \cdots & (y_k)_2\\ & & M & \\ (y_1)_k & (y_2)_k & \cdots & (y_k)_k\end{bmatrix}\right)^{-1}\begin{bmatrix}C_1 & O & O & O\\ O & C_1 & O & O\\ O & O & O & O\\ O & O & O & C_n\end{bmatrix}\right\}\begin{bmatrix}\Delta x_1\\ \Delta x_2\\ M\\ \Delta x_n\end{bmatrix} \qquad (5.68)$$

ve kapalı formül olarak matris, Denklem 5.69'daki gibi yazılabilir.

$$\Delta\dot{x}=\left\{A_D+B_D\left(Y+Y_N\right)^{-1}C_D\right\}\Delta x \qquad (5.69)$$

Şimdi Denklem 5.69'daki sistem, (I) dinamik sistemine dönüşmüştür. A, sistem matrisi, şöyledir:

$$A=\left\{A_D+B_D\left(Y+Y_N\right)^{-1}C_D\right\} \qquad (5.70)$$

Yukarıdaki dinamik sistem çözüldüğünde, $x(t)$ sistemin vaziyet değişkenleri elde edilir (zamana göre bir fonksiyon). Bu değişkenler aşağıdaki denklemde yerleştirildiğinde, her bir düğümde gerilim değişimleri zamana göre bir fonksiyon olarak yazılabilir ve böylece küçük değişimlerin etkisi, kondisyon değişkenlerinin üzerinde her düğüm için izlenebilir.

$$\Delta V=\left\{\left(Y+Y_N\right)^{-1}C\right\}x \qquad (5.71)$$

Son olarak $\Delta V,x$ aşağıdaki denklemde yerleştirildiğinde:

$$DI=Cx+YDV \tag{5.72}$$

Böylece her jeneratör tarafından ağa enjekte edilen akım değişimleri, zamana göre bir foksiyon olarak görülecektir. Bahsedilen hususu anlatmak için iki jeneratörden oluşan bir ağ düşünüldüğünde, söz konusu iki makinenin dinamiği Denklem 5.73'teki gibi olacaktır:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{x}_1 \\ \Delta\dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & O \\ O & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} \tag{5.73}$$

Veya daha kapsamlı olarak:

$$\begin{bmatrix} (\Delta\dot{\omega})_1 \\ (\Delta\dot{\delta})_1 \\ (\Delta\dot{\psi}_{fd})_1 \\ (\Delta\dot{v}_1)_1 \\ (\Delta\dot{v}_2)_1 \\ (\Delta\dot{v}_s)_1 \\ (\Delta\dot{\omega})_2 \\ (\Delta\dot{\delta})_2 \\ (\Delta\dot{\psi}_{fd})_2 \\ (\Delta\dot{v}_1)_2 \\ (\Delta\dot{v}_2)_2 \\ (\Delta\dot{v}_s)_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_{11})_1 & (a_{12})_1 & (a_{13})_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (a_{21})_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (a_{32})_1 & (a_{33})_1 & (a_{34})_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (a_{42})_1 & (a_{43})_1 & (a_{44})_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (a_{51})_1 & (a_{52})_1 & (a_{53})_1 & 0 & (a_{55})_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (a_{61})_1 & (a_{62})_1 & (a_{63})_1 & 0 & (a_{65})_1 & (a_{66})_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (a_{11})_2 & (a_{12})_2 & (a_{13})_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (a_{21})_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (a_{32})_2 & (a_{33})_2 & (a_{34})_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (a_{42})_2 & (a_{43})_2 & (a_{44})_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (a_{51})_2 & (a_{52})_2 & (a_{53})_2 & 0 & (a_{55})_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (a_{61})_2 & (a_{62})_2 & (a_{63})_2 & 0 & (a_{65})_1 & (a_{66})_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\Delta\omega)_1 \\ (\Delta\delta)_1 \\ (\Delta\psi_{fd})_1 \\ (\Delta v_1)_1 \\ (\Delta v_2)_1 \\ (\Delta v_s)_1 \\ (\Delta\omega)_2 \\ (\Delta\delta)_2 \\ (\Delta\psi_{fd})_2 \\ (\Delta v_1)_2 \\ (\Delta v_2)_2 \\ (\Delta v_s)_2 \end{bmatrix}$$

Ki burada $(a_{ij})_k$ k makinesine ait sistem matrisinin ij'omcu elemanıdır. Bu durumda görüldüğü gibi ağ bileşenleri mevcut olmayınca (yani bara sonsuz olunca), jeneratörler birbirini etkilemez; her birinde gerçekleşen bileşen değişimleri sadece o makinenin bileşenlerini etkiler. Jeneratörler ağa akım enjekte ettiklerinde onların dinamik sistemi, Denklem 5.74 ve 5.75 'deki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{x}_1\\ \Delta\dot{x}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_1 & O\\ O & A_2\end{bmatrix}_{12\times12}\begin{bmatrix}\Delta x_1\\ \Delta x_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}B_1\\ B_2\end{bmatrix}_{12\times k}\Delta V \qquad (5.74)$$

$$\Delta I=\begin{bmatrix}C_1 & O\\ O & C_2\end{bmatrix}_{k\times12}\begin{bmatrix}\Delta x_1\\ \Delta x_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}Y_1\\ Y_2\end{bmatrix}_{k\times k}\Delta V \qquad (5.75)$$

Sistemin ağa elektrik gücü gönderen birçok sayıda senkron makineden oluştuğu varsayıldığında, her makine için dinamik sistem Denklem 5.76'daki gibi yazılır.

$$\begin{cases}\dot{x}_i=A_i x_i+B_i\Delta v\\ \Delta I_i=C_i x_i+Y_i\Delta v\end{cases},\ i=1,2,...,n \qquad (5.76)$$

Bu durumda tüm ağ için dinamik sistem Denklem 5.77'deki gibi olacaktır:

$$\begin{cases}\dot{x}=A_D x+B_D\Delta v\\ \Delta I=C_D x-Y_D\Delta v\end{cases} \qquad (5.77)$$

$$A_D=\begin{bmatrix}A_1 & O & O & O\\ O & A_1 & O & O\\ O & O & O & O\\ O & O & O & A_n\end{bmatrix}=\text{diag}\{A_1,A_2,...,A_n\} \qquad (5.78)$$

$$C_D=\begin{bmatrix}C_1 & O & O & O\\ O & C_1 & O & O\\ O & O & O & O\\ O & O & O & C_n\end{bmatrix}=\text{diag}\{C_1,C_2,...,C_n\} \qquad (5.79)$$

Ki burada A_i (5.60)'da, B_i (5.63c)'de, C_i (5.64d)'da, Y_i (5.65e)'de, x (5.60)'de ve $\Delta I,\Delta V$ Denklem 5.58b'de tanıtılmıştır. Ayrıca, Denklem 5.57a kullanılarak şöyle yazılabilir:

$$\Delta I=Y_N\Delta v$$

Ağın denkleminde olan $Y_N\Delta v$ 'yi ikinci denklemde olan ΔI yerine koyarsak:

$$Y_N \Delta v = C_D x - Y_D \Delta v \rightarrow \left(Y_N + Y_D\right)\Delta v = C_D x$$

Ya da:

$$\Delta v = \left(Y_N + Y_D\right)^{-1} C_D x \qquad (5.80)$$

Gösterilen son ilişki birinci denklemde yerleştirildiğinde:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A_D x + B_D \Delta v \\ &= A_D x + B_D \left(Y_N + Y_D\right)^{-1} C_D x \\ &= \left\{A_D + B_D \left(Y_N + Y_D\right)^{-1} C_D\right\} x \end{aligned} \qquad (5.81)$$

Ki burada:

$$A = \left\{A_D + B_D \left(Y_N + Y_D\right)^{-1} C_D\right\} \qquad (5.82)$$

Böylelikle yukarıdaki durumun matrisine ait ana veriler, sistemin vaziyetini belirleyecektir. Genelde bu matris büyük seyrek matrisidir ve ana verilerini bulmak zordur. Genelde rakamsal yöntemlerle bu matrisin miktarları tahmin edilir.

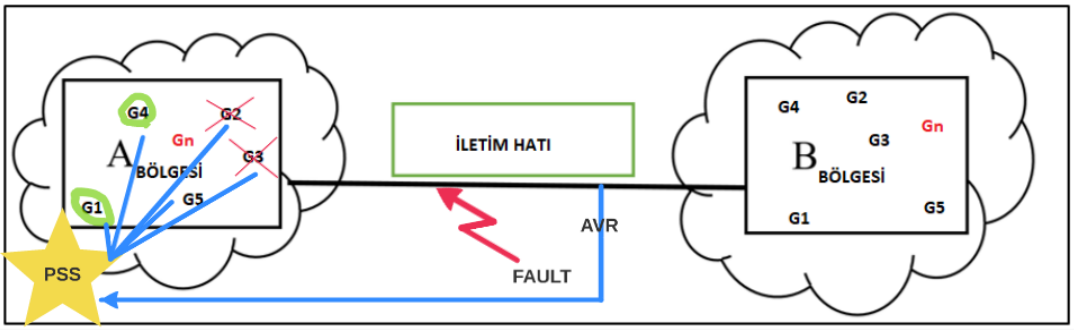
Eşitlik 5.82'de verilen A matrisi sistem hakkında Sistemin dinamiklerini etkileyen durumlar yani ani yük değişimleri, senkron jeneratörlerinin anı şekilde devre dışı kalması veya devreye girmesi gibi meydana gelen arızaları belirlemektedir. Örneğin sistemin hangi değişimlerle kararlı kalacağı, hangi girdilerin sistemi kararsız yapacağı birçok sorunun cevaplanması mümkündür. Açıkça görülmektedir ki, A büyük bir matris olup, n jeneratör ve k bara için bir $6n \times 6n$ matris olacaktır. Bunun ana verilerini bulmak özellikle de n değerinin büyük bir rakam olduğu durumlarda çok zor olacaktır. Örneğin 100 adet jeneratör barındıran bir sistemin kararlılık incelemesi için 600×600'lük bir matrisin ana verileri bulunmalıdır. Bununla birlikte sistemdeki bara sayısının fazla olması problemin hızlı çözülmesine etkisi yoktur. Yukarıda da belirtildiği üzere güç sistemlerinde Küçük Sinyal Kararlılığını incelemek için sistemde mevcut olan bara sayısı güç sistemi üzerine doğrudan bir etkisi olmayacaktır. Bu durum IEEE de ki mevcut standartlarına uygun olmayan her hangi bir bara

seçiminde ise sistemin kararlılığını bozmayacağını göstermektedir. Bununla birlikte güç sistemlerinde bara sayısının artması mevcut güç sisteminin dinamiklerini etkilemeyecektir. Yani, A matrisi, bara sayısına bağlı olmaksızın yine $6n \times 6n$ büyüklüğüne sahip olacaktır. Ancak, bara sayısının A matrisinin elemanlarına etkisi vardır ve matrisin sadece boyutunu değiştirir. Böylelikle Küçük Sinyal Kararlılığını yapmak için sistemin bara sayısı değil, güç sisteminin dinamiklerini etkileyen bileşenleri incelenmesi gerekmektedir. Sistemin dinamiklerini etkileyen durumlar yani ani yük değişimleri, senkron jeneratörlerinin anı şekilde devre dışı kalması veya devreye girmesi gibi meydana gelen arızalardır. Buna en güzel örnek yerel bir bölgede kurulu olan rüzgar ve güneş enerjisi santralleri gibi düşük güçlü santrallerdir. Bu santraller yerel modda çalıştırılan santraller olarak da adlandırılabilir. Bu santraller Küçük Sinyal Kararlılığı konusu içerisinde bir senkron jeneratör ve ona bağlı bir sonsuz bara ile modellenir (SMIB).
Yerel modlar 4 gruptan oluşmaktadır.

a. Senkron Jeneratör rotor açı değişimi.
b. Birbirine yakın olan jeneratörlere ait rotor açı değişimi.
c. Uyartım sistemi, HVDC hatları ve reaktif güç kompanzasyonu gibi kısımlardakı elektriksel parametrelerin değişimi.
d. Buhar türbinlerinde meydana gelen dönen parçaların açı değişimleri.

Diğer bir mod ise Bölgeler arası moddur. Bu modda ise güç sisteminin bir bölgesinde bulunan birkaç jeneratör arızaya maruz kaldığı zaman diğer bölgedeki jeneratörlere göre zıt yönde dalgalanabilmektedir. Bu durum, iki grup jeneratörün zayıf bir hatla bağlanmasından kaynaklanır. Bu dalgalanmaların frekansı 0.2-1 Hz arasındadır. Bölgesel ve kapsamlı modlar günümüzün en modern modları olup, güç sistemlerinin kararlılık çalışmalarında incelenir. Çünkü modern güç sistemleri doğrudan birbirlerine bağlıdırlar, ancak bağlantı hatları genelde eskidir ve yüksek maliyetlerinden ötürü hatların yenilenmesinden kaçınılır. Yeni santraller inşa edilmesine rağmen bu santrallerin zayıf hatlar üzerinden güç sistemlerine bağlanması sebebiyle sıklıkla bölgeler arası dalgalanmalar meydana gelir. Günümüzdeki birçok PSS çalışması güç sistemlerine odaklıdır. PSS sisteminin yerel sinyalleri kullanmaması gerekir. Ancak diğer bölgelerin sinyallerini giriş sinyali olarak kullanabilir. Bu durumda da diğer bölgelerden sinyal yollandığında bir gecikme meydana gelebilir ve bu gecikme de Küçük Sinyal Kararlılığını bozabilir. Bu konu büyük önem arz ettiğinden PSS çalışmalarında mutlaka incelenmelidir. Şekil 5.15'te görüldüğü gibi güç Sisteminde Küçük

Sinyal Kararlılığını etki altında bırakan ve sistemin dinamiklerini bozan iletim hatının kopması senkron jeneratörlerinin devre dışı kalması veya ani bir şekilde devreye girmesidir.



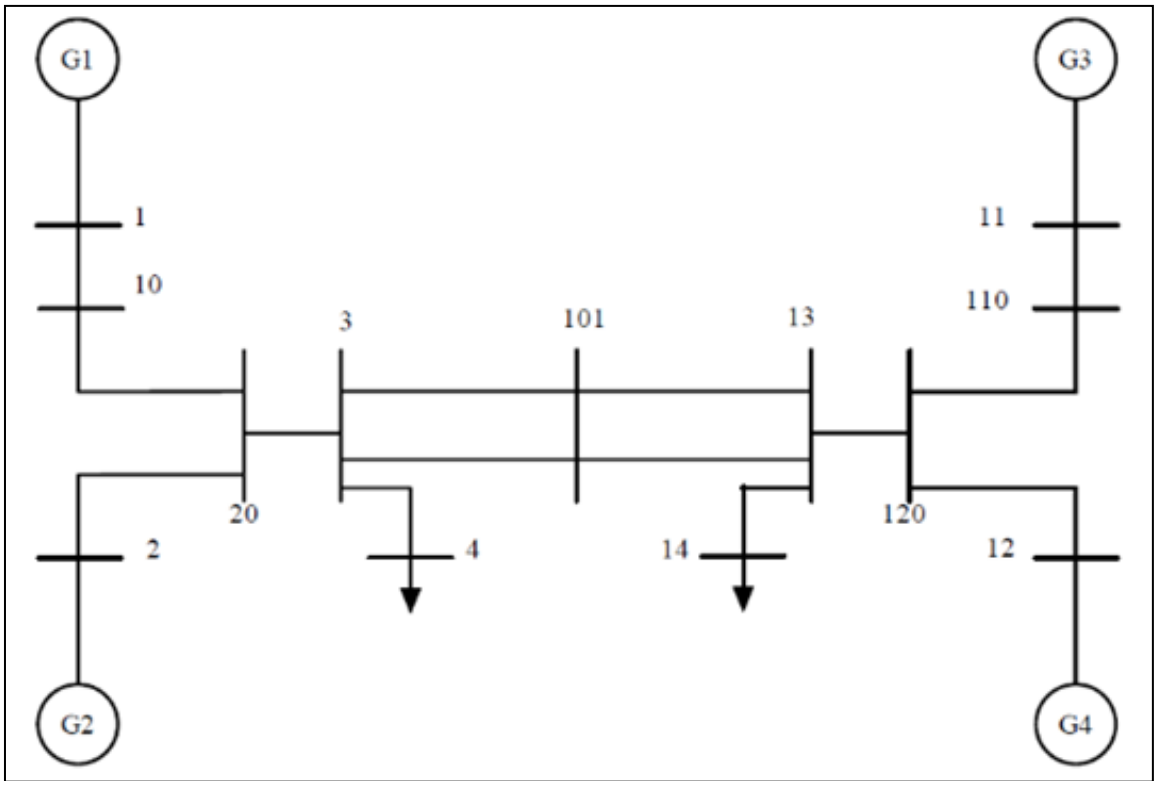
Şekil 5.15. Güç sisteminin küçük sinyal topolojisi

Senaryo 1: Standart IEEE bara sisteminde Küçük Sinyal Kararlılığının incelenmesi

1. Mevcut IEEE de bulunan standart bara sisteminde önce güç akış analizi yapılmıştır.
2. Sistemin standart bara sisteminde Küçük Sinyal Kararlılığı incelenmiştir.
3. Mevcut standart bara sistemnde senkron jeneratörlerde ve sistemde mevcut olan yükler, sistem dinamiklerinde değişiklik yapılmadan sistemin bara sayısını artırarak Küçük Sinyal Kararlılığının incelenmesi gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak Küçük Sinyal Kararlılığının sistemde bara sayısı ile doğrusal ilişkisinin olmadığı ve sistemin kararlılığını etkilemiyeceği gözlemlenmiştir.

Bu kapsamda Şekil 5.16'daki gibi güç sisteminin mevcut IEEE de bulunan standart bara ile Küçük Sinyal Kararlılığının analizi yapılmıştır. Mevcut sistem "KUNDUR" tarafından dört adet senkron jenratör ve iki bölge olarak ayrılmış ve analiz edilmiştir (Kundur, 1994).



Şekil 5.16. İki bölgeli standart IEEE güç sisteminin tek hat şeması

Sistemin verilleri MVA baz değeri:100 MVA.

Ferekans: 50 Hz

Referans senkron jeneratör: G1

Şekil 5.16'daki güç sisteminin yük akış analizlerinden 5.17. ve 5.18'deki sonuçlar elde edilir.

LOAD-FLOW

Çizelge 5.2. Güç akış tablosu

REPORT OF POWER FLOW CALCULATIONS						
SWING BUS : BUS 1						
NUMBER OF ITERATIONS : 3						
SOLUTION TIME : 0.021 sec.						
TOTAL TIME : 0.038 sec.						
TOTAL REAL POWER LOSSES : 0.851066.						
TOTAL REACTIVE POWER LOSSES: 13.0914.						
			GENERATION		LOAD	
BUS	VOLTS	ANGLE	REAL	REACTIVE	REAL	REACTIVE
1.0000	1.0100	18.5000	7.2611	1.2712	0	0
2.0000	1.0100	7.7249	7.0000	1.9420	0	0
3.0000	0.9791	-7.4406	0	0	0.0000	0.0000
4.0000	0.9980	-10.2317	0	0	9.7600	1.0000

Çizelge 5.2. (devam) Güç akış tablosu

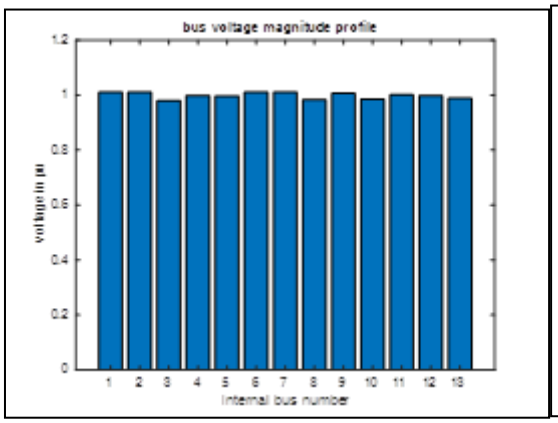
10.0000	0.9962	11.5783	0	0	0	0
11.0000	1.0100	-9.0125	7.0000	1.1342	0	0
12.0000	1.0100	-19.1203	7.0000	1.7631	0	0
13.0000	0.9833	-34.0630	0	0	0.0000	0.0000
14.0000	1.0062	-39.0204	0	0	17.6500	1.0000
20.0000	0.9847	0.9748	0	0	-0.0000	0.0000
101.0000	1.0003	-21.0539	0	0	0	0
110.0000	0.9980	-15.6725	0	0	0.0000	-0.0000
120.0000	0.9877	-25.8502	0	0	0	0

LINE FLOWS

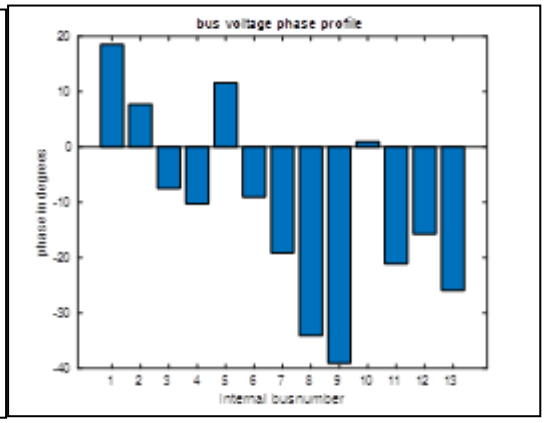
LINE	FROM BUS	TO BUS	REAL	REACTIVE
1.0000	1.0000	10.0000	7.2611	1.2712
2.0000	2.0000	20.0000	7.0000	1.9420
3.0000	3.0000	4.0000	9.7600	1.4832
4.0000	3.0000	20.0000	-13.9220	1.8714
5.0000	3.0000	101.0000	2.0810	-0.2394
6.0000	3.0000	101.0000	2.0810	-0.2394
7.0000	10.0000	20.0000	7.2611	0.3816
8.0000	11.0000	110.0000	7.0000	1.1342
9.0000	12.0000	120.0000	7.0000	1.7631
10.0000	13.0000	101.0000	-1.9853	0.1825
11.0000	13.0000	101.0000	-1.9853	0.1825
12.0000	13.0000	14.0000	17.6500	2.5435
13.0000	13.0000	120.0000	-13.6793	1.9259
14.0000	110.0000	120.0000	7.0000	0.3109
1.0000	10.0000	1.0000	-7.2611	-0.3816
2.0000	20.0000	2.0000	-7.0000	-1.0781
3.0000	4.0000	3.0000	-9.7600	-1.0000
4.0000	20.0000	3.0000	14.1279	0.1704
5.0000	101.0000	3.0000	-2.0310	0.5502
6.0000	101.0000	3.0000	-2.0310	0.5502
7.0000	20.0000	10.0000	-7.1279	0.9077
8.0000	110.0000	11.0000	-7.0000	-0.3109
9.0000	120.0000	12.0000	-7.0000	-0.9100
10.0000	101.0000	13.0000	2.0310	0.0852
11.0000	101.0000	13.0000	2.0310	0.0852
12.0000	14.0000	13.0000	-17.6500	-1.0000
13.0000	120.0000	13.0000	13.8767	0.0312
14.0000	120.0000	110.0000	-6.8767	0.8787

Şekil. 5.17 ve Şekil 5.18 sırası ile güç sistemindeki mevcut olan tüm baraların gerilim seviyelerini ve faz açılarını göstermektedir. Gerilim seviyesi 1 pu değerini geçmemiş ve sistem kararlı bir şekilde çalışmaktadır. Aktif ve reaktif güç kontrolu sağlanmıştır. Baralara ait gerilimlerin fazları ise Şekil 5.18'de her baraya ait baraların faz açıları verilmiştir. Sistemde 13 adet bara bulunmaktadır 1.bara açısı 20 derece ve 9.bara ise -40 derece civarındadır farklı bara açıları olmasına rağmen gerilim kararlılığı hiç bir şekilde

bozulmamıştır. Çünkü sistem dinamiklerini etkileyen ani yük değişimleri, senkron jeneratörlerinin anı şekilde devre dışı kalması veya devreye girmesi durumlar oluşmamıştır.

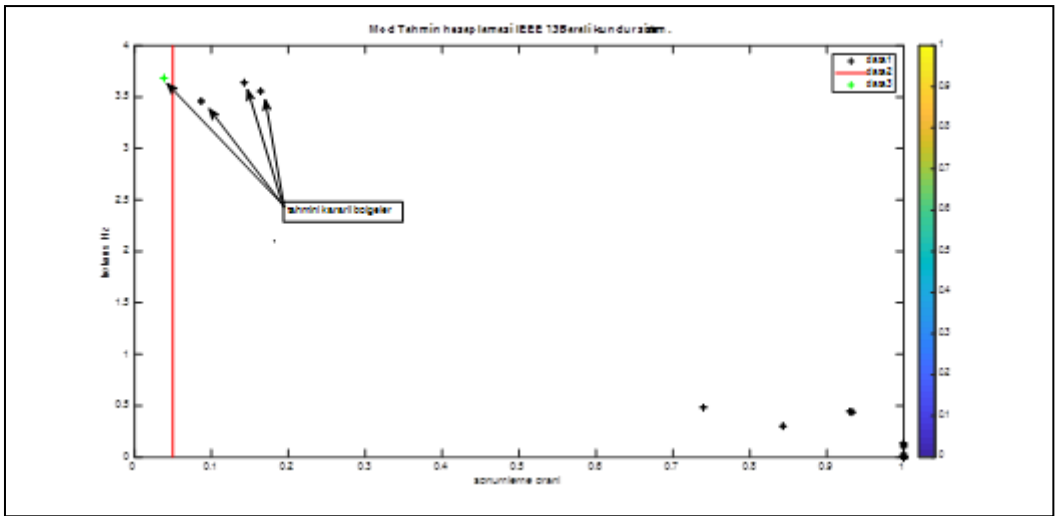


Şekil 5.17. Mevcut baralardaki gerilim



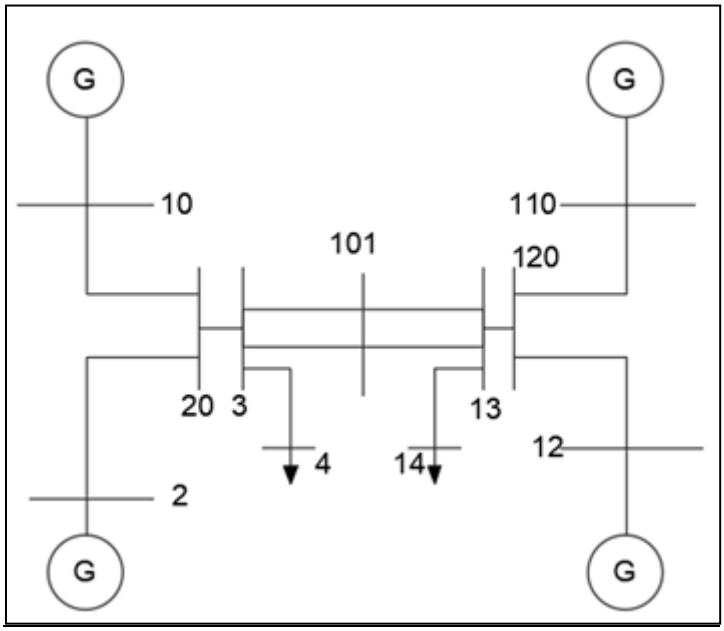
Şekil 5.18. Mevcut baralardaki faz ölçümleri

Görüldüğü gibi Şekil 5.19'daki Güç sisteminde kararsızlığa sebebiyet veren tahmini bölgeler gösterilmektedir. Şekil 5.16'daki güç sistemi doğrudan kararlıdır. Yanlız sistemde Küçük Sinyal Kararlılığını etkiliyen bazı karasızlığa neden olan modlar bulunmaktadır. Şekilde x ekseni sistemin sönümleyici katsayısını ve y ekseni ise sistemin frekansını göstermektedir. Şekil 5.19'daki kırmızı çizgi kararlılık sınır bölgesini göstermekte olup yeşil renkteki artı işareti ise kararsızlığa götürecek mod tahmini gözlenmektedir.



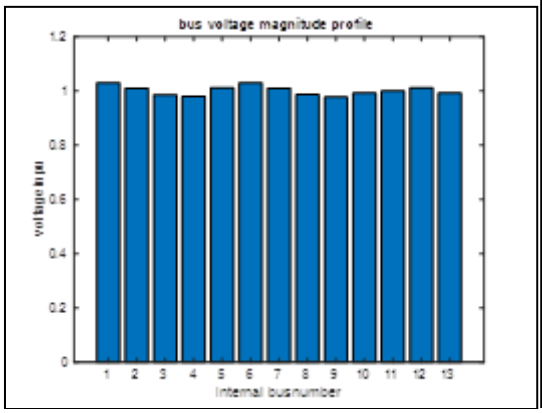
Şekil 5.19. Güç sistemindeki kararsızlığa sebebiyet veren tahmini bölgeler

Senaryo 2: IEEE Standartlarına uygun olmayan bara sisteminde Küçük Sinyal Kararlılığının incelenmesi

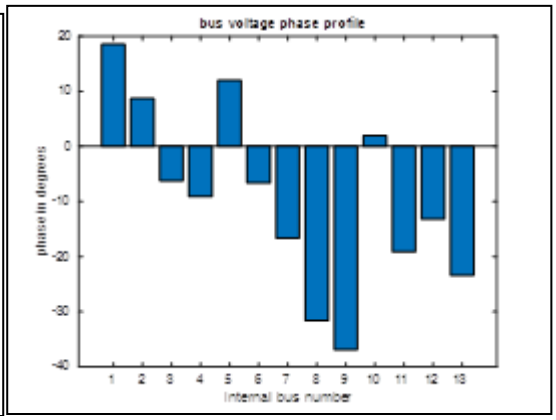


Şekil 5.20. 11 baralı güç sistemi

Bara 1 ve bara 11 güç sisteminden çıkarıldığı zaman, güç sisteminde yapılan yük akışı analiz sonrası tüm baralardaki gerilimler ve fazlar Şekil 5.21 ve 5.22'deki gibi olacaktır. Şekillerden anlaşılacağı gibi sistemde bara sayısının azalması ve ya artması ile sistemde sadece mevcut geriye kalan baraların gerilim seviyelerinin çok az toleransda değişimi görülmüştür ve sistemde bara gerilimleri ±1 pu'e sabitlenmiştir.

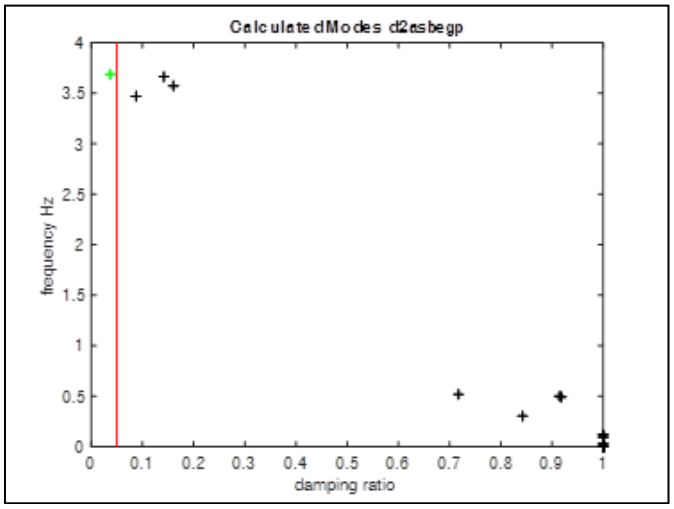


Şekil 5.21. Mevcut baralardaki gerilim



Şekil 5.22. Mevcut baralardaki faz ölçümleri

Şekil 5.23'te güç sisteminde kararsızlığa sebeb olan tahmini bölgeler gösterilmektedir. Şekil 5.23'teki gibi sistemde herhangi bir Sistemin dinamiklerini etkileyen durumlar yani ani yük değişimleri, senkron jeneratörlerinin anı şekilde devre dışı kalması veya devreye girmesi gibi meydana gelen arızalarda ve ya ana verilerinde değişim yapılmadığı takdirde sistemin dinamik kararlılığını etkilemedği anlaşılmaktadır. Aksi taktirde her iki sistemde yani IEEE bara standartlarına uyumlu olan ve uyumsuz olan sistemin herhangi bir dinamiğini bozan durumlara maruz kaldığı taktirde sistemin de Küçük Sinyal Kararlılığını bozmuş olacaktır.

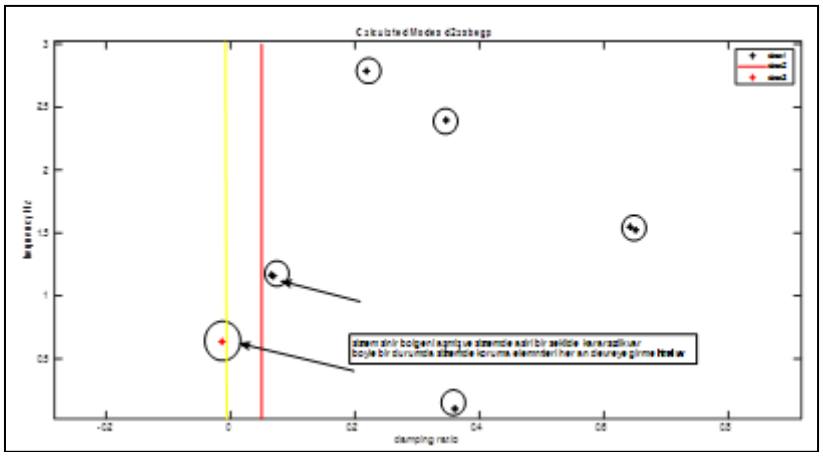


Şekil 5.23. Güç sistemindeki kararsızlığa sebebiyet veren mod tahmini bölgeler

Örneğin mevcut güç sisteminin dinamiğini bozan PSS devresi senkron jeneratör üzerinden devre dışı bırakıldığı zaman Şekil 5.25'teki gibi sistemin kararsız olduğu gözlenmiştir. PSS sistemine ait MATLAB kodları 5.24'deki gibidir.

```
% power system stabilizer model
%    col1    type 1 speed input; 2 power input
%    col2    generator number
%    col3    pssgain*washout time constant
%    col4    washout time constant
%    col5    first lead time constant
%    col6    first lag time constant
%    col7    second lead time constant
%    col8    second lag time constant
%    col9    maximum output limit
%    col10   minimum output limit
pss_con = [...
     %1  1  100  10 0.05 0.01 0.05 0.01 0.2 -0.05;
     %1  2  100  10 0.05 0.01 0.05 0.01 0.2 -0.05;
     %1  3  100  10 0.05 0.01 0.05 0.01 0.2 -0.05;
     %1  4  100  10 0.05 0.01 0.05 0.01 0.2 -0.05];
%pss_c
```

Şekil 5.24. PSS sistem bloğu MATLAB kodları



Şekil 5.25. Güç sistemindeki PSS içermeyen ve kararsızlığa sebebiyet veren bölgeler

5.6. Güç Yöntemi

bu yöntem eğer yakınsak olursa, sadece en büyük ana verilerini, ve ters güç yöntemiyse en küçük ana verileri, mutlak büyüklük açısından, elde edecektir. Aslında bazı yöntemlerle ana verilerin yerleri değiştirilerek diğer ana veriler bulunabilir, ancak genel olarak bu yöntemlerde yakınsama yavaş bir şekilde meydana gelir.

6. HOUSEHOLDER YÖNTEMİ İLE GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ İNCELENMESİ

Büyük bir A matrisini ayrıştırdığımız zaman iki adet Q-R matrisi elde etmiş oluruz Householder Yöntemi kullanarak elde etiğimiz Q-R matrislerinin çözümüne adım adım yaklaşabileceğiz aslında her Householder dönüşümü kullanarak bulunan A matrisinde sütünlarda tek tek sıfır üretme yerine birer tane sıfır değerinde sütün üretmiş olacağız ve böylelikle üçgen bir matrisi elde etmiş olacağız. Householder dönüşüm yöntemi Q-R matrisinin çözümünü hızlandıracaktır. Lineer edilmiş çok değişkenli çok büyük bir sistemin matrisinin çözümünde çok hızlı bir şekilde sonuç elde edilmiş olacaktır.

6.1. Homolog Dönüşümler ve QR Algoritması

Birçok yöntem ortogonal benzerlik üzerine yapılanmıştır. Eğer iki matris homolog olursa, bu matrisler aynı ana miktarlara sahip olmalarının yanı sıra aynı polinoma da sahip olduklarından Denklem 6.1'deki gibi olacaktır.

$$A=P^{-1}BP \Rightarrow A \sim B \tag{6.1}$$

Burada sembolü homologluğu göstermek için kullanılmıştır. Şayet yukarıdaki P matrisi de ortogonal oluırsa, bu durumda terslik yerine Denklem 6.2'teki gibi transpoze kullanılabilir.

$$A=Q^{T}BQ \Rightarrow A \sim B, Q^{-1}=Q^{T} \tag{6.2}$$

A matirisinin QR gibi ayrıştırıldığı varsayıldığında (Q ortogonal bir matris ve R yukarı üçgen bir matristir).

$$\begin{aligned} &A_0=A \\ &A_k=Q_kR_k \Rightarrow A_{k+1}=R_kQ_k \Rightarrow A_k=Q_k^{T}\left(Q_kR_k\right)Q_k=R_kQ_k=A_{k+1} \\ &A_k \sim A_{k+1} \end{aligned} \tag{6.3}$$

Denklem 6.4'teki algoritma, bir dizi ortogonal matrisin üretimini sağlar ki buna QR algoritması denilir. Sonuç olarak, yukarı üçgen R matrisi ana miktarlı matrise doğru ve

Q'dan üretilen çarpma sonuçlarıysa ana vektörleri olan matrise doğru yakınsama gösterir. Yani:

$$A_{k+1}=Q_kQ_{k-1}...Q_0R_kQ_0^TQ_1^T...Q_k^T \rightarrow V\Lambda V^{-1} \tag{6.4}$$

6.2. Householder Yöntemi ile Güç Sistemlerinde Küçük Sinyal Kararlılığı

Eğer u birim vektörü olursa, H_u, Householder Matrisi Denklem 6.5'de görüleceği üzere şu şekilde tanımlanır:

$$H_u=I-2uu^T \ , \ u^Tu=1 \tag{6.5}$$

Ki burada I, birim matrisidir. H_u'nun ortogonal ve simetrik olması açıktır çünkü:

$$\begin{aligned} H_u^T &= \left(I-2uu^T\right)^T \\ &= \left(I-2uu^T\right) \\ &= H_u \end{aligned} \tag{6.6}$$

$$\begin{aligned} H_u^2 &= \left(I-2uu^T\right)\left(I-2uu^T\right) \\ &= I-2uu^T-2uu^T+4u\left(u^Tu\right)u^T \\ &= I \end{aligned} \tag{6.7}$$

Eğer A, $n\times n$ bir matris ise o halde B, yani Householder dönüşümü yoluyla, A'nın dönüşümü Denklem 6.8'deki gibi olacaktır.

$$B=H_uAH_u \tag{6.8}$$

Householder dönüşümünün bir homolog ortogonal dönüşüm olması nettir. u vektörünün uygun seçimiyle bir sütunda çok sayıda sıfır üretmek mümkündür. Eğer a_{ij} A matrisinin ij 'omcu elemanı olursa, o zaman u vektörünün seçimi aşağıdaki denklemler gibi olacaktır:

$$u=\frac{1}{\sqrt{2\eta\left(\left|a_{ij}\right|-\eta\right)}}\left[0 \quad 0 \quad L \quad 0 \quad a_{ij}\pm\eta \quad a_{i+1j} \quad L \quad a_{n-1j} \quad a_{nj}\right]^T \tag{6.9}$$

$$Col_j(A)=\left[a_{1j} \quad a_{2j} \quad L \quad a_{i-1j} \quad a_{ij} \quad a_{i+1j} \quad L \quad a_{n-1j} \quad a_{nj}\right]^T \tag{6.10}$$

$$\eta=\sqrt{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}^2} \tag{6.11}$$

Bu seçimle, H_uA matrisinin j'omcu sütunu Denklem 6.12'teki gibi olur:

$$Col_j(H_uA)=\left[a_{1j} \quad a_{2j} \quad L \quad a_{i-1j} \quad -(\pm\eta) \quad 0 \quad L \quad 0 \quad 0\right]^T \tag{6.12}$$

Üretilmiş olan H_u matrisi, H_{u_j} ile gösterilirse:

$$R=H_{u_n}\left(H_{u_{n-1}}...\left(H_{u_1}A\right)\right)=QA \Rightarrow A=QR \tag{6.13}$$

$$Q=H_{u_n}H_{u_{n-1}}...H_{u_1} \tag{6.14}$$

Böylelikle A matrisi QR'a ayrıştırılmıştır. Eğer $2\eta\left(\left|a_{ij}\right|-\eta\right)$ ibaresi sıfır olursa, u'nun tanımlanma imkanı olmayacaktır. Dolayısıyla A matrisi, QR algoritmasıyla ortogonal bir şekilde yukarı üçgen bir matrise homolog yapılamaz. Bu durumda, söz konusu matris bir önceki Hasenberg Matrisiyle ortogonal bir şekilde homolog yapılır. Sonuç olarak, A matrisinin ana verileri yerine Hasenberg Matrisi'nin ana verileri bulunur. Bu konuda iki ünlü varsayım mevcuttur:

1) Her bir $n\times n$ matrisi, bir Hasenberg Matrisi'yle ortogonal bir şekilde homolog yapılmıştır.
2) Householder dönüşümü yoluyla ortaya çıkan simetrik matrisler, bir üç-diyagonal simetrik matrisidir.

6.3. MATLAB'da Uygulama

Fonksiyon içeren dinamik ve kontol sistemlerini MATLAB'da incelemenin fazla sayıda yararı olacaktır. MATLAB'da kullanılan bazı komutlar şöyledir:

ss fonksiyonu:

Bu fonksiyon A,B,C,D matrislerini kullanarak dördüncü sistemi üretir:

$$\mathrm{SYS1=ss(A,B,C,D)}$$

lsim fonksiyonu:

Bu fonksiyon, icat olmuş dinamik ve kontrol sistemini ss komutuyla simüle eder:

$$\mathrm{y=lsim(SYS1,u,t,x^0)}$$

Ki burada, x^0 kondisyon değişkenlerinin ilk miktarlarıdır. t, zamanın ayrıt vektörü; u ise güç fonksiyonunun ayrıt vektörüdür.

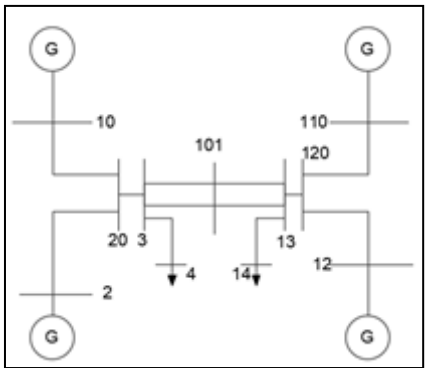
eig fonksiyonu:

Bu fonksiyon, bir matrisin özel miktarlarını ve özel vektörlerini, ortogonal dönüşüm (Havs-Holder) yöntemiyle bulur.

$$\mathrm{[V,L]=eig(A)}$$

6.4. Modelleme ve Sistem Analizi

Şekil 6.1'deki 4 jeneratör tarafından akım enjekte edilen 11 baralı bir ağ düşünüldüğünde sönümlendirici katsayısı farkıyla $\mathrm{A_D}$ matrisi, aşağıda görüleceği üzere bir 24×24 diyagonel bloklu matris olacaktır.



Şekil 6.1. 20 baralı güç sistemi

$$A_D=\begin{bmatrix} A_1 & O & O & O \\ O & A_2 & O & O \\ O & O & A_3 & O \\ O & O & O & A_4 \end{bmatrix}=\text{diag}\{A_1,A_2,A_3,A_4\}$$

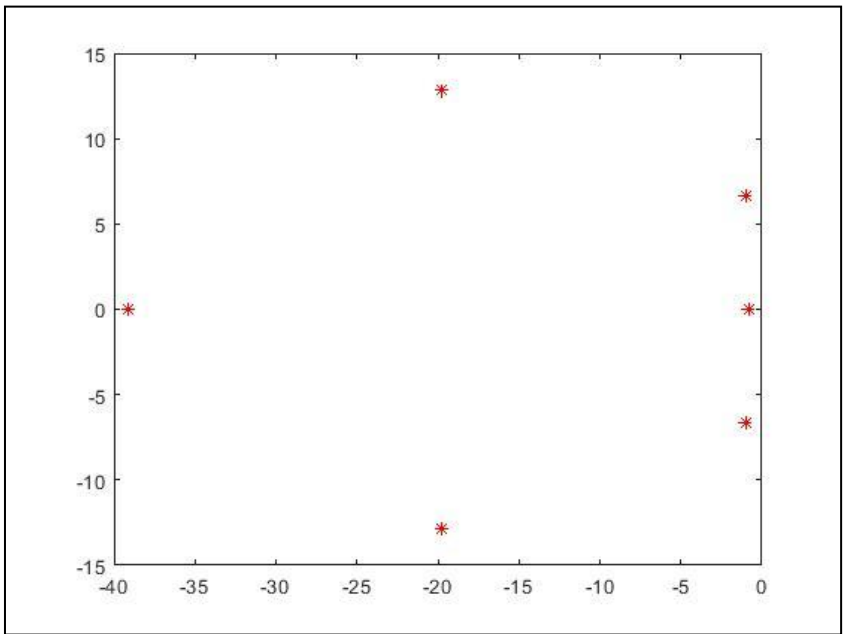
Aynı şekilde, ağın edmitans matrisi (Y_N) ve jeneratörlere ait edmitans (Y_D) bir 20×20 matris olacaktır. Eğer aynı zamanda 20×24 (B_D) matrisi ve 20×24 (C_D) matrisi de mevcut olursa, aşağıdaki ilişkiden sistemin matrisi bulunabilir B_D, C_D matrisinin mevcut olması yani senkron jeneratörünü tüm harici ekipmanları uyartım sistemi PSS sistemi varsa SMIB sisteminde AVR ve... vb ile düşünüldüğünde

$$A=\left\{A_D+B_D\left(Y_N+Y_D\right)^{-1}C_D\right\}$$

Aşağıdaki program yoluyla sistem matrisinin ana verilerini bulmak mümkündür. Bunun yanı sıra parametrelerde olan her değişime sistemin yanıtı çizilebilir ve her bir arızadan sonra bütün jeneratörlerin çıkış akımı izlenebilir. Buna ilaveten, parametrelerin değişim aralığı sistemin kararlı kalması üzerine belirlenip en uygun mod seçilebilir.

Yukarıdaki matrislerin program içinde yazılmış olan miktarları için sistem matrisinin ana verileri şu şekilde elde edilir eğer ki kararlaştırıcı kat sayısını artırırsak sistemde kararlılık ve kararsızlık oranını kompleks sayfada daha da iyi bir şekilde izleyebileceğiz ve sistemin Mod tahmini daha kolay sağlanacaktır. Şekil 6.2'de amaç birinci ve üçüncü senkron jeneratörlerde sıra ile 5^o ve 3^o sapmaları tahmin etmektir. $(\Delta\delta)_1=5^o,(\Delta\delta)_3=3^o,(\Delta\delta)_2=(\Delta\delta)_4=0$

Şekil 6.2'de görüldüğü gibi matris çözümlerinden elde edilen landa miktarları Çizelge 6.1'deki gibi Sistem matrisinin Ana verilerine ait reel kısımlar hepsi negatif tir ve sistem kararlılığını beş ve 3 derece sapma ile korumuştur ama ele alınan tahminlerde küçük meydane gelen arızalarda sınır kararlılığı hala gözükmektedir ama rotor açılarının sapmasını da sağlaya bilmiştir ve oluşan arızaları giderebilmiş olup diğer senkron jeneratörleri etki altında bırakmamıştır.



Şekil 6.2. Karmaşık yüzeyde 24'üncü ana verilerinin konumu

Çizelge 6.1. Sistem matrisinin Ana verilerine ait reel ve imajiner kısımlar

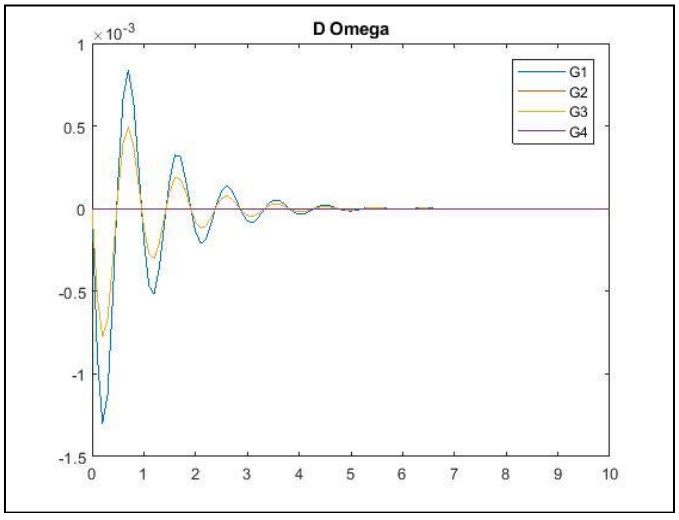
	Real Part	Imaginary Part
Landa1	-39.0967416	+0.000000000000000i
Landa2	-1.00550148	+6.607284341444071i
Landa3	-1.00550148	-6.607284341444071i
Landa4	-0.738513482	+0.000000000000000i
Landa5	-19.79697098	+12.822376834424755i
Landa6	-19.79697098	-12.822376834424755i
Landa7	-39.0967416	+0.000000000000000i
Landa8	-1.00550148	+6.607284341444071i
Landa9	-1.00550148	-6.607284341444071i
Landa10	-0.738513482	+0.000000000000000i
Landa11	-19.79697098	+12.822376834424755i
Landa12	-19.79697098	-12.822376834424755i
Landa13	-39.0967416	+0.000000000000000i
Landa14	-1.00550148	+6.607284341444071i
Landa15	-1.00550148	-6.607284341444071i
Landa16	-0.738513482	+0.000000000000000i
Landa17	-19.79697098	+12.822376834424755i
Landa18	-19.79697098	-12.822376834424755i

Çizelge 6.1. (devam) Sistem matrisinin Ana verilerine ait reel ve imajiner kısımlar

	Real Part	Imaginary Part
Landa19	-39.0967416	+0.000000000000000i
Landa20	-1.00550148	+6.607284341444071i
Landa21	-1.00550148	-6.607284341444071i
Landa22	-0.738513482	+0.000000000000000i
Landa23	-19.79697098	+12.822376834424755i
Landa24	-19.79697098	-12.822376834424755i

Şekiller 6.3-6.14'de dört jeneratörün farklı KD ana verilerine göre -200 ≤ 0 ≤ +200 aralığındakı kararlılık sınır noktalarının incelenmesi ve mod tahminleri verilmiştir.

Şekil 6.3'teki ana verilerin gerçek kısmı tamamen negatiftir, dolayısıyla sistem kararlıdır ve her bir küçük arıza kısa zaman geçtikten sonra kararlı duruma geri dönmektedir. Aşağıdaki şekiller, her jeneratöre ait kondisyon değişkenlerinin, birinci jeneratörde rotor açısının 5 derece ve üçüncü jeneratörde rotor açısının 3 derece sapmasıyla, değişim diyagramlarını ve diğer değişkenlerin nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekil 6.3'de dört jeneratörün $(\Delta\delta)_1 = 5^o, (\Delta\delta)_3 = 3^o, (\Delta\delta)_2 = (\Delta\delta)_4 = 0$ olunca $\Delta\omega$ değişimleri grafiği verilmiştir.

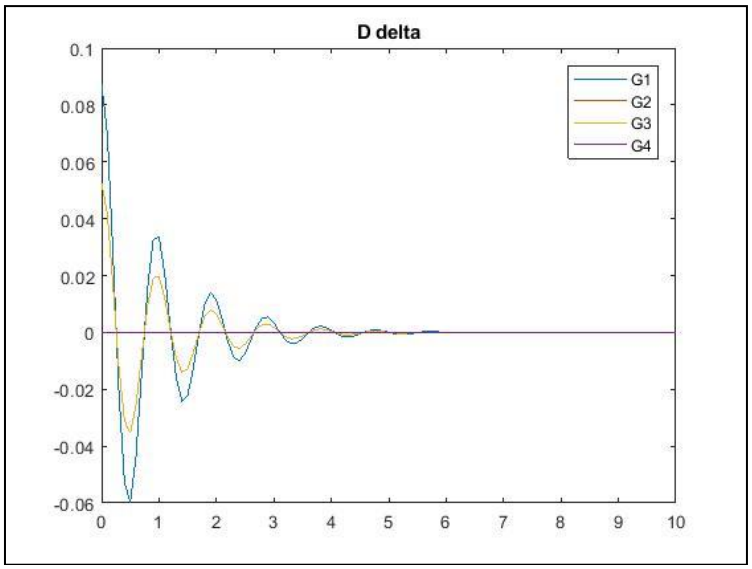


Şekil 6.3. Güç sistemindeki jeneratörlerin sönümleyici momentum $\Delta\omega$ kararlılığı

Şekil 6.4'te Güç sisteminin jeneratörlerinde sönümleyici momentum $\Delta\omega$ kararlılık grafiği gösterilmektedir. Rotor açısının kararlılığı, bir güç sisteminde bulunan birbirine bağlı senkron makinelerin, kendilerini senkron modunda tutma gücüdür. Genel olarak, jeneratörler tarafından beslenen toplam aktif elektrik gücü daima yükler tarafından tüketilen aktif güce eşit olmalıdır; bu aynı zamanda sistemdeki kayıpları da içerir. Sistemdeki bir

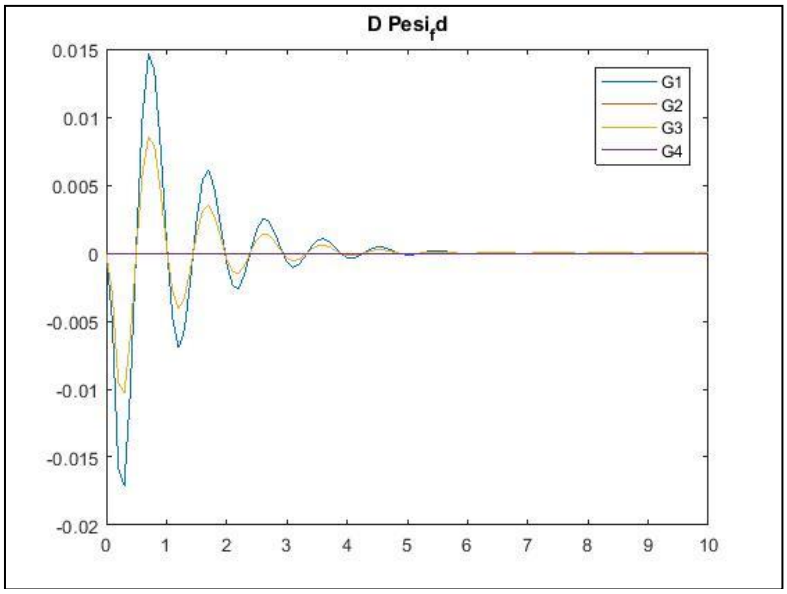
aksaklık bu dengeyi bozabilir, bu da jeneratörlerin rotorlarının hızlanmasına veya yavaşlamasına neden olur. Bir jeneratör geçici olarak diğerinden daha hızlı çalışırsa, rotorunun yavaş makineninkine bağlı olarak açısal konumu artacaktır.

Şekil 6.4'te dört jeneratörün $(\Delta\delta)_1 = 5^o, (\Delta\delta)_3 = 3^o, (\Delta\delta)_2 = (\Delta\delta)_4 = 0$ olunca $\Delta\delta$ değişimleri grafiği verilmiştir.



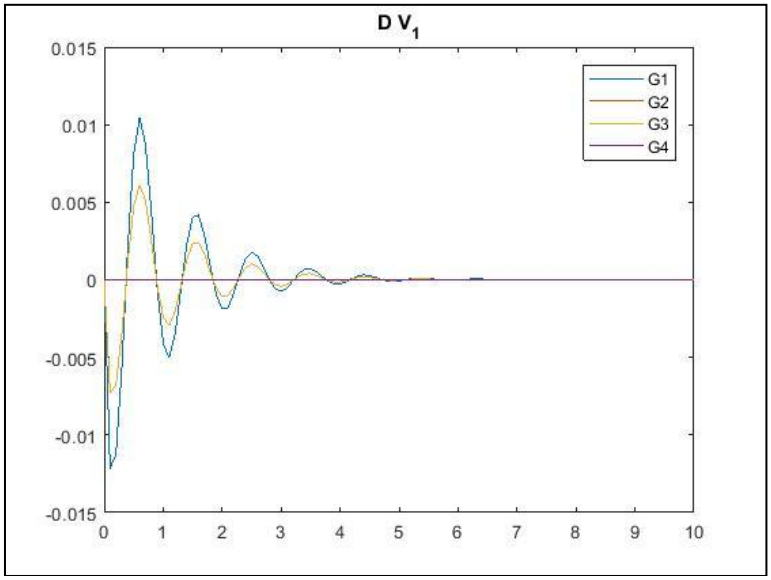
Şekil 6.4. Güç sistemindeki jeneratörlerin $\Delta\delta$ senkron edici momentum kararlılığı

Şekil 6.5'te dört jeneratörün $(\Delta\delta)_1 = 5^o, (\Delta\delta)_3 = 3^o, (\Delta\delta)_2 = (\Delta\delta)_4 = 0$ olunca $\Delta\psi_{fd}$ değişimleri verilmiştir. Güç sistemleri arasında bir hata oluşursa, giren mekanik momentum ve çıkan elektrik momentum arasındaki denge nispeten ortadan kalkar. Dönen cisimlerin hareket kanununa göre senkron makine rotoru pozitif veya negatif bir hıza sahip olacak, böylece diğer jeneratörlere göre yüksek veya düşük hızda dönecektir. Bu koordinasyonsuz dönme rotor açısını değiştirerek sistemin kararlılığını bozacaktır görüldüğü gibi householder dönüşüm elgoritması Q-R matrisini daha da hızlı çözülmesini sağlıyor rotor açı kararlılığını beş dereceye kadar 0-4 saniye aralığında kararı hale getirebilir.



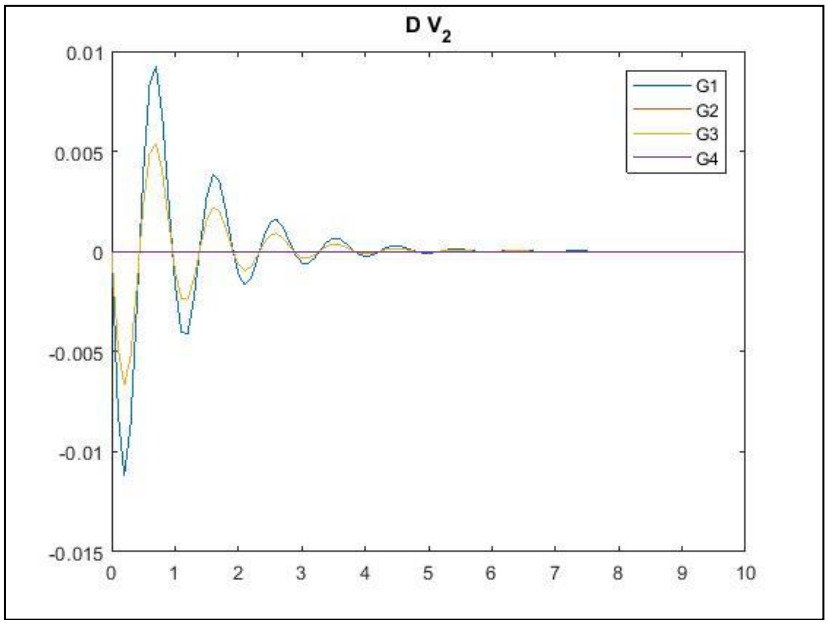
Şekil 6.5. Güç sistemindeki jeneratörlerin $\Delta\psi_{fd}$ kararlılığı

Şekil 6.6'da dört jeneratörün $(\Delta\delta)_1 = 5^o, (\Delta\delta)_3 = 3^o, (\Delta\delta)_2 = (\Delta\delta)_4 = 0$ olunca Δv_1 değişimleri grafiği verilmiştir.



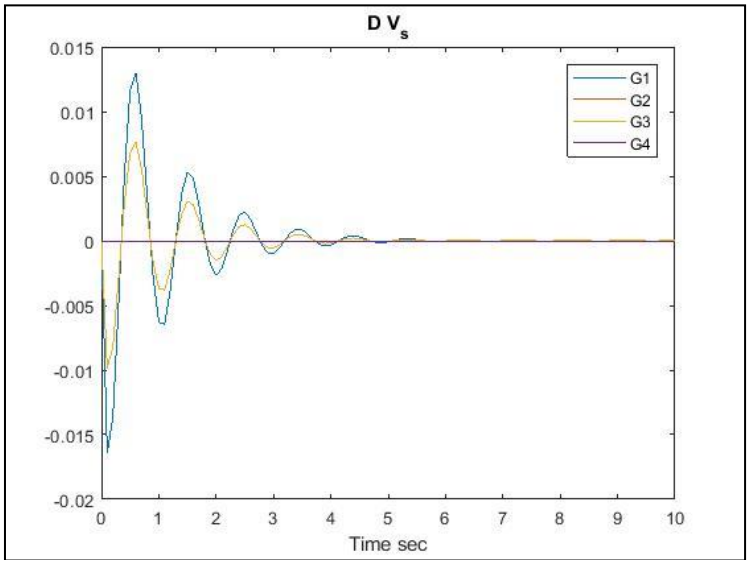
Şekil 6.6. Güç sistemindeki jeneratörlerin Δv_1 kararlılığı

Şekil 6.7'de dört jeneratörün $(\Delta\delta)_1 = 5^o, (\Delta\delta)_3 = 3^o, (\Delta\delta)_2 = (\Delta\delta)_4 = 0$ olunca Δv_2 değişimleri grafiği verilmiştir.



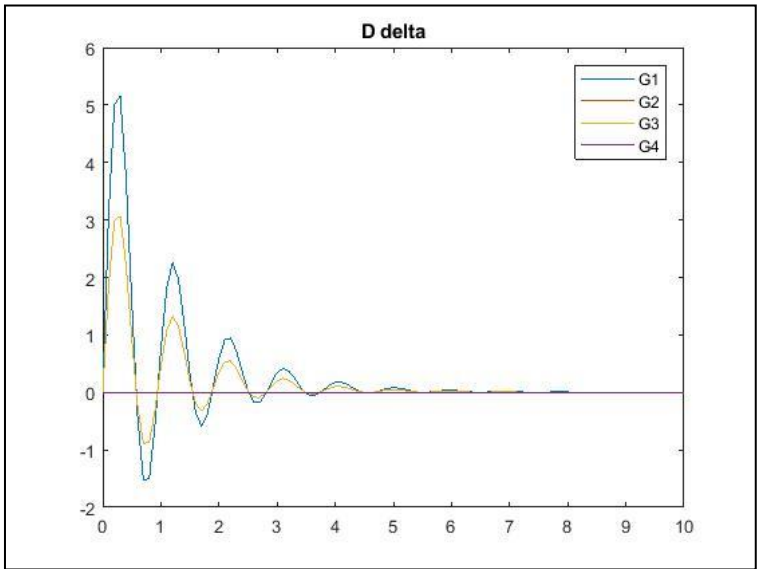
Şekil 6.7. Güç sistemindeki jeneratörlerin Δv_2 kararlılığı

Şekil 6.8'de dört jeneratörün $(\Delta\delta)_1 = 5^o, (\Delta\delta)_3 = 3^o, (\Delta\delta)_2 = (\Delta\delta)_4 = 0$ olunca Δv_s değişimleri grafiği verilmiştir. Şekil 6.2'den Şekil 6.8'e kadar ait olan karmaşık yüzey de 24 üncü ana verilerinin $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ kararlılık değişimini $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları Ek 8'de verilmiştir.



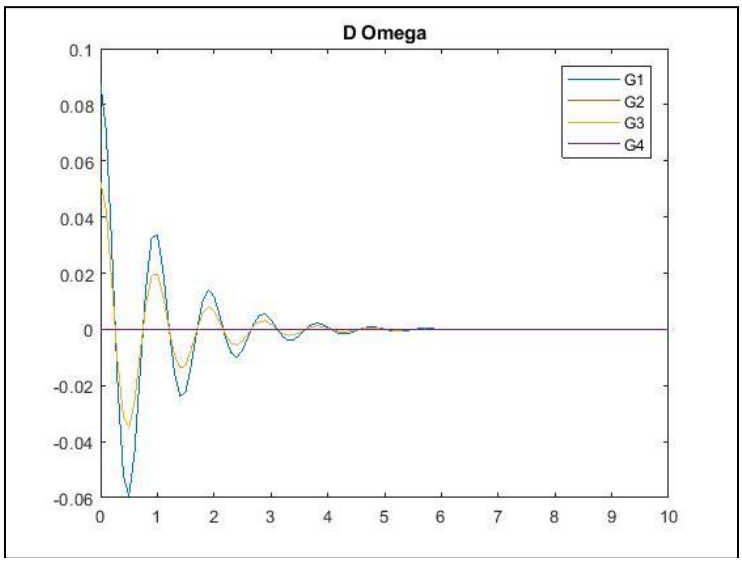
Şekil 6.8. Güç sistemindeki jeneratörlerin Δv_s kararlılığı

Şekil 6.9'da dört jeneratörün $(\Delta\omega)_1 = 5^o, (\Delta\omega)_3 = 3^o, (\Delta\omega)_2 = (\Delta\omega)_4 = 0$ olunca $\Delta\omega$ değişimleri grafiği verilmiştir.



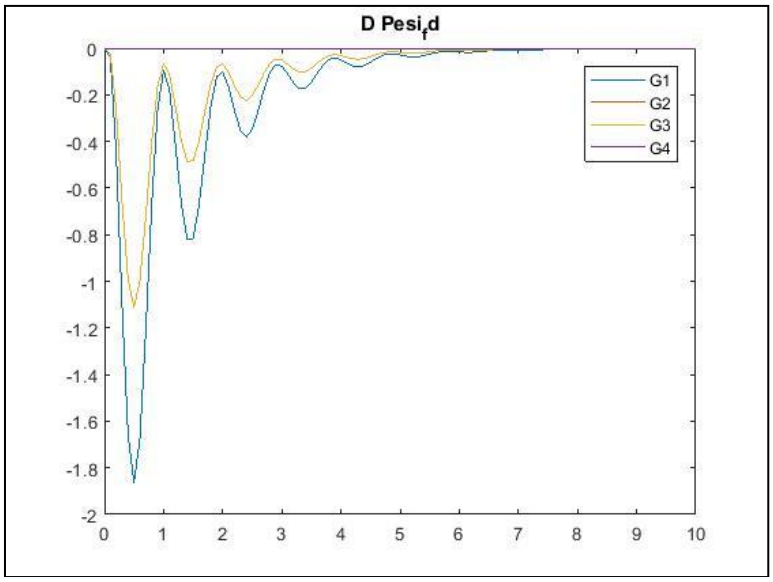
Şekil 6.9. Güç sistemindeki jeneratörlerin $\Delta\omega$ değişimleri

Şekil 6.10'da dört jeneratörün $(\Delta\omega)_1 = 5^o, (\Delta\omega)_3 = 3^o, (\Delta\omega)_2 = (\Delta\omega)_4 = 0$ olunca $\Delta\delta$ değişimleri grafiği verilmiştir.



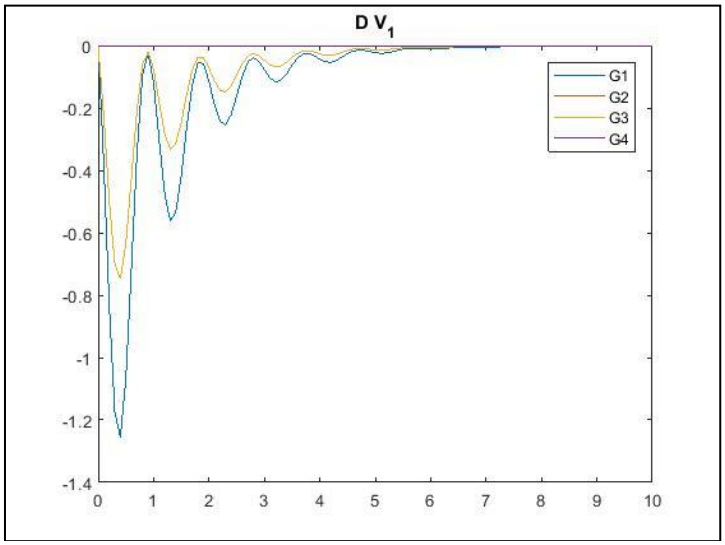
Şekil 6.10. Güç sistemindeki jeneratörlerin $\Delta\delta$ değişimleri

Şekil 6.11'de dört jeneratörün $(\Delta\omega)_1 = 5^o, (\Delta\omega)_3 = 3^o, (\Delta\omega)_2 = (\Delta\omega)_4 = 0$ olunca $\Delta\psi_{fd}$ değişimleri grafiği verilmiştir.



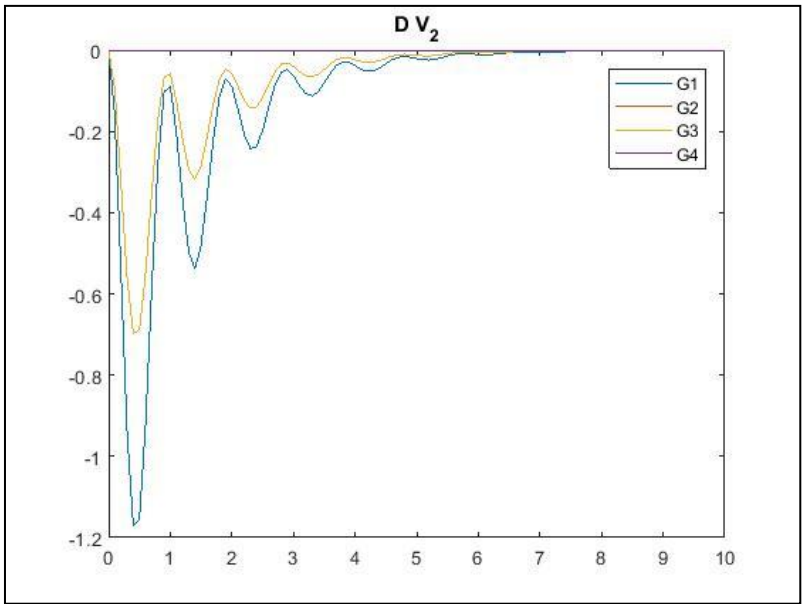
Şekil 6.11. Güç sistemindeki jeneratörlerin $\Delta\psi_{fd}$ değişimleri

Şekil 6.12'de dört jeneratörün $(\Delta\omega)_1 = 5^o, (\Delta\omega)_3 = 3^o, (\Delta\omega)_2 = (\Delta\omega)_4 = 0$ olunca Δv_1 değişimleri grafiği verilmiştir.



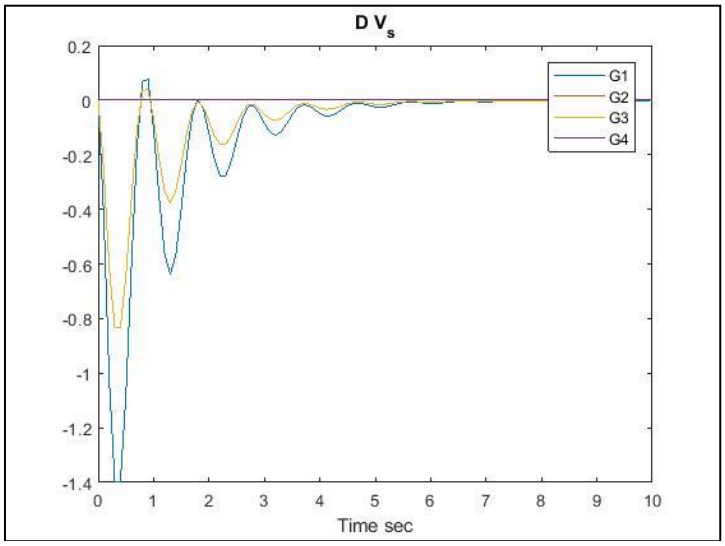
Şekil 6.12. Güç sistemindeki jeneratörlerin Δv_1 değişimleri

Şekil 6.13'te dört jeneratörün $(\Delta\omega)_1 = 5^o, (\Delta\omega)_3 = 3^o, (\Delta\omega)_2 = (\Delta\omega)_4 = 0$ olunca Δv_2 değişimleri grafiği verilmiştir.



Şekil 6.13. Güç sistemindeki jeneratörlerin Δv_2 değişimleri

Şekil 6.14'de dört jeneratörün $(\Delta\omega)_1 = 5^o, (\Delta\omega)_3 = 3^o, (\Delta\omega)_2 = (\Delta\omega)_4 = 0$ olunca Δv_s değişimleri grafiği verilmiştir. Şekil 6.4'den Şekil 6.14'ye kadar ait olan $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ Parametrelerinde rotor açısını $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$ ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları Ek 9'da verilmiştir.



Şekil 6.14. Güç sistemindeki jeneratörlerin Δv_2 değişimleri

Şekiller 6.3-6.14'den görüldüğü gibi, ana verilerin hakiki kısmı negatif olduğunda sistem kararlılığını korumuştur. $\Delta\delta$ rotor açısının ve $\Delta\omega$ bazı jeneratörlerin hızının minimum

değişimleri sistemin kararlılığına etki edememiş ve sistem bu minimum arızalardan sonra kendi kararlılığını geri kazanmıştır.

6.5. Küçük Sinyal Kararlılığının Tamamlayıcı Açıklamaları

Günümüzün bir hayli büyük güç sistemlerindeki Küçük Sinyal Kararlılığı konusu iki genel gruba ayrılır:

1. Yerel mod konuları: Yerel bir bölgede kurulu olan rüzgar ve güneş enerjisi santralleri gibi düşük güçlü santraller yerel mod konusu içerisinde yer alır. Yerel modlar, Küçük Sinyal Kararlılığı konusu içerisinde bir senkron jeneratör ve ona bağlı bir sonsuz bara ile modellenir (SMIB). Yerel modlar 4 gruptan oluşmaktadır.

a. Jeneratör rotorunun dalgalanması
b. Birbirine yakın olan jeneratörlere ait rotorların dalgalanması
c. Uyartım sistemi, HVDC hatları ve reaktif güç telafi edicileri gibi kontrol edici bölümlerin dalgalanmaları.
d. Buhar türbinlerinde meydana gelen dönemeç modlarının dalgalanmaları (yerel modların frekansı 0.7 ve 2 Hz arasında değişir).

2. Kapsamlı modlar:

Bu modların etkisi yerel modalara göre çok daha derindir.

3. Bölgeler arası modlar:

Güç sisteminin bir bölgesinde bulunan birkaç jeneratör, diğer jeneratörlere göre zıt yönde dalagalanır. Bu durum, iki grup jeneratörün zayıf bir hatla bağlanmasından kaynaklanır. Bu dalgalanmaların frekansı 0.2-1 Hz arasındadır. Bölgesel ve kapsamlı modlar günümüzün en modern modları olup, güç sistemlerinin kararlılık çalışmalarında incelenirler. Çünkü modern güç sistemleri doğrudan birbirlerine bağlıdırlar, ancak bağlantı hatları genelde eskidir ve yüksek maliyetlerinden ötürü hatların yenilenmesinden kaçınılır. Yeni santraller inşa edilmesine rağmen bu santrallerin zayıf hatlar üzerinden güç sistemlerine bağlanması sebebiyle sıklıkla bölgeler arası dalgalanmalar meydana gelir. Günümüzdeki birçok PSS çalışması güç sistemlerine odaklıdır. PSS sisteminin yerel sinyalleri kullanmaması gerekir. Ancak diğer bölgelerin sinyallerini giriş sinyali olarak kullanabilir. Bu durumda da diğer

bölgelerden sinyal yollandığında bir gecikme meydana gelebilir ve bu gecikme de Küçük Sinyal Kararlılığını bozabilir. Bu konu büyük önem arz ettiğinden PSS çalışmalarında mutlaka incelenmelidir.

6.6. Güç Sistemlerinde Küçük Sinyal Kararlılığını İyileştirmek için Bazı Çözümler

Bu tezde, güç sisteminin Küçük Sinyal Kararlılığı analizinde kullanılan matematiksel denklemlerin lineer edilmesi hususu ele alınmıştır. Denklemler lineer hale getirilerek sistemin ana verileri elde edilmiştir. Sonuç olarak, Küçük Sinyal Kararlılığı analizinin geçici kararlılık analizinden çok daha basit olduğu ortaya konulmuştur. Bunun nedeni ise geçici kararlılıkta zaman diliminin çok daha kısa olması ve denklemlerin lineer olmamasıdır (Kundur, 1994).

6.7. Küçük Sinyal Kararlılığın İyileştirilmesi

1. Hatanın büyüklüğü ve süresi minimuma indirilerek arızanın etkisi azaltılabilir. Arıza meydana geldiğinde, arızanın büyüklüğüne göre aktarım gücü büyük ölçüde azalabilir ve bu da meydana gelme süresine bağlı olarak arızadan sonra sistemin kararsızlığına yol açabiilir. Bu yüzden hem arızanın büyüklüğü hem de süresinin azaltılabileceği bir metoda ihtiyaç vardır.
2. Sistemde senkron edici momentumun arttırılması.
3. Hızlandırıcı momentumun azaltılması: Arıza meydana geldiğinde, hızlandırıcı momentum artar ve sistem kalıcı durumunu kaybeder. Bu iş, türbinin mekanik gücünü kontrol ederek yapılabilir.
4. Hızlandırıcı momentumun azaltılması: Burada türbinin mekanik gücü kullanılmaz, onun yerine yapay yük kullanılır.
5. Kısa devreden en az hasarla kurtulabilmek için yüksek hızlı kesicilere ihtiyaç bulunmaktadır.
6. Güç sisteminin reaktansının azaltılması.

$$Aktarım\ Gücü:\ \uparrow \mathrm{P} = \frac{\mathrm{EV}}{\downarrow \mathrm{X}} \sin \delta \qquad (3.57)$$

Denklem 3.57'de de görüldüğü gibi sistemin reaktansı ne kadar azalırsa, aktarım gücü bir o kadar artar. Sistemin reaktansını azaltmak için üç yöntem kullanılır:

a) Bantlaşmış hatların kullanımı
b) Seri kondansatör kullanılması
c) Kaçak reaktansı az olan transformatörlerin kullanımı (Transformatör yapısında kaçak reaktans 0.1-0.2 pu arasındadır. Modern transformatörlerde ise bu miktar, aktarım gücünü arttırmak için daha da düşük hesaplanır.)

7. Şönt kapasitörlerin kullanımı: Bu yöntemle istenilen noktada gerilim arttırılarak sistemin kararlılığı arttırılabilir.
8. Dinamik önleyicisi: Bu yöntem senkron makinenin elektrik güç çıkışını kontrol etmek için kullanılan suni bir yöntemdir. Bu yöntemde bedeli kullanıcılara yansıtılmayan suni bir destek yük kullanılır Bu yük, arıza süresi boyunca jeneratörün çıkış gücünü artırmak ve hızlandırıcı gücünü azaltmak üzere tarafımızca üretilir.
9. Tek-kutup anahtarlama: Bu durumda her faz için farklı işlem mekanizması vardır. Örneğin, tek faz toprak arızası meydana gelirse, röle sadece arızalı fazı devre dışı bırakmak üzere ayarlanır.
10. Buhar türbini vanasını hızlıca açıp kapama: Bu yöntem termal santrallerde uygulanabilir ve jeneratörün hızlandırıcı gücünü arttırır.
11. Jeneratörü devre dışı bırakmak.
12. Kontrollü bir şekilde sistemden yük çıkarmak: Bu yöntem birbirine bağlı bir güç sisteminde hatanın diğer bölgelere dağılmasını, böylece sistemin çökmesini önlemekte kullanılabilir.
13. Yüksek hızla uyartım yanıtı: Geçici arıza süresince, uyartım gerilimi arttırılarak jeneratörün kendi gerilimi de arttırılabilir; bu da senkron edici gücün artmasına sebep olur. Örneğin, bir sistemde üç faz hatası oluştuğu takdirde, iletim hattının sistemden ayrılması mecburiyeti hasıl olur. Sonrasında ise jeneratörün terminal gerilimi azalır. Söz konusu gerilimi arttırmak için ise AVR yoluyla uyartım sisteminden yardım alınır ve böylece sistemin kararlılığı iyileştirilebilir.
14. Kesintili uyartım kontrolü: Bu konuda PSS sistemi uygulanabilir ve PSS de kendi içerisinde iki durumda incelenir.
15. HVDC cinsinden olan hatların kontrolü: İki durumda geçici kararlılığı iyileştirmek için kullanılır.

a) DA gücün dönüştürücü içinde kontrolü

b) Reaktif gücü desteklemek için dönüştürücülerin kontrolü

16. Güç sisteminin kararlaştırıcıları
17. Reaktif gücün statik geri kazandırıcılarının tamamlayıcı kontrolü yada FACTS elementleri
18. HVDC hatlarının güç elektroniği elementleri ile Küçük Sinyal Kararlılığının iyileştirilmesi
19. DFIG (*Doubly-Fed Induction Generator*) rüzgar türbinlerinde senkron jeneratörlerin üzerindeki güç elektroniği elementleri ile Küçük Sinyal Kararlılığı daha iyi hale getirilebilir (Bourgin, Testud, Heilbronn, ve Verseille, 1993).

6.8. Önerilen Çözüm Yönteminin Değerlendirilmesi

Lineer sistemlerin analizi lineer olmayanlara göre çok daha basittir. Tez çalışmasında da görüldüğü gibi, lineer sistemlerin analizi sonucunda, durum matrisinin karmaşık yüzey üzerinde ana miktarlarına ait konumu belirlendi, ve durum matrisinin ana miktarlarına ait gerçek kısımlarının işareti (pozitif yada negatif) sistemin kararlığını gösterdi. Eğer bu gerçek kısımlar negatif ise sistem kararlıdır ve küçük sapmalar bu kararlılığı bozamayacaktır, tam aksine kısa bir zaman geçtikten sonra, sistem kendi denge noktasını geri kazanacaktır.

Jeneratör ve ağın parametrelerinde meydana gelen her türlü değişim, durum matrisinin elemanlarını etkileyecektir; dolayısıyla, karmaşık yüzeydeki ana miktarların konumu farklılık gösterecektir bunun sonucunda, sistemin kararlılığı etkilenir. Bu tez çalışmasında, sönümlendirici Katsayısı'nın değişimlerinin durum matrisinin ana miktarlarını nasıl etkilediği incelemeye alınmıştır, ve her ana miktara ait gerçek kısımlarda olan değişimlerin diyagramı, sönümlendirici Katsayısı (K_D)'nın [-200,200] aralığında olan değişimlerine karşı çizilmiştir. En az bir ana miktara ait gerçek kısmın negatif olduğu K_D 'lerde sistem kararsızdır. Sonuç olarak, yukarıdaki diyagramlar sönümleyici katsayısının sistem kararlılığı üzerindeki etkisini göstermektedirler. Ayrıca, bu diyagramları başka parametlerin değişimlerinide baz alarak çizilip sistem kararlığını incelenebilir.

Sonuç olarak küçük sinyalde olan büyük sistemlerin kararlılığı, sadece çok büyük bir matrisin ana miktarlarını bulmaya bağlıdır. Aslında, ana miktarların bulunması $\det(A-\lambda I)=0$ determinantından elde edilmiş bir polinom denklemin köklerini bulmakla mümkün olur. Büyük

bir matrisin determinantını bulmak oldukça zordur; bu yüzden düz yöntem sadece teorik olarak tartışılabilir, ama pratik olarak çok fazla kullanımı bulunmamaktadır.

Rakamsal yöntemlerler yoluyla (kare yöntemi, ters kare yöntemi ve Arnold yöntemleri gibi) ana miktarların bulunmasında ise, mutlak büyüklük açısından en büyük ana miktar elde edilir; sonuçta diğer ana miktarların bulunması için farklı tedbirler alınmalıdır. Bunun için, benzer dönüşümler yöntemi pratik yöntemlerden biridir. Ortogonal benzerliklere dayalı bir yöntem olan Giyonez Rotasyon yönteminde dönüşümden sonraki her aşamada, verilen matrisde sadece bir eleman sıfırlanır. Tekrarlanan dönüşümler sonucunda, verilen matris bir yukarı üçgen veya Hasenberg Matrisine ortogonal bir şekilde homolog edilir. Ve böylece verilen matrisi, QR (Q ortogonal bir matris, R yukarı üçgen bir matris) şeklinde ayrıştırılabilir.

Bu tezde sunulan yöntemin (Householder) en büyük avantajı, her dönüşüm aşamasında verilen matrisin her sütununun, yukarı üçgen bir matrisin sütununa dönüşüyor olmasıdır. Diğer bir ifade ile, sadece n-1 sayıda aşama, verilen matrisin bir yukarı üçgen matrise dönüşümü için gereklidir. İlk aşamada (1,1) elemanının altında olan elemanlar sıfırlanır, ikinci aşamada ise (2,2) elemanının altında olanlar sıfırlanır, ve son aşamada sadece (n-1,n-1) elemanının altında olanlar sıfırlanır. Bu yöntem, özellikle Giyonez yöntemiyle karşılaştırıldığında, büyük önem taşımaktadır. Çünkü, Giyonez yönteminde, bir (n×n) matrisin yukarı üçgen bir matrise dönüşümü için, n(n-1/2) kere dönüşüm işlemi (matris çarpması) yapılmalıdır. Halbuki Householder yönteminde en fazla n kere dönüşüm yapılmalıdır. Verilerin rakamsal bakımından, hesaplama operasyonların sayısı önemlidir, çünkü yuvarlanmış hatalar, çok sayıda operasyondan dolayı, birikip ve nihayeten en son sonuç üzreinde etki bırakabilir. Özellikle, gerçek özel miktarlar sıfıra yakın olduklarında, bu yuvarlanmış hatalar o ana miktarın işaretini belirlemeyebilirler. Dolayısıyla, sunulan yöntem, hem hesaplama operasyonu sayısı açısından, hemde tüm ana miktarları elde ettiğinden büyük önem taşımaktadır ve benzer yöntemlere göre inkar edilemez üstünlüğe sahiptir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde gerilim kararlılığı için kullanılan geleneksel metodlar ve Küçük Sinyal Kararlılığı yöntemleri kullanırarak sistemde gerilim kararlılığının oluşumu gösterilmiştir yapılan çalışmalardan. Sistemdeki bara sayısının fazla olması problemin hızlı çözülmesine etkisi yoktur. Güç sistemlerinde Küçük Sinyal Kararlılığını incelemek için sistemde mevcut olan bara sayısı güç sistemi üzerine doğrudan bir etkisi olmayacaktır. Bu durum IEEE'de ki mevcut standartlarına uygun olmayan her hangi bir bara seçiminde ise sistemin kararlılığını bozmayacağını göstermektedir. Bununla birlikte güç sistemlerinde bara sayısının artması mevcut güç sisteminin dinamiklerini etkilemeyecektir.Yani, A matrisi, bara sayısına bağlı olmaksızın yine 6n×6n büyüklüğüne sahip olacaktır. Ancak, bara sayısının A matrisinin elemanlarına etkisi vardır ve matrisin sadece boyutunu değiştirir. Böylelikle Küçük Sinyal Kararlılığını yapmak için sistemin bara sayısı değil, güç sisteminin dinamiklerini etkileyen bileşenleri incelenmesi gerekmektedir. Sistemin dinamiklerini etkileyen elementler ani yük değişimleri, senkron jeneratörlerinin anı şekilde devre dışı kalması veya devreye girmesi gibi meydana gelen arızalardır. Householder Yönteminin Ortaya çıkan çalışma noktasını değiştiren sinyalin küçük olması şartıyla lineer olmayan sistem çalışma noktasının etrafında lineer hale getirdiği gösterilmiştir. Böylece zorlayıcı lineer olmayan sistemlerin analizi yerine, daha kolay olan lineer sistemlerin analizi yapılabildiği ispatlanmıştır. Bunun ile birlikte sabit bir noktanın kararlılığını incelemek için Liyapanef Fonksiyonu'nu elde etmediğinin kolay olmadığı; bunun nedeni ise bu fonksiyonu bulmak için genel bir yöntemin var olmamasıdır. Karmaşık ambiyans da koordinat fonksiyonları kavramlarının kullanılması ile binlerce değişkene sahip lineer olmayan fonksiyonla karşılaşılacaktır Yüzler ve binlerce değişkene sahip olan ultra büyük sistemleri lineer etmeden incelememiz nerdeyse mümkün olmadığı gösterilmiştir. Büyük sistemlerin tek pratik inceleme yolu lineer edilebilmesi nedeniyle küçük sinyal analizidir. Bu sistemlerin kararlılık analizi, mod matrisinin ana verilerini bulunmasıyla ilişkilidir. Bu değerlerin reel kısımlarının negatif yada pozitif olması sistemin kararlı olup olmadığını belirler. Böyle büyük bir matrisin ana verilerini bulmak bir hayli zorlayıcı olmasına rağmen lineer hale getirilerek kolaylaştırılabilir böylece bilgisayar simülasyonunun da uygulama kabiliyeti daha iyi bir seviyede getirilebilir. Büyük matrislerin ana verilerini bulma yöntemleri genellikle homolog dönüşümler (özellikle Householder dönüşümleri) üzerine tasarlanmıştır, çünkü Householder'in arka arkaya dönüşümleri matrisin sutunlarında bir çok sıfırın ortaya çıkmasına sebep olacaktır. Ortogonal matrisin

yukarı üçgen matrisle çarpılması sonucunda elde edilen matrisle QR ayrışımı yapılır. Daha sonra, QR algoritmasını kullanarak elde edilen matris yukarı üçgen matrisle çarpılarak (bu matris yoksa, yukarı Hasenberg matrisle) homolog hale getirilir. ana verilerin homolog dönüşümlerini ve dereceleri korunur dolayısıyla, bir üçgen matrisin ana verileri diyagonal üzrindeki elemanlar olduğundan, elde olan matrisin ana verileri üçgen matrisin diyagonalı üzerinden ortaya çıkar. QR algoritmasında aynı zamanda ana veri matrisi (Modal Matrisi)'de üretilebilir. Bazı farklı algoritmalarda yine fonksiyonların sıfırını bulmak için tasarlanmıştır. Bu yöntemler belirli bir polinomu, bir fonksiyon gibi dikkate alıp Newton-Refson gibi metodlarla fonksiyonun sıfırlarını bulmaya çalışırlar. Farklı fonksiyonların sıfırını bulmada, Newton-Refson metodu yerine daha iyi olan başka metodlarda kullanılır. Ana verileri bulmak üzere başka bir yöntem ise, rasgele algoritmaları kullanmaktır. Bu hedefe ulaşmak için, sıfırları bulma konusunu minimize etmek konusu olarak düşünürler, sonrada genetik algoritması gibi tamamlayıcı algoritmaları kullanarak sözü geçen konuların çözümünü sağlarlar. Sonuç olarak büyük güç sistemlerinde Küçük Sinyal Kararlılığı analizi yapmak için ana verileri bulma yönteminin Householder yöntemi olduğu yapılan uygulamalar kapsamında gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

Abe, S. and Isono, A. (1976). Determination of power system voltage stability. Part I: Theory. *Electrical Engeland in Japan.* Tokyo, 1 - 255.

Adkins, B. and Harley, R. G. (2012). *The General Theory of Alternating Current Machines: Application to Practical Problems.* London: Springer, 1 - 550.

Anderson, J. B., Aulin, T. and Sundberg, C.E. (1986). *Digital Phase Modulation.* London: Springer, 1 - 448.

Berrou, C., Glavieux, A. and Thitimajshima, P. (1993). *Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes*. Proceedings of ICC '93 - IEEE International Conference on Communications. Geneva, 17 - 27.

Blackert, W. and Wilson, S. G. (1996). *Turbo Trellis Coded Modulation.* Virginia: Virginia Education, 1- 368.

Bourgin, F., Testud, G., Heilbronn, B. and Verseille, J. (1993). Present practices and trends on the French power system to prevent voltage collapse. *IEEE Transactions on Power Systems,* 8(3), 778 - 788.

Chen, C.-T. (1984). *Linear System Theory and Design.* New York: Oxford Press, 1 - 660.

Cushing, E. W., Drechsler, G. E., Kilgoar, W. P., Marshall, H. G. and Stewart, H. R. (1971). Fast Valving as an Aid to Power System Transient Stability and Prompt Resynchronization and Rapid Reload After Full Load Rejection . *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* PAS-90(6), 2517 - 2527.

Dhuness, K. (2012). *An Offset Modulation Method Used to Control the Paper of an OFDM Transmission.* Johannesburg: University of Pretoria, 1 - 87.

Edwards, L., Gregory, J. D., Osborn, D. L., Doudna, J. H., Pasternack, B. M. and Thompson, W. G. (1986). Turbine Fast Valving to Aid System Stability: Benefits and Other Considerations . *IEEE Transactions on Power Systems,* 1(1), 143-153.

G. Lindell, C.E. S. (1988). An Upper Bound on the Bit Error Probability of Combined Convolutional Coding and Continuous Phase Modulation. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1263 - 1269.

Gelopulos, D. P. (1979). *Midterm simulation of electric power systems.* Illinois: Palo Alto, Calif, 1 - 156.

Hill, D. (1993). Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies . *IEEE Transactions on Power Systems ,* 8(1), 166-176.

Hingorani, N. (1994). FACTS technology and opportunities. *IEE Colloquium on Flexible AC Transmission Systems (FACTS) - The Key to Increased Utilisation of Power Systems.* London, 410 - 421.

IEEE. (1982). Proposed Terms and Definitions for Power System Stability . *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS*-101(7), 1894 - 1898.

Iliceto, F. and Cinieri, E. (1977). Comparative analysis of series and shunt compensation schemes for AC transmission systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* 96(6), 1819-1830.

İnternet: Retrieved from bpa.gov URL: ftp.bpa.gov/pub/WAMS%20Information Son Erişim Tarihi: 24.05.2019.

Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control.* New York: McGraw-Hill Education, 1 - 705.

Lu, Q., Sun, Y. and Mei, S. (2001). *Nonlinear Control Systems and Power System Dynamics.* London: Springer, 1 - 325.

Machowski, J., Bialek, J. W. and Bumby, J. R. (2012). *Power System Dynamics Stability and Control.* United States: John Wiley and Sons, 100 - 298.

Magallones, T. J., Singh, J. G. and Pinthurat, W. (2016). Power Flow and Small Signal Stability Analysis on the Interconnected Three Isolated Philippine Power Grid. *Perspectives in Science* 8(C), 8, 589-591.

McPherson, G. and Laramore, R. D. (1990). *An Introduction to Electrical Machines and Transformers.* New Jersey: The Wiley, 45 - 565.

Murthy, P. G. and Pavella, M. (1994). *Transient Stability of Power Systems: Theory and Practice.* New York: The Wiley, 78 - 413.

Nely, P. B. and Gorge, P.S. (1970). *Stability Theory of Dynamical Systems.* London: Springer, 1 - 745.

Padiyar, K. R. (2008). *Power system dynamics : stability and control.* Hyderabad: BS Publications, 1- 630.

Pai, M. A. (1981). *Power System Stability: Analysis by the Direct Method of Lyapunov.* Amsterdam: Elsevier, 5 - 470.

Parashar, M. and Mo, J. (2009). *Real Time Dynamics Monitoring System (RTDMS): Phasor Applications for the Control Room.* Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii, 45-65.

Subcommittee, S. D. (1994). *Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation.* Paris: IEEE Transactions on Power Systems, CIGRE, 1 - 310.

Taylor, C. W. (1994). *Power system voltage stability.* New York: McGraw-Hill, 1 - 521.

Yu, Y. (1983). *Electric power system dynamics.* New York: Academic Press, 1 - 453.

EKLER

Ek-1. Şekil 5.2, denklem 5.32 Sisteminin ana verilerine ait konum diyagramının MATLAB kodları

Şekil 5.2'ye ait olan MATLAB kodları.

```
clear all
clc
H=3.5;
LL=[];
KD=[];
for K_D=-200:1:200
A=[-K_D/(2*H)    -0.757/(2*H)
   376.99        0          ];
   [V,Landa]=eig(A);
   Landaa=eig(A);
   real(Landaa);
   imag(Landaa);
LL=[LL Landaa];
KD=[KD K_D];
end
   figure(1)
   plot(KD,real(LL(1,:)),'.r')
   title('Real Part of Landa1 by KD')
   xlabel('KD')
   ylabel('Real(Landa1)')
   figure(2)
   plot(KD,real(LL(2,:)),'.r')
   title('Real Part of Landa2 by KD')
   xlabel('KD')
   ylabel('Real(Landa2)')
    figure(3)
   plot(KD,real(LL(1,:)),'*b',KD,real(LL(2,:)),'or')
   title('Real Part of Landa by KD')
   xlabel('KD')
   ylabel('Real(Landa)')
```

Ek-2. Çizelge 5.1'e ait rotorun açı ve hız değişimlerinin 10 saniyeye kadar MATLAB kodları

```
 legend('Landa 1','Landa 2')
clear all
clc
H=3.5;
LL=[];
KD=[];
for K_D=-20:1:20
A=[-K_D/(2*H)    -0.757/(2*H)
   376.99        0          ];
   [V,Landa]=eig(A);
   Landaa=eig(A);
   real(Landaa);
   imag(Landaa);
LL=[LL Landaa];
KD=[KD K_D];
end
   format long
   LL'
```

Ek-3. Şekiller 5.3-5.5'e ait sistemin kararsızlığının zamanla doğrusal ilişkisini gösteren MATLAB kodları

```
clear all
clc
t=0:0.1:10;
u=0*ones(20,size(t,2));
K_D=-10;
H=3.5;
A=[-K_D/(2*H)    -0.757/(2*H)
   376.99        0          ];
B=zeros(2,20)
C=eye(2,2);
D=zeros(2,20);
 delta_x=[0   5*pi/180 ]
   SYS1=ss(A,B,C,D)
   [y,t,x]=lsim(SYS1,u,t,delta_x');
   figure(2)
   plot(t,x(:,1),t,x(:,2))
   legend('D Omega','D delta')
   title('Speed  and Rotor Angle ')
```

Ek-4. Şekil 5.6'daki senkron jeneratörün hız-rotor açısı ve manyetik akı diyagramının MATLAB kodları

```
clear all
clc
t=0:0.1:10;
u=0*ones(20,size(t,2));

K_D=10;
H=3.5;
A=[-K_D/(2*H)    -0.1092     -0.1236
   376.99        0           0
    0           -0.1938     -0.4229
   ];
B=zeros(3,20)
C=eye(3,3);
D=zeros(3,20);

delta_x=[0   5*pi/180  0]
   SYS1=ss(A,B,C,D)
   [y,t,x]=lsim(SYS1,u,t,delta_x');
   figure(2)
   plot(t,x(:,1),'b',t,x(:,2),'g',t,x(:,3),'r')
   legend('D Omega','D delta','D pesi')
   title('Speed  and Rotor Angle and flux ')
   xlabel('Time')
```

Ek-5. Şekil 5.7, denklem 5.21 sisteminde λ'nın KD ile olan ana verilerinin gerçek kısımlarının konum diyagramı MATLAB kodları

```
clear all
clc
H=3.5;
LL=[];
KD=[];
for K_D=-200:1:200
A=[-K_D/(2*H)    -0.1092     -0.1236
   376.99        0           0
    0           -0.1938     -0.4229
   ];
   [V,Landa]=eig(A);
   Landaa=eig(A);
   real(Landaa);
   imag(Landaa);
LL=[LL Landaa];
KD=[KD K_D];
end
   figure(1)
   plot(KD,real(LL(1,:)),'*b',KD,real(LL(2,:)),'or',KD,real(LL(3,:)),'.g')
   title('Real Part of Landa by KD')
   xlabel('KD')
   ylabel('Real(Landa)')
   legend('Landa 1','Landa 2','Landa 3')
```

Ek-6. Şekil 5.8 ve denklem 5.53'teki sisteme ait MATLAB kodları

$\Delta\omega = \Delta\Psi_{fd} = \Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V_S = 0, \Delta\delta = 5^\circ = 0.0875$ Başlangıç Koşularında Olaydan 10 Saniye Sonrakı Yanıtın MATLAB Kodları

```
clear all

clc

t=0:0.1:10;

u=0*ones(20,size(t,2));

K_D=0;

H=3.5;

A=[-K_D/(2*H)      -0.1092  -0.1236   0       0         0

    376.99  0         0         0       0          0

    0       -0.1938  -0.4229 -27.3172  0          27.3172

    0       -7.3125  20.8391 -50.0     0          0

    0       -1.0372  -1.1738   0      -0.7143     0

    0       -4.8404  -5.4777   0      26.9697   -30.3030]

 B=zeros(6,20)

C=eye(6,6);

D=zeros(6,20);

delta_x=[0   5*pi/180     0      0      0      0]

    SYS1=ss(A,B,C,D)

    [y,t,x]=lsim(SYS1,u,t,delta_x');

    figure(2)

    plot(t,x(:,1),t,x(:,2),t,x(:,3),t,x(:,4),t,x(:,5),t,x(:,6))

    legend('D Omega','D delta','D pesi','D V1','D V2','D Vs')

    title('Speed  and Rotor Angle and flux ')

    xlabel('Time')
```

Ek-7. Şekiller 5.9'dan 5.14'e kadar sistemin ana verilerine ait H değişimi ile KD kararlılığının MATLAB kodları

```
clear all
clc
t=0:0.1:10;
u=0*ones(20,size(t,2));
%u=ones(20,size(t,2))*diag(sin(t))
H=3.5;
LL=[];
KD=[];
for K_D=-200:1:200
a11=-K_D/(2*H);
A=[a11    -0.1092  -0.1236   0       0         0
   376.99  0        0        0       0         0
   0       -0.1938  -0.4229 -27.3172  0        27.3172
   0       -7.3125  20.8391 -50.0     0        0
   0       -1.0372  -1.1738   0      -0.7143   0
   0       -4.8404  -5.4777   0      26.9697  -30.3030];
   [V,Landa]=eig(A);

   Landaa=eig(A);
   real(Landaa);
   imag(Landaa);
LL=[LL Landaa];
KD=[KD K_D];
end
   figure(1)
   plot(KD,real(LL(1,:)),'.r')
   title('Real Part of Landa1 by KD')
   xlabel('KD')
   ylabel('Real(Landa1)')
      figure(2)
   plot(KD,real(LL(2,:)),'.r')
```

Ek-7. (devam) Şekiller 5.9'dan 5.14'e kadar sistemin ana verilerine ait H değişimi ile KD kararlılığının MATLAB kodları

```
title('Real Part of Landa2 by KD')
 xlabel('KD')
 ylabel('Real(Landa2)')

 figure(3)
 plot(KD,real(LL(3,:)),'.r')
 title('Real Part of Landa3 by KD')
 xlabel('KD')
 ylabel('Real(Landa3)')

 figure(4)
 plot(KD,real(LL(4,:)),'.r')
 title('Real Part of Landa4 by KD')
 xlabel('KD')
 ylabel('Real(Landa4)')

 figure(5)
 plot(KD,real(LL(5,:)),'.r')
 title('Real Part of Landa5 by KD')
 xlabel('KD')
 ylabel('Real(Landa5)')

 figure(6)
 plot(KD,real(LL(6,:)),'.r')
 title('Real Part of Landa6 by KD')
 xlabel('KD')
 ylabel('Real(Landa6)')
```

Ek-8. Şekil 6.2'den şekil 6.8'e kadar karmaşık düzlemde 24 üncü ana verilerinin $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ kararlılık değişimini $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları

```
clear all
clc
n=4
k=20
t=0:0.1:10;
u=0*ones(20,size(t,2));
%u=ones(20,size(t,2))*diag(sin(t))
 A1=[0.1      -0.1092  -0.1236   0       0         0
   376.99  0        0        0       0         0
   0      -0.1938  -0.4229 -27.3172  0        27.3172
   0      -7.3125  20.8391 -50.0     0         0
   0      -1.0372  -1.1738   0      -0.7143    0
   0      -4.8404  -5.4777   0      26.9697  -30.3030]
A2=[0.2      -0.1092  -0.1236   0       0         0
   376.99  0        0        0       0         0
   0      -0.1938  -0.4229 -27.3172  0        27.3172
   0      -7.3125  20.8391 -50.0     0         0
   0      -1.0372  -1.1738   0      -0.7143    0
   0      -4.8404  -5.4777   0      26.9697  -30.3030]
A3=[0.05     -0.1092  -0.1236   0       0         0
   376.99  0        0        0       0         0
   0      -0.1938  -0.4229 -27.3172  0        27.3172
   0      -7.3125  20.8391 -50.0     0         0
   0      -1.0372  -1.1738   0      -0.7143    0
   0      -4.8404  -5.4777   0      26.9697  -30.3030]
A4=[0.03     -0.1092  -0.1236   0       0         0
   376.99  0        0        0       0         0
   0      -0.1938  -0.4229 -27.3172  0        27.3172
   0      -7.3125  20.8391 -50.0     0         0
```

Ek-8. (devam) Şekil 6.2'den şekil 6.8'e kadar karmaşık düzlemde 24 üncü ana verilerinin $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ kararlılık değişimini $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları

```
  0     -1.0372  -1.1738   0     -0.7143    0
  0     -4.8404  -5.4777   0     26.9697  -30.3030]
B=zeros(24,20)
C=eye(20,24);
D=zeros(24,20);

k=20;
Y=[ 0.5   0.2   0.1   0.2   0.2   0.3   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
0   0   0
  0.1   0.7   0.2   0.5   0.7   0.1   0.1   0   0.2  0.3  0.5  0.1  0.2  0.2   0   0
0   0.3  0   0
  0     0.3   0.6   0     1     0.2   0   0   0   0.1  0.5  0   0   0.2  0   0   0
0.3  0   0
  0     0     1     0.8   0     0     0     1     0.2  1    1    0   0   0.1  0.1   0   0.1
0   0   0
  0     0     0     1     0.2   0     0.1   0   0.3  0   0   0.1  0.5  0.2  0.7   0.9   0
0.3  0.1  0.1
  0.5   0.2   0.1   0.2   0.2   0.3   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
0   0   0
  0.1   0.7   0.2   0.5   0.7   0.1   0.1   0   0.2  0.3  0.5  0.1  0.2  0.2   0   0
0   0.3  0   0
  0     0.3   0.6   0     1     0.2   0   0   0   0.1  0.5  0   0   0.2  0   0   0
0.3  0   0
  0     0     1     0.8   0     0     0     1     0.2  1    1    0   0   0.1  0.1   0   0.1
0   0   0
  0     0     0     1     0.2   0     0.1   0   0.3  0   0   0.1  0.5  0.2  0.7   0.9   0
0.3  0.1  0.1
  0.5   0.2   0.1   0.2   0.2   0.3   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
0   0   0
```

Ek-8. (devam) Şekil 6.2'den şekil 6.8'e kadar karmaşık düzlemde 24 üncü ana verilerinin $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ kararlılık değişimini $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları

```
 0.1   0.7   0.2   0.5   0.7   0.1   0.1   0   0.2  0.3  0.5  0.1  0.2  0.2  0   0   0
0.3  0   0
   0    0.3   0.6   0    1    0.2   0    0    0    0.1  0.5  0   0   0.2  0   0   0
0.3  0   0
   0    0    1    0.8   0    0    0    1    0.2  1   1   0   0   0.1  0.1  0   0.1
0   0   0
   0    0    0    1    0.2   0    0.1   0    0.3  0   0   0.1  0.5  0.2  0.7  0.9  0
0.3  0.1  0.1
   0.5   0.2   0.1   0.2   0.2   0.3   0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
0    0    0
   0.1   0.7   0.2   0.5   0.7   0.1   0.1   0   0.2  0.3  0.5  0.1  0.2  0.2  0   0
0    0.3  0   0
   0    0.3   0.6   0    1    0.2   0    0    0    0.1  0.5  0   0   0.2  0   0   0
0.3  0   0
   0    0    1    0.8   0    0    0    1    0.2  1   1   0   0   0.1  0.1  0   0.1
0   0   0
   0    0    0    1    0.2   0    0.1   0    0.3  0   0   0.1  0.5  0.2  0.7  0.9  0
0.3  0.1  0.1
   ]';

YN=[5   0.2   0   0   2   0   0   0   03   0   0   0   0   2   0   0   0   03
0   0
   1   7   0   0   0   1   0   0   2   0   0   0   0   2   0   0   0   03   0
0
   0   1   6   0   1   2   0   0   0   1   0.5  0   0   2   0   0   0   03   0
0
   0   0   1   8   0   0   0   1   2   1   1   0   0   2   0   0   0   03   0
0
```

Ek-8. (devam) Şekil 6.2'den şekil 6.8'e kadar karmaşık düzlemde 24 üncü ana verilerinin $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ kararlılık değişimini $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları

```
  0   0   0   1   2   0   1   0   0   1   2   0   0   2   0   0   0   03   0
0
  1   7   0   0   0   1   0   0   2   0   0   0   0   2   0   0   0   03   0
0
  0   1   6   0   1   2   0   0   0   1   0.5 0   0   2   0   0   0   03   0
0
  0   0   1   8   0   0   0   1   2   1   1   0   0   2   0   0   0   03   0
0
  0   0   0   1   2   0   1   0   0   1   2   0   0   2   0   0   0   03   0
0
  1   7   0   0   0   1   0   0   2   0   0   0   0   2   0   0   0   03   0
0
  0   1   6   0   1   2   0   0   0   1   0.5 0   0   2   0   0   0   03   0
0
  0   0   1   8   0   0   0   1   2   1   1   0   0   2   0   0   0   03   0
0
  0   0   0   1   2   0   1   0   0   1   2   0   0   2   0   0   0   03   0
0
  1   7   0   0   0   1   0   0   2   0   0   0   0   2   0   0   0   03   0
0
  0   1   6   0   1   2   0   0   0   1   0.5 0   0   2   0   0   0   03   0
0
  0   0   1   8   0   0   0   1   2   1   1   0   0   2   0   0   0   03   0
0
  0   0   0   1   2   0   1   0   0   1   2   0   0   2   0   0   0   03   0
0
  0   0   0   1   2   0   1   0   0   1   2   0   0   2   0   0   0   03   0
0
```

Ek-8. (devam) Şekil 6.2'den şekil 6.8'e kadar karmaşık düzlemde 24 üncü ana verilerinin $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ kararlılık değişimini $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları

```
 1    7     0    0     0     1     0     0     2     0     0     0     0     2     0     0     0     03    0
0
   0    1     6    0     1     2     0     0     0     1     0.5   0     0     2     0     0     0     03    0
0
   ];


delta_x1=[
  0   5*pi/180    0      0      0       0]
delta_x2=[
  0       0      0      0      0       0]
delta_x3=[
  0   3*pi/180    0      0      0       0]
delta_x4=[
  0       0      0      0      0       0]
   AA=blkdiag(A1,A2,A3,A4);
   A=AA+B*inv(Y+YN)*C
   delta_x=[delta_x1 delta_x2 delta_x3 delta_x4]'
   [V,Landa]=eig(A)
   Landaa=eig(A)
   real(Landaa)
   imag(Landaa)
   figure(1)
   plot(real(Landaa),imag(Landaa),'*r')
   BB=zeros(6*n,k)
   CC=zeros(k,6*n)
   DD=zeros(k,k)
   SYS1=ss(A,BB,CC,DD)
   [y,t,x]=lsim(SYS1,u,t,delta_x');
   figure(2)
```

Ek-8. (devam) Şekil 6.2'den şekil 6.8'e kadar karmaşık düzlemde 24 üncü ana verilerinin $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ kararlılık değişimini $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları

```
plot(t,x(:,1),t,x(:,7),t,x(:,13),t,x(:,19))
 legend('G1','G2','G3','G4')
 title('D Omega')
 figure(3)
 plot(t,x(:,2),t,x(:,8),t,x(:,14),t,x(:,20))
 legend('G1','G2','G3','G4')
 title('D delta')
 figure(4)
 plot(t,x(:,3),t,x(:,9),t,x(:,15),t,x(:,21))
 legend('G1','G2','G3','G4')
 title('D Pesi_fd')
 figure(5)
 plot(t,x(:,4),t,x(:,10),t,x(:,16),t,x(:,22))
 legend('G1','G2','G3','G4')
 title('D V_1')
 figure(6)
 plot(t,x(:,5),t,x(:,11),t,x(:,17),t,x(:,23))
 legend('G1','G2','G3','G4')
 title('D V_2')
 figure(7)
 plot(t,x(:,6),t,x(:,12),t,x(:,18),t,x(:,24))
 legend('G1','G2','G3','G4')
 title('D V_s')
 xlabel('Time sec')
 format long
Landaa
```

Ek-9. Şekil 6.9'dan şekil 6.14'e kadar olan $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ parametrelerinde rotor açısını $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$ 'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları

```
clear all
clc
n=4
k=20
t=0:0.1:10;
u=0*ones(20,size(t,2));
%u=ones(20,size(t,2))*diag(sin(t))

A1=[0.1      -0.1092  -0.1236   0       0        0
   376.99  0        0        0       0        0
   0      -0.1938  -0.4229 -27.3172  0        27.3172
   0      -7.3125  20.8391 -50.0     0        0
   0      -1.0372  -1.1738   0      -0.7143    0
   0      -4.8404  -5.4777   0      26.9697  -30.3030]
A2=[0.2      -0.1092  -0.1236   0       0        0
   376.99  0        0        0       0        0
   0      -0.1938  -0.4229 -27.3172  0        27.3172
   0      -7.3125  20.8391 -50.0     0        0
   0      -1.0372  -1.1738   0      -0.7143    0
   0      -4.8404  -5.4777   0      26.9697  -30.3030]
A3=[0.05     -0.1092  -0.1236   0       0        0
   376.99  0        0        0       0        0
   0      -0.1938  -0.4229 -27.3172  0        27.3172
   0      -7.3125  20.8391 -50.0     0        0
   0      -1.0372  -1.1738   0      -0.7143    0
   0      -4.8404  -5.4777   0      26.9697  -30.3030]
A4=[0.03     -0.1092  -0.1236   0       0        0
   376.99  0        0        0       0        0
   0      -0.1938  -0.4229 -27.3172  0        27.3172
   0      -7.3125  20.8391 -50.0     0        0
```

Ek-9. (devam) Şekil 6.9'dan şekil 6.14'e kadar olan $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ parametrelerinde rotor açısını $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları

```
 0     -1.0372  -1.1738   0     -0.7143   0
  0     -4.8404  -5.4777   0     26.9697  -30.3030]
B=zeros(24,20)
C=eye(20,24);
D=zeros(24,20);

k=20;
Y=[ 0.5   0.2   0.1   0.2   0.2   0.3   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
0   0   0
  0.1   0.7   0.2   0.5   0.7   0.1   0.1   0   0.2  0.3  0.5  0.1  0.2  0.2   0   0
0   0.3  0   0
  0   0.3   0.6   0   1   0.2   0   0   0   0.1  0.5  0   0   0.2  0   0   0
0.3  0   0
  0   0   1   0.8   0   0   0   1   0.2  1   1   0   0   0.1  0.1  0   0.1
0   0   0
  0   0   0   1   0.2   0   0.1   0   0.3  0   0   0.1  0.5  0.2  0.7  0.9  0
0.3  0.1  0.1
  0.5   0.2   0.1   0.2   0.2   0.3   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
0   0   0
  0.1   0.7   0.2   0.5   0.7   0.1   0.1   0   0.2  0.3  0.5  0.1  0.2  0.2   0   0
0   0.3  0   0
  0   0.3   0.6   0   1   0.2   0   0   0   0.1  0.5  0   0   0.2  0   0   0
0.3  0   0
  0   0   1   0.8   0   0   0   1   0.2  1   1   0   0   0.1  0.1  0   0.1
0   0   0
  0   0   0   1   0.2   0   0.1   0   0.3  0   0   0.1  0.5  0.2  0.7  0.9  0
0.3  0.1  0.1
  0.5   0.2   0.1   0.2   0.2   0.3   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
0   0   0
```

Ek-9. (devam) Şekil 6.9'dan şekil 6.14'e kadar olan $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ parametrelerinde rotor açısını $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları

```
  0.1   0.7   0.2   0.5   0.7   0.1   0.1   0   0.2  0.3  0.5  0.1  0.2  0.2  0   0
0   0.3  0   0
  0   0.3   0.6   0   1   0.2   0   0   0   0.1  0.5  0   0   0.2  0   0   0
0.3  0   0
  0   0   1   0.8   0   0   0   1   0.2  1   1   0   0   0.1  0.1  0   0.1
0   0   0
  0   0   0   1   0.2   0   0.1   0   0.3  0   0   0.1  0.5  0.2  0.7  0.9  0
0.3  0.1  0.1
  0.5   0.2   0.1   0.2   0.2   0.3   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
0   0   0
  0.1   0.7   0.2   0.5   0.7   0.1   0.1   0   0.2  0.3  0.5  0.1  0.2  0.2  0   0
0   0.3  0   0
  0   0.3   0.6   0   1   0.2   0   0   0   0.1  0.5  0   0   0.2  0   0   0
0.3  0   0
  0   0   1   0.8   0   0   0   1   0.2  1   1   0   0   0.1  0.1  0   0.1
0   0   0
  0   0   0   1   0.2   0   0.1   0   0.3  0   0   0.1  0.5  0.2  0.7  0.9  0
0.3  0.1  0.1
  ]';

YN=[5   0.2   0   0   2   0   0   0   03   0   0   0   0   2   0   0   0   03
0   0
  1   7   0   0   0   1   0   0   2   0   0   0   0   2   0   0   0   03   0
0
  0   1   6   0   1   2   0   0   0   1   0.5  0   0   2   0   0   0   03   0
0
  0   0   1   8   0   0   0   1   2   1   1   0   0   2   0   0   0   03   0
0
```

Ek-9. (devam) Şekil 6.9'dan şekil 6.14'e kadar olan $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ parametrelerinde rotor açısını $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları

```
0 0 0 1 2 0 1 0 0 1 2 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 1 7 0 0 0 1 0 0 2 0 0 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 0 1 6 0 1 2 0 0 0 1 0.5 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 0 0 1 8 0 0 0 1 2 1 1 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 0 0 0 1 2 0 1 0 0 1 2 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 1 7 0 0 0 1 0 0 2 0 0 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 0 1 6 0 1 2 0 0 0 1 0.5 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 0 0 1 8 0 0 0 1 2 1 1 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 0 0 0 1 2 0 1 0 0 1 2 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 1 7 0 0 0 1 0 0 2 0 0 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 0 1 6 0 1 2 0 0 0 1 0.5 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 0 0 1 8 0 0 0 1 2 1 1 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 0 0 0 1 2 0 1 0 0 1 2 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 0 0 0 1 2 0 1 0 0 1 2 0 0 2 0 0 0 03 0
0
 1 7 0 0 0 1 0 0 2 0 0 0 0 2 0 0 0 03 0
0
```

Ek-9. (devam) Şekil 6.9'dan şekil 6.14'e kadar olan $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ parametrelerinde rotor açısını $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları

```
 0    1     6    0    1    2    0    0    0    1    0.5  0    0    2    0    0    0    03   0
0
   ];


delta_x1=[
 5*pi/180  0     0     0     0     0]
delta_x2=[
  0     0     0     0     0     0]
delta_x3=[
 3*pi/180  0     0     0     0     0]
delta_x4=[
  0     0     0     0     0     0]
   AA=blkdiag(A1,A2,A3,A4);
   A=AA+B*inv(Y+YN)*C
   delta_x=[delta_x1 delta_x2 delta_x3 delta_x4]'
   [V,Landa]=eig(A)
   Landaa=eig(A)
   real(Landaa)
   imag(Landaa)
   figure(1)
   plot(real(Landaa),imag(Landaa),'*r')
   BB=zeros(6*n,k)
   CC=zeros(k,6*n)
   DD=zeros(k,k)
   SYS1=ss(A,BB,CC,DD)
   [y,t,x]=lsim(SYS1,u,t,delta_x');
   figure(2)
   plot(t,x(:,1),t,x(:,7),t,x(:,13),t,x(:,19))
   legend('G1','G2','G3','G4')
```

Ek-9. (devam) Şekil 6.9'dan şekil 6.14'e kadar olan $\Delta\omega, \Delta\Psi_{fd}, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_S, \Delta\delta$ parametrelerinde rotor açısını $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$ 'ye kadar gösteren sistem yanıtının MATLAB kodları

```
title('D Omega')
figure(3)
plot(t,x(:,2),t,x(:,8),t,x(:,14),t,x(:,20))
legend('G1','G2','G3','G4')
title('D delta')
figure(4)
plot(t,x(:,3),t,x(:,9),t,x(:,15),t,x(:,21))
legend('G1','G2','G3','G4')
title('D Pesi_fd')
figure(5)
plot(t,x(:,4),t,x(:,10),t,x(:,16),t,x(:,22))
legend('G1','G2','G3','G4')
title('D V_1')
figure(6)
plot(t,x(:,5),t,x(:,11),t,x(:,17),t,x(:,23))
legend('G1','G2','G3','G4')
title('D V_2')
figure(7)
plot(t,x(:,6),t,x(:,12),t,x(:,18),t,x(:,24))
legend('G1','G2','G3','G4')
title('D V_s')
xlabel('Time sec')
format long
```

Landaa

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SABATI MOKARRAMI, Asghar
Uyruğu : İran
Doğum tarihi ve yeri : 21.03.1988/ Tebriz
Medeni hali : Bekar
Telefon : + 90 5382871482
e-mail : asghar.sabati@gmail.com
asker.sabati@europowerenerji.com.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	İran Tebriz Üniversitesi / Elektrik Mühendisliği-Transfer ve Dağıtım Ağları Bölümü	2011
Ön Lisans	İran Tebriz Üniversitesi, Elektroteknik Bölümü	2009
Lise	Endüstriyel Elektrik Güç Diploması/ Güney Azerbaycan(Tebriz)/ İran	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2019- Halen	Enerjisa Projesi Mobil Kompanzasyon Projesi(MKM) Üç Bölgede	Proje Yöneticisi

Yabancı Dil

Azerice, Farsça, Türkçe, İngilizce, Afganca, Arapça

Yayınlar

Sabati-Mokarrami, A., Bayindir, R., Basaran, K., Padmanaban, S., Siano, P. and Leonowicz, Z. (2017). *Investigating the Effects of Selecting Different Slack, Bus on Power Systems.* IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I ve CPS Europe), Milan, Italy.

Hobiler

Spor yapmak, kitap okumak, müzik dinlemek



GAZİ GELECEKTİR...

GAZİ ÜNİVERSİTESİ