

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



LIAPUNOV FONKSİYONLARI YARDIMI İLE GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZİ

Ahmet Turan HOCAOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK ANABİLİM DALI

66004

GEBZE

TEMMUZ 1997

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LIAPUNOV FONKSİYONLARI YARDIMI İLE GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZİ

Ahmet Turan HOCAOGLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı

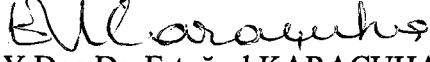
Yrd.Doç.Dr.Ertuğrul KARAÇUHA

GEBZE

TEMMUZ 1997

Bu tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14.07.1997 tarih ve 97/16 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında YÜKSEK LİSANS Tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE : 
(Tez Danışmanı) Y.Doç.Dr. Ertuğrul KARAÇUHA
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Mühendislik Fak. Elektronik Müh. Blm.

ÜYE : 
Prof.Dr. Selim AY
Yıldız Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fak. Elektrik Müh. Blm.

ÜYE : 
Y.Doç.Dr. Nizamettin AYDIN
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Mühendislik Fak. Elektronik Müh. Blm.

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
05/08/1997 tarih ve 97/12 sayılı kararı.





ÖZET

Liapunov fonksiyonu yalnızca bir güç sisteminin kararlılığının tahmininde kullanılmaz, aynı zamanda bir güç sistemindeki depolanan enerjiyi göstermek için de kullanılabilir. Burada sistemin enerji değişimini grafikselleştiren enerji fonksiyonunu kullanarak sistem yükünün yavaş değişiminin etkisi analiz edildi. Ayrıca, sistemde depolanan enerjinin ölçümü, çalışma noktasının sistemin kararsızlık bölgesine yakınlığının bir göstergesi olduğu sergilendi.

Bu çalışmanın birinci bölümünde konu ile ilgili geçmiş çalışmalar incelendi ve konuya giriş olması amacı ile bir temel oluşturuldu. İkinci bölümde ise gerilim kararlılığı, kararsızlığı ve çökmesi konuları işlenerek rotor açısı kararlılığı P-V, Q-V eğrileri gibi bazı kararlılık tespit metodları üzerinde duruldu ve geçici ve sürekli hal kararlılığı hakkında bilgiler verildi. Üçüncü bölümde ise Liapunov'un ikinci metodu geniş olarak anlatıldı, Liapunov'a göre kararlılık, kararsızlık, asimptotik kararlılık tanımları yapıldı ve Liapunov'un ikinci metodundan temellenen Krasovskii'nin metodu ve Schultz-Gibson'ın değişken gradient metodu anlatıldı. Dördüncü bölümde Liapunov'un 2. Metodunun bir jeneratör bir makine ve sonsuz bara sisteminde uygulanması incelenerek sistemin enerji fonksiyonu oluşturuldu ve buna göre analizler yapılarak enerji seviyesi grafiksel olarak gösterildi. Beşinci bölümde ise aynı olay 4 bäralı sisteme uygulandı ve yine sistemin enerji fonksiyonu oluşturularak bu enerji fonksiyonuna göre analizler yapıldı ve bu anlizlere göre depolanan enerji grafikleri çizildi. Sistemin sonuç bölümü olan altıncı bölümde bu uygulamaların bir değerlendirmesi yapılarak sistemin depolanan enerjisinden faydalanarak sistem kararlılığını bulma konusunda sonuç fikri verildi.

ABSTRACT

Lyapunov function is used to not only estimate the stability of a power system but also represent the energy stored in a power system. By using the energy function that maps the energy variation of the system, the effect of the slow change of the system is analyzed. It is demonstrated that the stored energy measure is an indicator of the closeness of the operating point to the instability region of the system.

Chapter one gives introductory statements over the background at the topic. In chapter two, voltage stability, voltage instability and voltage collapse are described, this chapter presents some stability methods such as rotor angle stability and P-V, Q-V curves. Transient stability and steady state stability are described in chapter four. Chapter three describes the second method of Liapunov Function, and stability, instability and asymptotic stability in the sense of Liapunov. We describe Krasovskii's method and Variable-Gradient method of Schultz-Gibson in the final portion of chapter three. Chapter four shows the investigation of Liapunov function in a one-generator and an infinite-bus system. We found the energy function of the system and did some analysis for the system. Finally, energy levels of the system are shown on graphics. Chapter five presents some analysis for the four-bus system. Again we found the energy function of the four-bus system and did some analysis. Finally energy levels of the four bus system are shown on graphics in chapter five. Chapter six concludes the work done in this study. We discussed results of the analyses and how the system stability in the sense of Liapunov.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında her türlü yardımı esirgemiyen ve iyi bir çalışma ortaya koyabilmem için çeşitli imkanlardan faydalanmamı sağlayan değerli hocam Yrd.Doç.Dr.Ertuğrul KARAÇUHA'ya, ve yine bu çalışmamda benden desteğini esirgemiyen hocam Yrd.Doç.Dr.Enğın EŞİYOK'a, tez konum üzerinde çalışma yapmak için gittiğim University of Wales-Cardiff (İngiltere) te araştırma yapma ve üniversitenin imkanlarından faydalanmamı sağlayan Güç Sistemleri bölüm başkanı Mr. Huw GRİFİTTHS'e ve onun şahsında güç sistem grubuna, yine İngiltere'de bulunduğum sırada bana her türlü desteği veren abim Hakan HOCAOĞLU ve ailesine bana her zaman moral destek olan eşim Feyza HOCAOĞLU'na ve bu çalışmam sırasında bana yardımcı olan bölümümüz araştırma görevlilerine, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ne ve diğer tüm yardımcı olan arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	VI
SİMGELER-KISALTMALAR DİZİNİ	IX
1.1. GİRİŞ	1
1.2. KONU HAKKINDA	1
1.3. STATİK ANALİZ VE ÇALIŞMA NOKTASI	2
2.1. GERİLİM KARARLILIĞI, GERİLİM ÇÖKÜŞÜ VE GÜVENİLİRLİK	5
2.1.1. Belirlemeler	5
2.1.2. Tanımlamalar	6
2.2. GERİLİM KARARSIZLIĞI İÇİN ZAMAN ARALIĞI VE MEKANİZMALAR	7
2.2.1. Mekanizmalar-Durumlar	7
2.2.2. Durum 1: Transient (geçici) gerilim kararlılığı	7
2.2.3. Durum 2: Uzun süreli gerilim kararlılığı	8
2.2.4. Durum 3: Uzun süreli gerilim kararsızlığı	9
2.2.5. Mekanizmalar-Yük dinamikleri, denge noktası ve çekicilik domeni	9
2.3. ROTOR AÇISI KARARLILIĞI İLE GERİLİM KARARLILIĞININ İLİŞKİSİ	11
2.4. ESKİ GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI	13
2.5. GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZLERİNE GİRİŞ: P-V EĞRİLERİ	13
2.6. GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZLERİNE GİRİŞ: V-Q EĞRİLERİ	14
2.6.1. V-Q eğrilerinin bir kaç avantajı	16
2.7. UZUN DÖNEM GERİLİM KARARLILIĞININ GRAFİKSEL AÇIKLAMASI	18
2.7.1. Yüksek oranlı motor yükü	18
2.7.2. Direnç yüklerinin yüksek oranı	20
2.7.3. Şönt kapasitör grubunun devreye eklenmesi ve çıkarılmasının etkisi	21
2.8. ÖZET	22
3.1. GİRİŞ	23
3.2. TANIMLAMALAR	23
3.2.1. Sistem	24
3.2.2. Bir Sistemin Yörüngesi	24
3.2.3. Bir sistemin Denge Noktası	25
3.2.4. Liapunov'a Göre Kararlılık	25
3.2.5. Asimptotik Kararlılık	26
3.2.6. Geniş Anlamda Asimptotik Kararlılık	26
3.2.7. Kararsızlık	26
3.2.8. Kararlılık, Asimptotik kararlılık ve Kararsızlığın grafiksel gösterimi	26
3.2.9. Skaler fonksiyonun pozitif definitliği	27
3.2.10. Skaler fonksiyonun negatif definitliği	28
3.2.11. Skaler fonksiyonun pozitif semidefinitliği	28
3.2.12. Skaler fonksiyonun negatif semidefinitliği	28
3.2.13. Skaler fonksiyonların indefinitliği	28
3.2.14. Quadratik formlar	28
3.3. LIAPUNOV'UN İKİNCİ METODU	29
3.3.1. Liapunov'un İkinci Metodu:	29
3.3.2. Liapunov'un Asıl Kararlılık Teoremi:	30
3.3.3. Teorem 1.	30
3.3.4. Yorum	31
3.3.5. Teorem 2.	31

3.3.6 Kararsızlık.....	31
3.3.7 Teorem-3.....	32
3.4. LİNEER SİSTEMLERİN KARARLILIK ANALİZİ.....	32
3.4.1 Lineer Zamandan Bağımsız Sistemlerin Liapunov Kararlılık Analizleri.....	33
3.4.2 Teorem-4.....	34
3.5. NONLİNEER SİSTEMLERİN KARARLILIK ANALİZİ.....	35
3.5.1 Krasovskii'nin Metodu.....	36
3.5.2 İspat.....	37
3.5.3 Değişken Gradient Metod.....	38
3.6. SONUÇLARIN YORUMLANMASI.....	40
4.1. TEK MAKİNA TEK JENERATÖR VE SONSUZ BARA İÇİN DİNAMİK ANALİZ VE ENERJİ FONKSİYONU.....	41
4.2. GRADIENT SİSTEMİ KULLANARAK LIAPUNOV FONKSİYONUN ARAŞTIRILMASI.....	43
4.3. BASİT BİR GÜÇ SİSTEMİ İÇİN LIAPUNOV FONKSİYON FORMUNA GRADIENT SİSTEMİN TANIMLANMASI.....	43
4.4. TEK MAKİNE VE SONSUZ BARA SİSTEMİ İÇİN ANALİZLER.....	45
4.4.1. Analiz 1.....	45
4.4.2. Analiz 2.....	45
4.4.3. Analiz 3.....	45
4.5. DEPOLANMIŞ ENERJİ VE YÜK.....	46
4.6. ANALİZ 1: JENERATÖR ROTOR AÇISI $\delta_m=0.8\text{rad.}$, SİSTEMİN FREKANSI $w=1\text{p.u.}$	46
4.7. ANALİZ 2: JENERATÖR ROTOR AÇISI $\delta_m=1.6\text{rad.}$, SİSTEM FREKANSI $w=1\text{p.u.}$	49
5.1. 4 BARALI SİSTEMİN İNCELENMESİ.....	51
5.2. GRADIENT SİSTEMİ KULLANARAK LIAPUNOV FONKSİYONUN ARAŞTIRILMASI.....	53
5.3. GRADIENT SİSTEMİN 4 BARALI SİSTEME UYGULANMASI.....	54
5.4. 4 BARALI SİSTEM İÇİN ANALİZLER.....	55
5.4.1. Analiz 1.....	55
5.4.2. Analiz 2.....	55
5.4.3. Analiz 3.....	55
5.5. ANALİZ 1: 3 NOLU BARDAKİ YÜK SABİT İKEN.....	56
5.6. ANALİZ 2: 4 NOLU BARADAKİ YÜK SABİT İKEN.....	59
6.1. TEK MAKİNA TEK JENERATÖR VE SONSUZ BARA SİSTEMİ İÇİN SONUÇ.....	63
6.2. 4 BARALI SİSTEM İÇİN SONUÇ.....	64
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	66
EKLER.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	76

SİMGELER-KISALTMALAR DİZİNİ

Y_0 = Sonsuz bara admitansı
 E_0 = Sonsuz bara gerilimi
 θ_0 = Sonsuz bara admitans açısı
 Y_m = Senkron jeneratör admitansı
 E_m = Senkron jeneratör gerilimi
 θ_m = Senkron jeneratör admitans açısı
 C = Kapasite
 V = Yük gerilimi
 δ = Yük açısı
 δ_m = Senkron jeneratör açısı
 P_L = Aktif güç
 Q_L = Reaktif güç
 V = Yük barasındaki bara gerilimi
 P_0 = İlk mekanik güç
 w = Sistem frekansı
 H = Sistemin durum değişkenleri
 T = Sıcaklık
 G = İletkenlik
 R = Direnç
 s = Motor kayması
 n = Ayarlı trafo değişkenleri
 K_{qw} = Jeneratör sabiti
 K_{qv} = Jeneratör sabiti
 K_{qv2} = Jeneratör sabiti
 K_{pw} = Jeneratör sabiti
 K_{pv} = Jeneratör sabiti
 P_0 = Dengede sistem aktif yükü
 Q_0 = Dengede sistem reaktif yükü

BÖLÜM 1.

1.1. GİRİŞ

Enerji kavramı, mühendisler tarafından çokça kullanılır ve kolayca anlaşılır. Liapunov'un ikinci metodu genelleştirilmiş bir enerji metodu olarak görülebilir. Güç sistem uygulamalarında Liapunov'un ikinci metodunun kullanımı hakkındaki yayınlar son yirmi yıldır iki ana konu üzerinde odaklanmıştır. Birincisi, güç sistemi için gerekli dinamik modelin seçilmesi ve bu model için uygun bir Liapunov fonksiyonunun bulunmasıdır, ikincisi ise, bölgesel kararlılık özellikleri hakkındaki bilgiler veya daha yaygın olarak verilen bir çalışma noktası ile birleştirilen çekicilik bölgesinin tahmini tesbiti için Liapunov fonksiyonunun kullanılabilirliğidir. Ancak, biz burada verilen bir güç sistemindeki depolanmış enerji konulu çalışmalar üzerine yoğunlaşacak ve ayrıca Liapunov teoremi ile kararlılık bölgesini araştıracağız.

1.2. KONU HAKKINDA

İnsanoğlu'nun araştırmacılığı ve daha iyiye ulaşma isteğinden dolayı teknolojiye çok hızlı gelişmeler elde edilmektedir. Bu gelişmeler ortaya daha fazla iş çıkarmakta ve daha fazla iş daha fazla enerjiye gereksinim duymaktadır. Böylece çağımızın en pratik ve en çok kullanılan enerjisi olan elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç da her geçen gün artmaktadır. Bu sebepten, mevcut olan elektrik enerjisi üretimi ve ihtiyaç noktalarına iletimi için gerekli olan iletim hatlarının her geçen gün geliştirilip büyütülmesi gerekmektedir. Elektrik enerjisine duyulan ihtiyacın her yıl ne şekilde arttığını gösteren ve ileriye dönük tahminlerin yapıldığı bir araştırmaya [1] de yer verilmiştir. Güç sistemlerinin böyle büyümesi bir çok problemde beraberinde getirmektedir. Bu konu üzerinde bir araştırma olan [2] deki çalışma arıza akımı seviyesinin tespiti üzerinde durmuş ve bununla elektrik istasyonlarındaki topraklama sistemlerinin performans tahminindeki yeri incelenmiştir. Biz buradaki çalışmada tek makine tek jeneratör ve sonsuz bara sistemi ile iki jeneratör ve iki makinadan oluşan dört baralı bir başka sistem için gerilim kararlılığı problemini inceliyeceğiz ve bunu Liapunov fonksiyonları yardımı ile sistemin depolanmış enerji seviyesinin tespiti ile yapacağız.

Çoktanberi biliniyorki, güç sistemleri ve özellikle salınım dinamikleri için basit modeller sahip oldukları özel yapıları ile Liapunov fonksiyonlarının yapılarını kendi kendilerine oluştururlar. Örneğin [3] de güç sistem denklemleri "yaklaşık Hamiltonian" olarak sınıflandırılmıştır. Son zamanlarda, güç sisteminin dinamik tanımlamasında, daha detaylı modeller içermesi için çalışmalar yapıldığından, bazı yazarlar verilen bir dinamik model için hangi şartlar altında bir Liapunov fonksiyonu oluşturmak mümkündür diye araştırma yaptılar. Bu problemle ilgili bir negatif sonuç [4] de incelenmiştir, daha optimistik fakat bölgesel bir sonuç da [5] de gösteriliyor.

Açıkçası, ne zaman bir Liapunov fonksiyon elde etmek mümkündür sorusu ile özel güç sistem modelleri için Liapunov fonksiyonlar oluşturma ve ilgili algoritmaların bulunması problemi birleştirildi. Literatürde, bir çok durumda formal olmayan algoritmalar kullanılıyor. Hatta bir Liapunov fonksiyon adayı önerilir ve onun özellikleri kontrol edilir. Bu yaklaşımdan iki ana ayrılık [4], [7], [8], [9] da yapılan çalışmalardır ve [4] de Moore-Anderson teoreminden elde edilen Liapunov fonksiyon yapısının bir modifikasyonu kullanılır. ikinci çalışma [10] Liapunov fonksiyon adayı ile doğrulanan kısmi diferansiyel denklemlerinin bir sistemini oluşturur ve bir çözüm elde etmek için La-Grange-Charpit metodunu uygular. Bu metodların ikisinde açıktırki, diferansiyel denklemlerin aşağıdaki tespitinin bazı özellikleri gereklidir. Örneğin [11] de transfer iletkenlikler için Moore-Anderson teoreminin pozitif reel hipotezlerini sağlamadaki başarısızlığı belirtiyor.

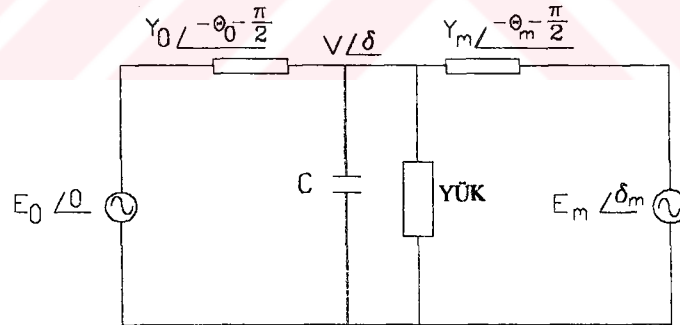
Burada inceliyeceğimiz problemler şunlardır;

1. Tek makine tek jeneratör ve sonsuz bara sisteminin kurulması.
2. İki jeneratör ve iki makinadan oluşan dört baralı sistemin kurulması.
3. Güç sisteminin enerji gösterim modeli: Kararlılık için Liapunov'un ikinci metodunun düşünülmesi. Güç sisteminin enerji fonksiyonunu göstermek için bir Liapunov fonksiyonun kullanılması.

Liapunov fonksiyon oluşturmak için gradient metodun kullanılması.

4. Yük açısı ve yük gerilimine göre güç sistemindeki enerji değişimlerinin analizi.

1.3. STATİK ANALİZ VE ÇALIŞMA NOKTASI



Şekil1- 1: Güç sisteminin basit bir örneği

Şekil1- 1 deki parametre degerleri Ekler deki tablo 13 de veriliyor ve parametrelerin tanımları aşağıdaki gibidir.

Y_0 = Sonsuz bara admitansı

E_0 = Sonsuz bara gerilimi

θ_0 = Sonsuz bara admitans açısı

Y_m = Senkron jeneratör admitansı

E_m = Senkron jeneratör gerilimi

θ_m = Senkron jeneratör admitans açısı

C = Kapasite

V = Yük gerilimi

δ = Yük açısı

δ_m = Senkron jeneratör açısı

Şekil1-1 Thevenin eşdeğer devresi yardımıyla tek makine tek jeneratör ve sonsuz bara sisteminin basitleştirilmiş versiyonudur. Yük barasında bulunan yükün sabit P-Q talebi olarak gösterildiğini farz edeceğiz. Aşağıdaki analiz ile P ve Q nun durumunu, gerilim barasının bir fonksiyonu olarak ifade edilebileceği görülür. Yük barasındaki güç akış denklem sonuçları:

$$P_L + E'_0 Y'_0 V \sin(\delta + \theta'_0) + E_m Y_m V \sin(\delta - \delta_m + \theta_m)$$

$$-(Y'_0 \sin(\theta'_0) + Y_m \sin(\theta_m)) V^2 = 0$$

1- 1

$$Q_L - E'_0 Y'_0 V \cos(\delta + \theta'_0) - E_m Y_m V \cos(\delta - \delta_m + \theta_m)$$

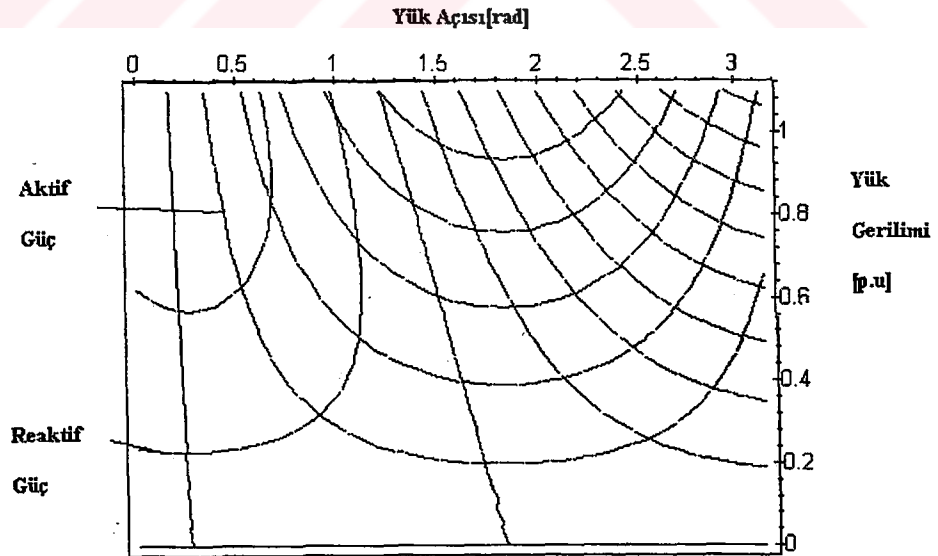
$$+(Y'_0 \cos(\theta'_0) + Y_m \cos(\theta_m)) V^2 = 0$$

1- 2

Burada

V = Yük barasındaki bara gerilimi büyüklüğü

δ = Yük barasındaki faz açısı



Şekil1- 2: Aktif ve reaktif güç ilişkileri ve çalışma noktaları

P ve Q değerlerinin herhangi bir aralığı için bu kısıtlamaları karşılayan δ -V uzayındaki noktaların yeri şekil1-2 de gösteriliyor. Bu diagram, [12] de tanımlanan

klasik gerilim veya güç faktör eğrilerindeki herhangi bir değişim olarak düşünülebilir

Sabit gerilim gönderen bir radyal hattın alınan son gerilimi için iki çözüm vardır. Bu herbiri bir güç akış çözümünün karşılığı olan P ve Q sınırlamalarının iki tipik kesişimi ile şekil-2 ye yansıtılır. Bu iki çözüm “Yüksek gerilim çözümü” ve “Alçak gerilim çözümü” olarak adlandırılabilir ve bunlar gerilim büyüklüklerinin nisbi değerleri ile birbirlerinden ayrılabilirler.

P ve Q nun kesişim noktalarında bir çözüm var. Dolayısıyla bu noktalarda güç akışı söz konusudur. Bu noktada, bu iki güç denge denkleminin jakobiye tekil olmalıdır. Bu gözlem gerilim çöküş analizinin var olan başlıca metodlarını doğrulamak için kullanılmıştır. [13] de ve sonra [18] de, çok baralı bir şebeke için olan güç akış denklemlerinde oluşacak olan bu basit örnekte gözlenen sınır noktası (bifurcation) olayını belirten güç akış denklemleri için sınır noktası analizleri gerçekleşir. [14], [15], [16], [17] de diğer bir çok yazar gerilim çöküşünün başlangıcının testi için yüksek gerilim çözümünde (veya bir kapalı bağlantı ölçüsünde) güç akış denklemlerinin jakobieninin tekilliğini önermişlerdir. Özellikle [17] de gerilim çöküşüne yakınlık miktarının ölçüsü için yük akış denklemlerinin jakobieninin en küçük tekil değerinin kullanımı öneriliyor. Gerilim çöküşü ile birleştirilen şartların tanımı için, tamamen statik bir çatının yeterli olmadığı önerilmiştir. [13] de gerilim kararlılığı probleminin semi-dinamik yapısı tartışılmıştır.

Daha yakınlarda [6-14] ve [18] de özel yük dinamikleri veya gerilim kontrol dinamiklerinin göz önüne alınması öneriliyor. Bu incelemeler ışığında soru şu şekilde olur, kritik noktaya yakınlık miktarı için sistemin uygun dinamikleri ile ilgili bilgileri nasıl kullanırız? Bunu ileriki bölümlerde göreceğiz.

BÖLÜM 2.

GERİLİM KARARLILIĞI NEDİR?

Bu bölümde asıl konumuz olan gerilim kararlılığı (voltage stability) nı inceliyeceğiz. İlk önce bazı tanımlamalar yapacağız, sonra gerilim kararsızlığı (voltage instability) nın işlemlerini ve bunun rotor açısı kararlılığı ile ilişkisini tanımlıyacağız. Daha sonra gelişmiş güç sistemlerinde gerilim kararlılığı probleminin nedenlerini tartışacağız. Bu bölümü gerilim kararlılığı analizlerinde kullanılan P-V ve Q-V eğrilerinin analizlerine giriş ile bitireceğiz.

2.1. GERİLİM KARARLILIĞI, GERİLİM ÇÖKÜŞÜ VE GÜVENİLİRLİK

2.1.1. Belirlemeler

Gerilim kararlılığı konusu, diğer bir çok konuyu da kapsar. Çünkü gerilim kararlılığı farklı mühendislik dalları için farklı anlamlara sahiptir. Gerilim kararlılığı asenkron ve senkron motorlar içeren, air condition yükler veya HVDC linkler (hatlar) içeren çalışmalar için hızlı bir olaydır. Diğer çalışmalar için ise yavaş bir olay olarak sınıflandırılır. (örneğin mekanik ayarlı trafo (tap changer) içeren yüklerde). Mühendisler ve araştırmacılar, gerilim kararlılığının statik veya dinamik bir olaydır müzakeresi ile uygun analiz metodlarını tartışıyorlar.

Bir çok araştırmacı tarafından gerilim kararsızlığı ve gerilim çöküşü, genellikle aynı manada kullanılmaktadır.

Gerilim kararlılığı veya gerilim çöküşünün, statik (yük akış) analizler için bir steady state (sabit durum) problemi olarak görülmesi uygundur. Sabit çalışma şartları esnasında üretim yerinden tüketim yerine reaktif güç transfer kabiliyeti gerilim kararlılığının konusudur. Bir 1987 CIGRE raporu [1] analiz metodları ve güç sistem planlama yaklaşımlarının statik modellerde temellendiğini ileri sürer.

Şebekenin maksimum güç transfer limiti ile gerilim kararlılığı limiti aynı şeyler değildir.

Gerilim kararlılığı veya çöküşü bir dinamik prosestir. “Kararlılık” kelimesi bir dinamik sistem ifade eder. Güç sistemi bir dinamik sistemdir. Rotor açısı (senkron) kararlılığı ile başlıca dinamiklerin içerdiği yükler ve gerilim kontrol vasıtaları arasında çok büyük farklılıklar olduğunu göreceğiz. Gerilim kararlılığı yük kararlılığı olarak da adlandırılır[2].

2.1.2. Tanımlamalar

Gerilim kararlılığı tüm güç sistem kararlılığının bir alt setidir. Biz burada CIGRE [3] de geliştirilen tanımlamalara göre hareket edeceğiz. Bu belirlemeler referans [4, 5, 6 ve 7] nin içeriğinden oluşur. Bu kararlılık belirlemeleri diğer dinamik sistemler için olan kararlılık belirlemeleri ile aynıdır.

Bir güç sisteminde, eğer yüklere yakın gerilimlerde herhangi bir küçük bozucu etki (disturbance) oluşursa, ilk bozucu etki değerleri ile aynı veya bunlara yakın ise bu güç sistemi “küçük bozucu etkili gerilim kararlıdır” denir. (“küçük bozucu etkili gerilim kararlılığı”, sistem köklerinin negatif reel kısımları ile linerize edilmiş dinamik modele uygundur. Analiz amaçlı olarak, otomatik olmayan ayarlı trafolar ile modellenenirler.)

Verilen bir çalışma noktası ve bozucu etki şartları altındaki bir güç sistemi, eğer gerilimlere yakın yükler, bozucu etki sonrası denge değerlerine yakın ise bu güç sistemi gerilim kararlıdır. Bu bozucu etki ile oluşan durum bozucu etki sonrası kararlı dengenin çekim bölgesi içindedir.

Eğer bozucu etki sonrası denge gerilimleri kabul edilebilir limitlerin altında ise verilen çalışma durumundaki bir güç sisteminin durumu ve verilen bozucu etkilere katlanmanın konusu gerilim çökmesidir. Gerilim çökmesi genel (blackout) veya kısmi olabilir.

Gerilim kararsızlığı, gerilim kararlılığının olmaması olarak tanımlanır ve gerilimin dereceli olarak azalmasına (veya artmasına) neden olur. Yeniden kararlı yapmak için, sistemi kontrol limitleri içine getirmek veya diğer kontrol işlemlerini (örneğin yük çıkarmak gibi) devreye sokmak gerekir, böylece global kararlılık kurulabilir.

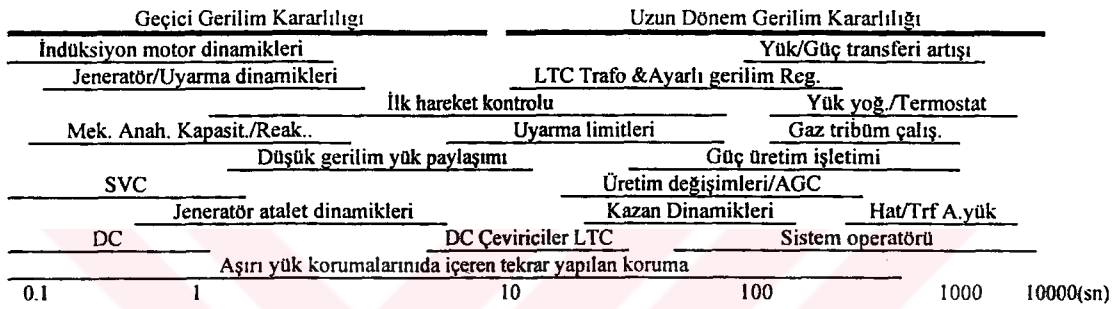
Gerilim kararlılığı normalde büyük bozucu etki içerir (yük veya güç transferindeki hızlı artışlar da içerir). Ayrıca kararsızlık hemen hemen daima gerilimdeki periyodik olmayan azalmadır. Salınımlı gerilim kararsızlığı ile de zaman zaman karşılaşılabilir.[8] Fakat bu kontrol kararsızlığı için geçerli değildir. Kontrol kararsızlığı, örneğin, statik VAR kompensatörde çok yüksek artış durumunda veya gerilim rölesi ile kontrol edilen bir şönt kapasitör grubunda çok küçük bir ölütand olması durumunda olabilir. Aşırı gerilim durumu ve tahrik makinalarının self-uyarımı gibi kararsızlık durumları bu belirlemelerin dışındadır. Normalde aşırı gerilim bir tehzat probleminden ziyade bir sistem kararlılık problemidir.

Güvenilirlik (Voltage security) terimi yalnızca bir sistemin çalışma kararlılığı değil aynı zaman da olması mümkün ihtimaller veya yük artışları için bir sistemin kararlılığını koruma kabiliyetidir[9]. Genellikle bunun anlamı, olması mümkün ihtimaller, çalışma noktasından gerilim kararsızlığı noktasına (veya maksimum güç transfer noktasına) kadar olan büyük sınırlar içerisindedir.

2.2. GERİLİM KARARSIZLIĞI İÇİN ZAMAN ARALIĞI VE MEKANİZMALAR

Gerilim kararsızlığı ve çökme dinamikleri saniyelerden dakikalara uzanan bir zaman periyodu içerisinde yer alır. Zaman cevabı tablosu dinamik olayların tanımlanmasında kullanılır [10,11]. Bir çok güç sistem elemanının ve kontrolünün gerilim kararlılığında oynadığı rolü gösterir. Ancak yalnızca bazıları özel bir olaya veya duruma katılacaklardır. Sistem karakteristikleri ve bozucu etkiler hangi olayların daha önemli olduğunu belirleyecektir.

Şekil2-1 gerilim kararlılığının geçici (transient) ve uzun dönem (longer term) zaman aralığı sınıflandırmasını gösterir. Hemen hemen her zaman iki zaman aralığı arasın da ayrılık vardır.



Şekil2- 1: Gerilim kararlılığı olayları ve zaman cevapları.

2.2.1. Mekanizmalar-durumlar

Şimdi bölüm girişinde, temel fikri anlatılan gerilim kararlılığının iki sınıfı tanımlanacak. Burada üç durum tanımlanacak.

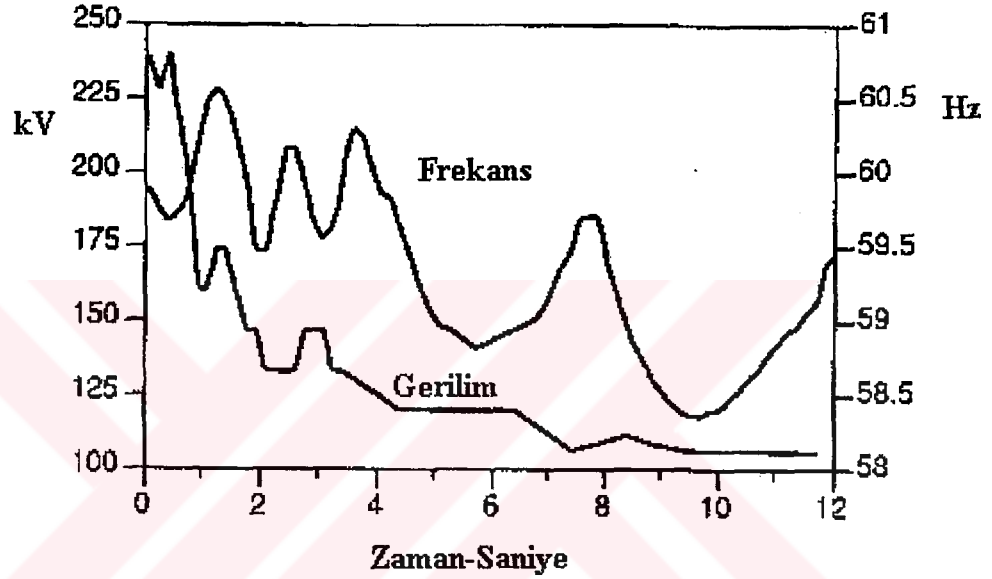
2.2.2. Durum 1: Transient (geçici durum) gerilim kararlılığı

Zaman aralığı 0 ile 10 saniye arasındadır, bu aynı zamanda transient rotor açısı kararsızlığının zaman aralığıdır. Gerilim kararsızlığı ile rotor açısı kararsızlığı arasındaki fark her zaman açık değildir ve her iki olay birlikte var olabilir. Gerilim çöküşü senkronizm kaybının nedeni midir veya senkronizm kaybı gerilim çöküşünün nedeni midir? Sorularına cevap vermeye çalışılacaktır. Gerilim çöküşü indüksiyon motorlar ve DC çeviriciler gibi yük elemanlarının uygun olmayan hareketlerinden dolayı olur.

Aşırı gerilim dipler için (yavaşça temizlenen kısa devreler esnasında), indüksiyon motorların reaktif güç talepleri artar, koruma elemanları ve AC kontaktörler, motorları devre dışı bırakmazsa bu artış gerilim çökmesine neden olur (Bu indüksiyon motorların kararsızlığı olarak adlandırılır[12]). Arızayı takiben; motorlar yeniden hızlanmada zorlanır, stall-prone (durmadaki) motorlar diğer yakın motorların da durmasına sebep olabilir. Simulasyon yaparken, motorlar dinamik elemanlar olarak gösterilmelidir. Şönt kapasite gruplarının kompanzasyon

karakteristikleri de problemlerin büyümesine yol açar (reaktif güç geriliminin karesi ile orantılıdır).

Elektrik kapalı devrelerinde (electrical islands) ve düşük frekanslarda yük paylaşımında eğer dengesizlik %50 den büyük ise muhtemelen gerilim çöküşü olur. Gerilim düşüşü frekans düşüşünden daha hızlıdır. Bu gerilim düşüşü, gerilime hassas yükleri, frekans düşüşünün yavaşlamasını ve düşük frekanslarda yük paylaşılmasını etkiler. Ayrıca gerilim düşmesi düşük frekans rölelerinin çalışmamasına neden olabilir. Düşük gerilim yük paylaşımı gerekebilir. Şekil2- 2 de Floridadaki küçük bir olay gösteriliyor ve burada gerilim çöküşü düşük frekans yük paylaşımının set noktaları için frekans düşüşünden önce oluyor. İndüksiyon motor yükleri, güç üretimindeki yardımcı motorlar bu olayda önemli bir yere sahipti.



Şekil2- 2: Güney Florida'daki genel gerilim çökmesi için gerilim ve frekans eğrisi (17 Mayıs 1985) [13]

Geçtiğimiz yıllarda, yüksek gerilim doğru akım (HVDC) hatlarının gerilim bakımından zayıf güç sistemleriyle bütünleşmesi transient gerilim kararlılığı problemine sebep olduğu durumlar ile karşılaşıldı [14]. Örnek olarak, zor şartlar ve büyük bozucu etkiler için simülasyonlar Güney California'da gerilim çöküşü eğilimi gösterdi, bu eğilim Los Angeles'a yakın iki büyük çevrim istasyonundan kaynaklandı. Bazen (senkronizm gücünün artması pahasına) gerilimleri desteklemek için DC gücü (ve gelecek çevirimdeki reaktif gücü) azaltmak gereklidir.

2.2.3. Durum 2: Uzun süreli gerilim kararlılığı

Zaman aralığı birkaç dakikadır, 2-3 dakika kadar. Sık sık operatör müdahalesi mümkün değildir. Terimler "mid-term" kararlılığı ve "post transient" veya "post disturbance" kararlılığı olarak kullanıldı.

Bu durum; büyük güçler, uzak jeneratörden büyük güç transferi ve ani bir büyük bozucu etkiyi konu eder. Bu sistem yükün gerilim hassasiyetinden dolayı

geçici olarak kararlıdır. Bu bozucu etki (ki bu bozucu etki yük bölgesinde büyük jeneratörlerin kaybı veya başlıca iletim hatlarının kaybı olabilir) yük bölgesinde büyük reaktif güç kayıplarına ve gerilim sarkmalarına (voltage sags) sebep olur. İletim sistemlerindeki LTC (yük altında ayarlı trafo) ler ve dağıtım sistemlerindeki gerilim regülatörleri düşük gerilimi hisseder ve dağıtım sistemi gerilim seviyesini düzeltirler dolayısıyla bu yükün güç seviyesini düzeltir.

Yük restorasyonları iletim gerilimlerinin daha sonraki sarkmalarına neden olur. Yakın jeneratörler aşırı yüklenir ve aşırı uyarılırlar, fakat aşırı yük taşıma kapasitesinin zamanı (bir-iki dakika) dolarken, aşırı uyarım limitleri (veya santral operatörleri) orijinal akım değerlerine geri dönerler. O zaman daha uzaktaki jeneratörler reaktif güç ihtiyacını karşılamalıdır. Ancak bu etkisiz ve yetersizdir. Üretim ve iletim sistemi, yükleri ve reaktif kayıpları daha fazla besleyemez ve böylece gerilim hızlı bir şekilde düşer. Bunu kısmi veya komple gerilim çökmesi takip eder. Bu son adım indüksiyon motorlarının durması ve koruma elemanlarının çalışmasını da içerebilir. Yükün tipine bağlı olarak (alçak gerilimde devre dışı bırakılmış yüklerde dahil) çökme kısmi veya komple olabilir.

2.2.4. Durum 3: Uzun süreli gerilim kararsızlığı

Bu kararsızlık yine uzun süreli zaman periyodu üzerinde gelişir ve çok büyük yük artışı ile (gündüz ve akşamın yoğun saatlerinde) veya büyük hızlı güç transfer artışı ile olur. Bu güç artışı Megawatt/dakika seviyesinde ölçülür ve çok hızlı olabilir. Operatör faaliyetleri, mesela reaktif güç elemanlarının zamanlı kullanımı veya yük paylaşımları, kararsızlığa engel olmak için gerekli olabilir. İletim hatlarının zaman aşırı yük limitleri (on dakikalarda) ve alçak gerilim için yük diversitesi (çeşitlilik) nin kaybı (enerjinin sabitliği ve termostatla kontrol edilen yükler sebebiyle) gibi etkiler önemli olabilir. Bu kararsızlığın son adımı durum 2 de tanımlanan daha hızlı elemanların hareketlerini içerir.

Çeşitli sistem cihazları (Şekil2- 2) ve zaman limitleri arasında bir çok etkileşim vardır. Örneğin gerilimlerin ayarlı trafo regülasyonu, sabit enerji yüklerinin termostatik regülasyonu ile diversite kaybı önlenir. Diğer bir örnek ise, aşırı uyarımın sınırlayıcılarının çalışması normal jeneratör gerilim regülasyonunu önler.

2.2.5. Mekanizmalar-Yük dinamikleri, denge noktası ve çekicilik domeni

Gerilim kararlılığına yük kararlılığı denir. Bu “yük”, iletim sistemlerinin yüksek gerilim baralarında görülen yüküdür ve alt iletim ve dağıtım sistemlerinin etkilerini içerir. Gerilim düşmesinden dolayı geçici olarak azaltılan yüklerin restorasyonu, gerilim kararlılığının önemli unsurlarından biridir.

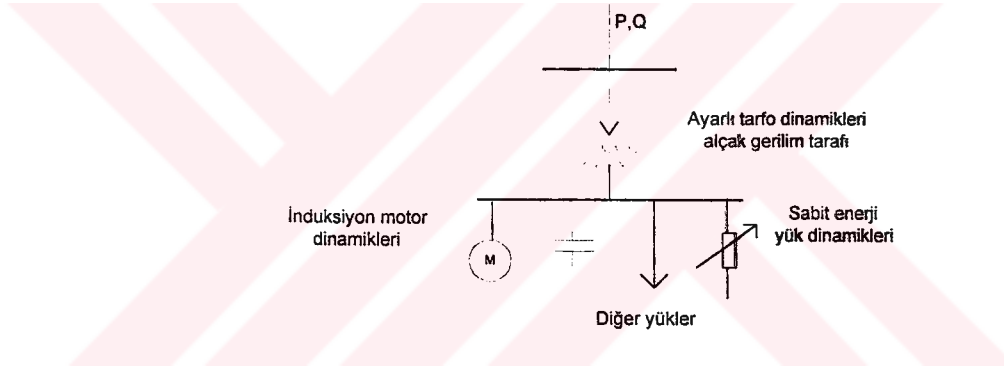
Aktif (reel) yük üç şekilde restore edilir:

1. İndüksiyon motorlar gerilimdeki ani değişiklikleri takip eden bir kaç saniye içerisinde mekanik yükleri eşlemek için hızlıca cevap verir. Kaynaktaki bir ani değişikliğin hemen ardından, indüksiyon motorların hareketleri empedans yükler gibi olacaktır, bu iyi bilinen benzer devrelerden açıkça belirlidir, düşünülürse; kayma motorun ataletinden dolayı ani olarak değişemez. Yavaş

gerilim kayıpları için, hızlı cevap veren motorlar diğer elemanların yavaş dinamiklerini takip eder ve sabit aktif güç yükler gibi hareket eder.

2. Güç iletim transformatörlerinin otomatik ayarlı trafoları ve dağıtım sistemi regülatörleri yük geriliminin normal değerine yükseltilmesi ve onların gerilim hassasiyetli yükleri için saniyelerden dakikalara bir zaman skalası içerisinde çalışır. Yükün reaktif gücü ve şönt kapasitörün reaktif güç çıkışı da yeniden düzenlenir.
3. Sabit enerjili direnç yükler termostatik veya manual kontrol ile yeniden düzenlenir. Belli gruptan yükler için bir zaman aralığı üzerinde yük çeşitliğinin kaybında bu sonuçlar bir gerilim azalmasını takip eder.

İlk yaklaşım olarak, yük restorasyon mekanizmasının bu üç dinamiği birinci dereceden bir olaydır ve tek bir zaman sabiti kullanılarak modellenilebilir. (Ölü-band, gerilim ve zaman rölesi ve parçalı (dicrete) taplar içeren gerilim ayarı sistemleri için bu yaklaşım oldukça kabardır.) Her ne kadar zaman sabitleri farklıysada, eşitlikler formda aynıdır ve yük restorasyon mekanizmaları kavram analizleri için birleştirilebilir [6,7]. Bu üç tip yük bir güç dağıtım yük barası gövdesinde Şekil2- 3 de olduğu gibi gösterilebilir.



Şekil2- 3: Gerilim hassasiyetli yüklerin restorasyonu için 3 mekanizma [7]

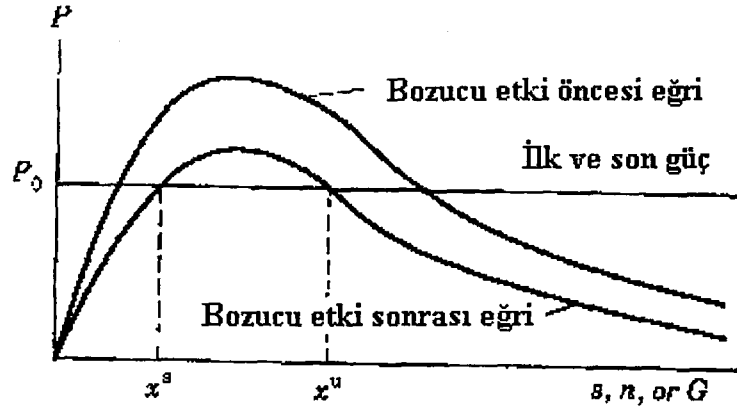
Bu üç yük restorasyon mekanizmasının birinci dereceden durum değişkenleri, motor kayması (s), ayarlı trafo durum değişkenleri (n) ve yük kondüktansı (G) gibi ilişkilerle alınabilir. Her durum değişkeninin sıfırdan artması gibi, yük gücü artar, maksimuma ulaşır ve sonra düşer (Şekil2- 4). Durum değişkenleri artarken, gerilim monoton olarak azalır.

İndüksiyon motorlar için, Şekil2- 4 bilinen torque-kayma eğrileri gibidir. Uygulanabilen birinci dereceden diferansiyel eşitlik:

$$2Hw \frac{ds}{dt} = P_0 - P_e$$

2-1

burada P_0 ilk mekanik güç olup, basitleştirmek için sabit kabul edilir.



Şekil2- 4: Güç, yük dinamiklerinin durum değişkenlerine karşı [7].

Kararlılığı takibeden bir büyük bozucu etki için, kaynak sistem konfigürasyonunun son andaki kayması kararlılık denklik noktası, x^s in “çekicilik bölgesi” içinde olmasını gerektirir. Bu bölgenin çekiciliği kararsızlık denge noktası x^u ya kadar uzanır. x^s ve x^u arasındaki bölge için 2-1 eşitliğine müracaat edilir, çünkü P_e, P_0 dan daha büyüktür ve motor x^s için hızlanacaktır (kayma azalacak).

Termostatik olarak kontrol edilebilen ısı yüklerin büyük bir kısmı için uygulanabilecek bir eşitlik:

$$T \frac{dG}{dt} = P_0 - V_L^2 G$$

2-2

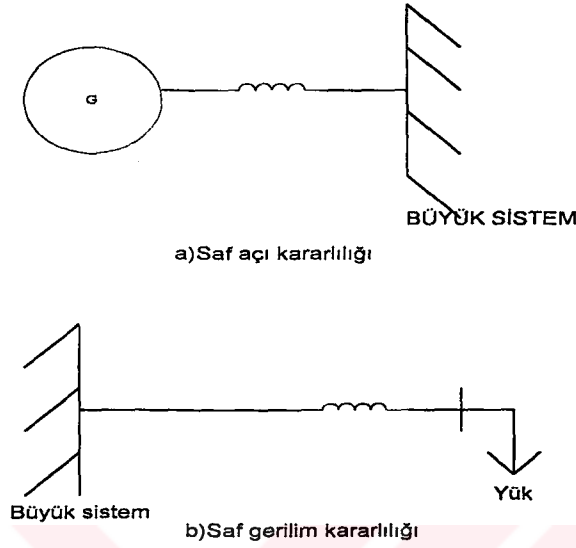
Bu durum indüksiyon motor durumu gibidir. Kararlılığı takibeden bir büyük karışıklık için kaynak sistem konfigürasyonunun son andaki iletkenliği (devre restorasyonundan ve şönt kapasitör ilavesinden sonra) kararlı denklik noktası, x^s in “çekicilik bölgesi” içinde olmalıdır. Bu bölgenin çekiciliği kararsızlık denklik noktası x^u ya kadar uzanır. x^s ve x^u arasındaki bölge için 2-2 eşitliğine müracaat edilir, çünkü $V_L^2 G, P_0$ dan daha büyüktür ve termostatların iletkenliği x^s noktasına ulaşmaya kadar azalacaktır.

Ayarlı trafolar ile olan durum burada da aynıdır. Gerçekte, eğer G ayarlı trafolar tarafından yüksek gerilim kısmına yansıtılan iletkenlik ise formülasyon değiştirilebilir ve böylece 2-2 eşitliği kullanılabilir.

2.3. ROTOR AÇISI KARARLILIĞI İLE GERİLİM KARARLILIĞININ İLİŞKİSİ

Gerilim kararlılığı ve rotor açısı (veya senkronizm) kararlılığı az veya çok birbirini ile ilişkilidir. Transient gerilim kararlılığı genellikle transient rotor açısı kararlılığı ile ve gerilim kararlılığının daha yavaş formları, küçük bozucu etkili rotor açısı kararlılığı ile ilişkilidirler. Genellikle bunları ayırmak zordur.

Eğer kararsızlığın hakim olduğu bir durum söz konusu ise o zaman orada bir çok durum vardır. Bir IEEE rapo. . [9] aşırı durumları gösterir: a) bir uzak senkron jeneratör, bir büyük sisteme iletim hatları ile bağlanır (tek makina ve bir sonsuz bara problemi için saf açı kararlılığı) ve b) bir senkron jeneratör veya bir büyük sistem, iletim hatları ile bir asenkron yüke bağlanır (saf gerilim kararlılığı) Şekil2- 5 bu aşırı durumları gösterir.



Şekil2- 5: Aşırı durumları gösteren basit örnekler.

Rotor açısı kararlılığında, gerilim kararlılığı gibi reaktif güç kontrolundan etkilenir. Özelde, periyodik olmayarak artan açıları içeren küçük-bozucu etki kararsızlığı, sürekli-aktif jeneratör otomatik gerilim regülatörü kullanılmadan önce başlıca problem idi. Biz şimdi küçük bozucu etki açı kararlılığı ve uzun süreli gerilim kararlılığı arasındaki ilişkiyi görebiliriz: jeneratör akım limitleri (bir aşırı tahrik sınırlayıcısından) otomatik gerilim regülasyonuna engel olur. Jeneratör akım limitleri, kararlılığın bu iki şekli için çok zararlıdır.

Gerilim kararlılığı yük bölgeleri ve yük karakteristikleri ile ilgilidir. Rotor açısı kararlılığı için, ekseriye uzun iletim hatları üzerindeki büyük bir sisteme, sistemin uzak güç üretim merkezleri ile bağlarız. Gerilim kararlılığı genelde yük kararlılığı ve rotor açısı kararlılığı da temelde jeneratör kararlılığıdır.

Bir büyük enterkonnekte sistemde, herhangi bir jeneratörde senkronizm kaybı olmaksızın bir yük bölgesinde gerilim çökmesi mümkündür.

Transient gerilim kararlılığı genelde transient rotor açısı kararlılığı ile oldukça yakından ilişkilidir. Uzun dönem gerilim kararlılığı rotor açısı kararlılığı ile daha az irtibatlıdır.

Söyleyebiliriz ki eğer gerilim çökmeleri, iletim hattındaki yüklerden uzak bir noktada ise, bu bir açı kararsızlığı problemidir. Eğer gerilim çökmeleri bir yük alanında ise bu başlıca bir gerilim kararsızlığı problemidir.

2.4. ESKİ GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI

Gerilim problemi gelişmekte olan güç sistemlerinde beklenir. Benzer bir şekilde, gerilim problemlerinin başlıca sistem arızalarını takibetmesi beklenir. Fakat bu yakın ilişki neden eski güç sistemlerindedir?

Sebeplerden biri var olan üretim ve iletimin yoğun bir şekilde kullanılmasıdır. Bu, yük bölgelerinde yeni enerji üretim merkezlerinin inşaatındaki zorluğun ve uzak bölgelerdeki enerji üretim merkezlerinden iletim hatlarının inşaatının zorluğunun nedenidir.

İkinci neden reaktif güç kompanzasyonu için şönt kapasitör kullanımının artmasıdır. Transfer limitleri arttırılır iken şönt kapasitör gruplarının aşırı kullanılması gerilim çökmesine eğilimli (brittle veya fragile) şebekelere sebebiyet verir. Şönt kapasitör gruplarının reaktif güç çıkışları brittleler veya fragile şartlarından dolayı gerilimin karesi ile artar.

Hızlı hata temizlenmesi, yüksek performans uyarımlı sistemler, güç sistem kararlı kılıcılar ve diğer kontroller transient kararlılığın belirlediği transfer limitlerinin kaldırılmasında etkilidir. Transient kararlılığının belirlediği limitlerin kaldırılması ile termal kapasite ve gerilim kararlılığı bu transfer limitlerini belirliyebilir.

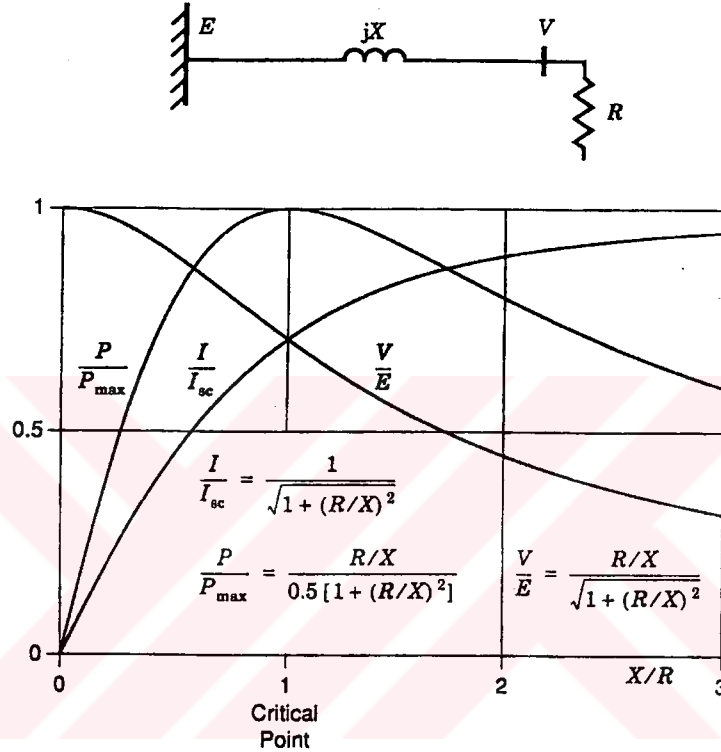
2.5. GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZLERİNE GİRİŞ: P-V EĞRİLERİ

Gerilim kararsızlığının daha yavaş şekilleri ekseriye steady-state problemler gibi analiz edilir; yük akış simülasyonu en temel çalışma metodudur. Devrenin anlık görünümünde (snapshots) olaganüstü bir durumun ardından veya yük ekleme esnasındaki simülasyonu yapılır. Arıza sonrası güç akışlara ilaveten diğer iki güç akışın temel metodu P-V eğrileri ve V-Q eğrileri için genişçe kullanılır. Bu iki metod gerilim kararlılığı ile ilgili steady-state yüklenebilirlik limitlerini belirler. Konvansiyonel yük akış programları yaklaşık yük akış analizler için kullanılabilir.

P-V eğrileri gerilim kararlılığının kavramsal analizleri ve radyal sistem çalışmaları için yararlıdır. Eğer P bölgedeki toplam yük ve V kritik veya temsilci baradaki gerilim ise, bu metod büyük, gözlü (mesh) şebekeler içinde kullanılır. P bir interface veya enterkonnekte iletim hattındaki güç transferi de olabilir. Birkaç baradaki gerilimin grafiği çizilebilir. Bunun bir dezavantajı, eğer sistem devrilme noktasında veya maksimum güç noktasında çalışıyor ise güç akış simülasyonu çözümden uzaklaşacaktır (Divergence). Bir başka dezavantaj, enerji üretimi bölge yükünün arttığı kadar realistik olarak tekrar programlanmalıdır.

Kavramsal analizler için, eğer yük karakteristikleri gerilimin bir fonksiyonu olarak analiz edilirse P-V eğrileri uygundur. Örneğin bir direnç yükü $P_{yük} = V^2/R$ ile çizilebilir. Sabit güç (gerilimden bağımsız) yükünün [15] zıt aşırı durumudahada basittir, bu P-V eğrisinde bir dikey çizgidir. Bölüm 2.7 de bu konu açıklanacaktır.

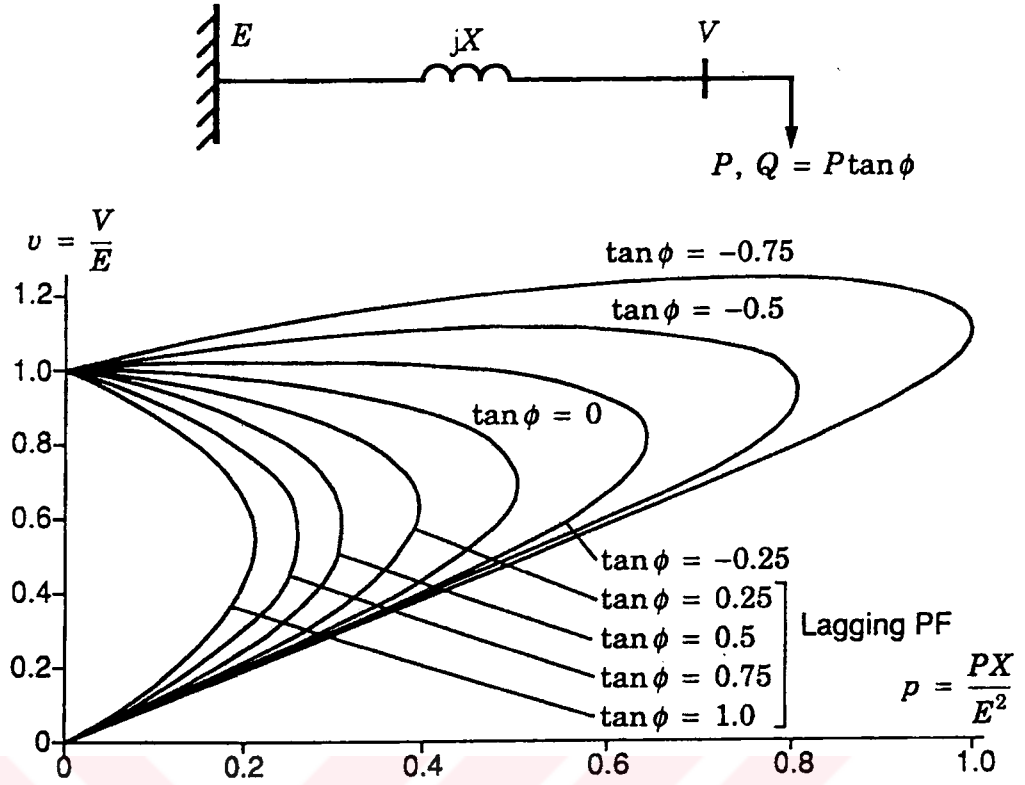
İlk önce empedans yükler üzerinde duralım. Eğer yük empedansının değeri, kaynak empedansının değerine eşitse maksimum güç iletimi olduğunu biliyoruz. Daha büyük yük empedansları için (daha küçük admitanslar için) yüksek gerilimde düşük akım çalışma noktasında oluruz. Daha yüksek admitanslar için alçak gerilim de yüksek akım çalışma noktasında oluruz. Barbier ve Barret yaptıkları çalışmada bu matematiksel ilişkiyi gösterirler[16]. Direnç yükler ve reaktans şebekelerin en basit durumları için şekil2-6 gerilim akım ve güç ilişkilerini gösterir. Daha önce belirtildiği gibi eğer kaynak ve yük empedans büyüklükleri eşit ise maksimum güç meydana gelir. Gerilim maksimum yükte kritik gerilim olarak adlandırılır.



Şekil2- 6: Direnç yükler ve reaktans şebekeler için gerilim, akım ve gücün ilişkileri. $I_{sc}=E/X$ kısa devre akımı. $P_{max}=0.5$, $V_{krit}=0.707$

2.6. GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZLERİNE GİRİŞ: V-Q EĞRİLERİ

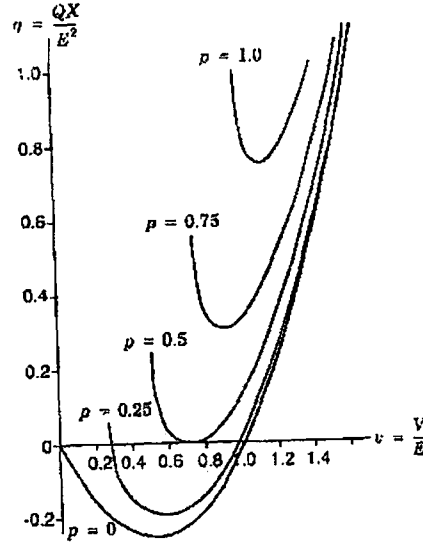
İlk olarak Şekil2- 7 de gösterilen normalize edilmiş P-V eğrilerinden V-Q eğrilerini çizebiliriz. P nin sabit değerleri için Q ve V değerlerini (her güç faktörü için bir çift) not ederiz ve sonra yeniden V-Q eğrilerini çizeriz. Şekil2-8 sonucu gösterir. Kritik gerilim yüksek yüklemeler için tekrar çok yüksek olur ($P=1p.u$ için $V=1p.u$ den fazla). Eğer başvuru bir kapasitör grubu gerilimi yükseltiyorsa sağ taraf normal şartları gösterir.



Şekil2- 7: Sabit (belirsiz) kaynak ve reaktans şebekeleri için normalize edilmiş P-V eğrileri [1]. Güç faktörleri $\tan\phi=1.0, 0.75, 0.5, 0.25$ ve 0 dır.

Büyük sistemler için bu eğriler bir seri güç akış simülasyonu ile elde edilebilir. V-Q eğrileri test veya kritik baradaki reaktif güce karşı gelen gerilimi çizer. Bir hayali senkron kondansatör test barasında gösterilir. Bilgisayar program dilinde bu bara reaktif güç limitleri olmadan bir "PV" bara ile değiştirilir. Güç akış bir dizi senkron kondansatör gerilim programı için simule edilir ve kondansatörün reaktif çıkışı programlanmış gerilime karşı gelecek şekilde çizilir. Gerilim bağımsız ve absis değişkendir. Kapasitif reaktif güç pozitif dikey yönde çizilir. Test barasındaki şönt reaktif kompanzasyonu kullanmadan, çalışma noktası hayali senkron kondansatörün kaldırılmasına tekabül eden sıfır reaktif noktadır.

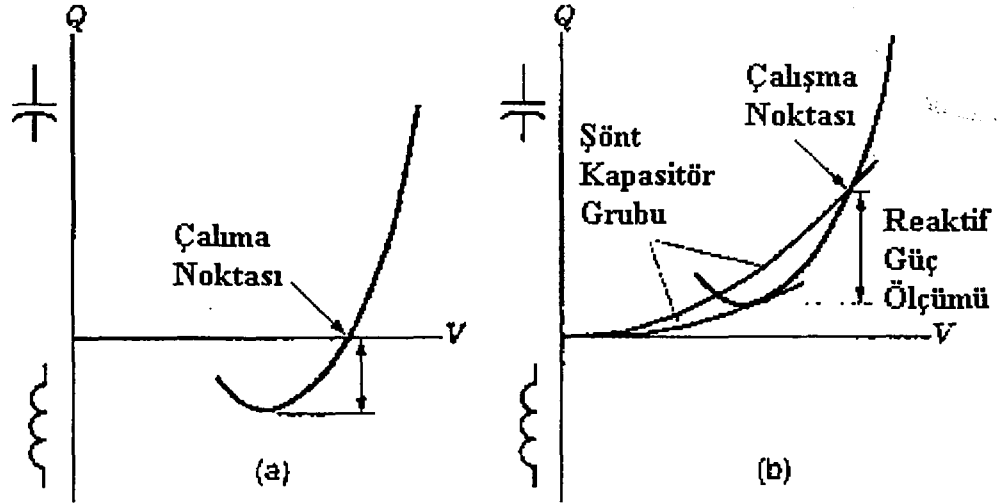
(Bu eğriler ekseriye V-Q eğrilere tercihen Q-V eğriler olarak adlandırılırlar, fakat V-Q terminoloji baskındır, çünkü gerilim, reaktif güç yükden daha fazla bağımsız değişkendir. Q-V eğrileri gerilime tercihen programlanmış reaktif güç ile çizilirler.)



Şekil2- 8 : Sabit (belirsiz) kaynak ve reaktans şebekeleri için normalize edilmiş V-Q eğrileri [1]. Yükler sabit güçtür.

2.6.1. V-Q eğrilerinin bir kaç avantajı

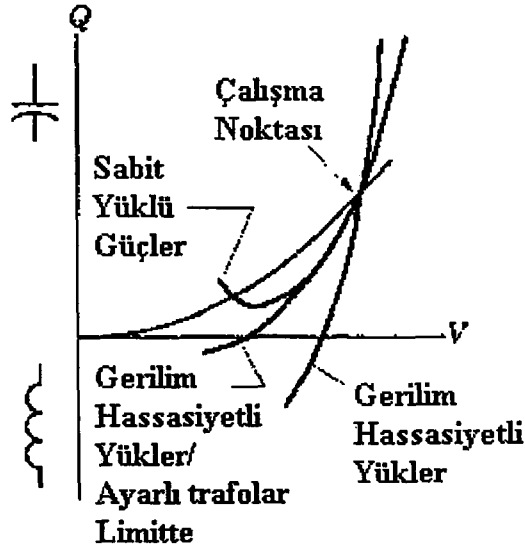
- Gerilim güvenliği reaktif güce yakın bağımlıdır ve V-Q eğrisi test barasındaki reaktif güç miktarını verir. Bu reaktif güç miktarı çalışma noktasından, tabanına veya V-Q eğrisinin bir noktadaki tanjantına (ki bu nokta kullanılan kapasitörün gerilim karesinin karakteristik noktasıdır) MVar olarak mesafesidir (Şekil2- 9). Test barası bir “gerilim kontrol bölgesinde” (bu bölgede gerilim miktarının değişimi tutarlıdır) bütün baraların temsilcisi olabilir.
- V-Q eğrileri bir P-V eğrisi boyunca test sisteminin sıhhati için hesaplanabilir.
- Test barasındaki şönt reaktif kompanzasyon karakteristikleri (kapasitör, SVC veya senkron kondansatör) direkt olarak V-Q eğriler ile çizilebilir. Çalışma noktası V-Q sistem karakteristiğinin kesişme noktasıdır (Şekil2- 9b). Reaktif kompanzasyon, gerilim kararlılığı problemleri için bir çözüm olduğundan dolayı faydalıdır.
- V-Q eğrinin dikliği test barasının katılığını gösterir (ΔV bir ΔQ içindir).
- Daha iyi görmek için, jeneratörün reaktif gücü aynı grafik üzerinde çizilebilir. Eğer yakın jeneratörler kendi VAr limitlerine ulaşırsa, V-Q eğrisinin dikliği daha az olur ve eğrinin tabanı yaklaşır.



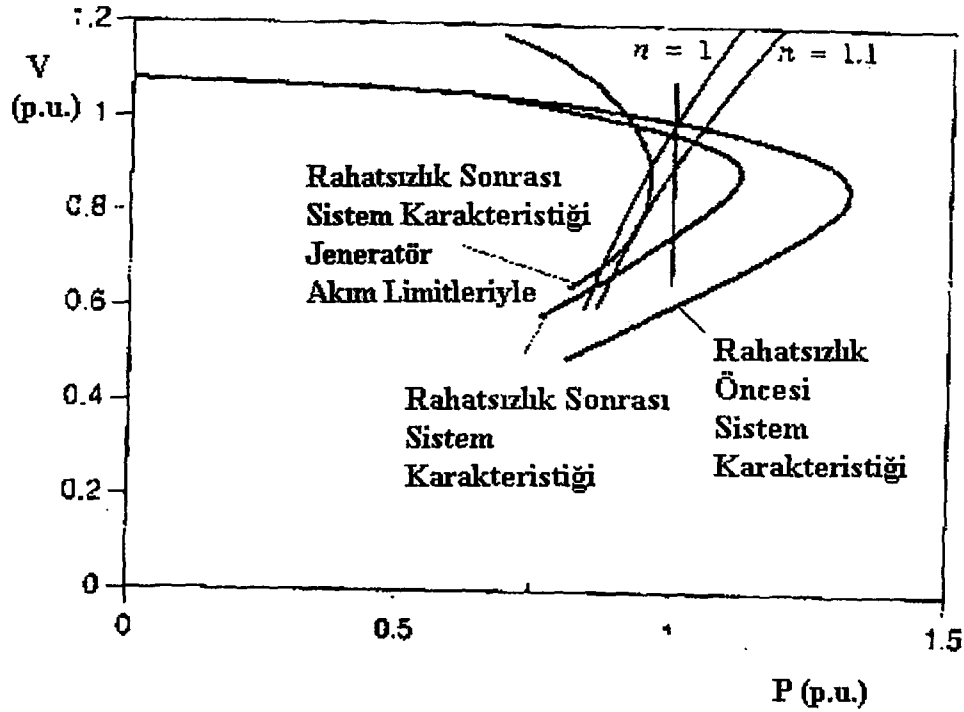
Şekil2- 9: Reaktif güç miktarı.

Olaya hesap tekniği açısından bakarsak, yapay PV bara, güç akış ıraksama problemlerini minimize eder. Çözümler eğrinin sol tarafında elde edilebilir, ıraksama yalnızca eğer PV baradan uzaktaki baralarda, gerilim daha aşağıya itilirse olur. Eğer reel güçteki değişimler yalnızca kayıplardaki değişimlerden dolayı olursa, üretimin tekrar programlanma ihtiyacı minimum olur. Başlangıç değerleri biraz farklı programlanmış önceki çözümden kullanılır, böylece her güç akış çözümü hızlı olur. Bu işlemler otomatik yapılabilir, böylece bütün eğri bir seferde hesaplanabilir.

Gerilim hassasiyetli yüklerin veya ayarlı trafo limitlerinin etkileri V-Q eğrilerinde gösterilebilir. Gerilim hassasiyetli yüklerle V-Q eğriler (örneğin önceki ayarlı trafo için) çok daha büyük reaktif güç değerine ve çok daha az kritik gerilimlere sahip olacaktır. Ne zaman ayarlı trafolar limitlere gelirlirse o zaman eğriler sol tarafa dönmektense düzleşmeye daha meyilli olurlar. Bu fikirler Şekil2- 10 da çizilmiştir.



Şekil2- 10: Gerilim hassasiyetli yükler ve limitdeki ayarlı trafoların etkilerini gösteren V-Q eğri taslakları.



Şekil2- 12: %75 motor ve yük durumu için sistem ve yük karakteristikleri. Yük karakteristiği: $P=0.75+0.25n^2GV^2$ ($G=1p.u.$), başlangıç koşulları $1p.u$ gerilim ve yüküdür.

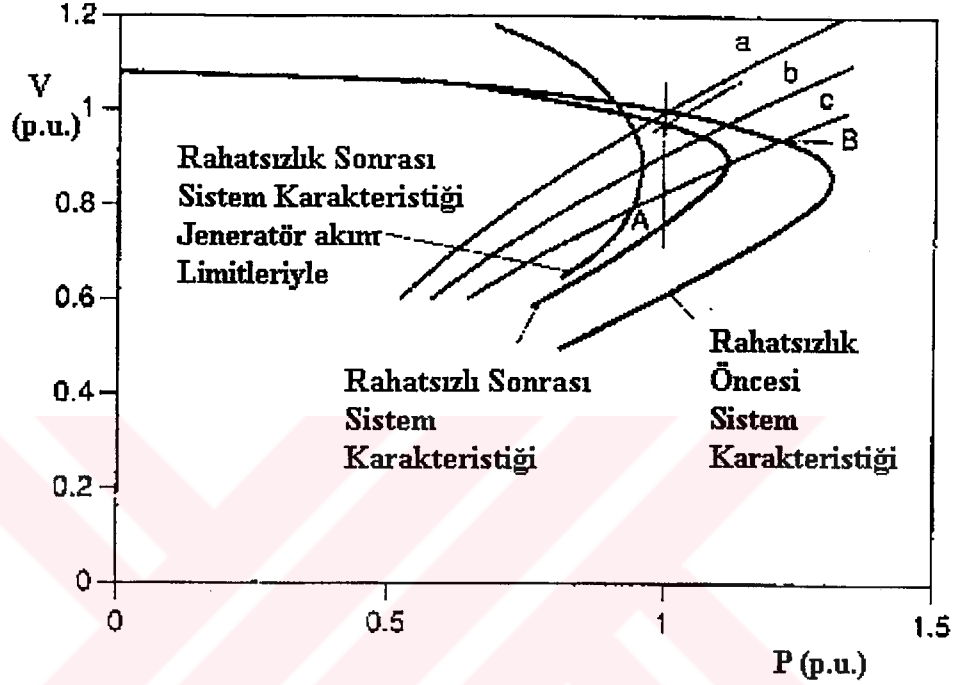
Bu üç sistem karakteristiği: (1) bozucu etki öncesi (pre-disturbance), (2) bozucu etki sonrası (post disturbance) jeneratör akım limitlerinden önce, (3) bozucu etki sonrası bazı jeneratörlerde akım limitleri ile birlikte [16,18]. Jeneratör alan akım limitlerinin aşırı yük için cevabı, aşırı tahrik limitleri veya operatör müdahalesinden dolayı oluşur. Her sistem karakteristiğinin, üretim ve iletim sistemlerinin uzun dönem güç transfer kabiliyetini gösteren bir maksimum güç noktası vardır. Bu sistem karakteristikleri tamamen kavramsaldır.

Şekil2-12 %75 motor yük durumu için yük karakteristiklerindeki de gösterir. İki yük karakteristiği gösterilir: Başlangıç yük karakteristiği ve +%10 gerilim ayarlı yük karakteristiği. Yük karakteristiği: $P=0.75+0.25n^2GV^2$. bozucu etkiyi takiben, gerilim düşecek ve yük karakteristiği bozucu etki sonrası sistem karakteristiklerinden biri ile kesişecektir. Gerilimdeki bu düşüş alçak gerilim tarafının ayarlı trafolarla düzeltilmesine kadar direnç yükünü azaltacaktır. Eğer burada ayarlı trafo yok ise veya ayarlı trafolar limitte iseler, yük iletkenliği termostatik olarak kontrol edilen yükler veya diğer sabit enerjili yükler için artacaktır.

Şekil2-12 bu yük karakteristiklerinin hiç uygun olmadıklarını gösterir. Ayarlı trafo ve jeneratör akım limitleri ile çalışma noktası kaybolur (belirsiz veya sistem ve yük karakteristikleri kesişmi yok). Bir çalışma noktasının kaybı gerilim çöküşünü başlatır. Kesin modellerle dinamik simulasyon (mümkün olan devre dışı kalmış AC kontaktörleride içererek) performans belirlemesi için gereklidir. Gerçekte motor kararsızlığı steady-state analizi ile kararsızlığın tahmininden önce olacaktır [16,19]. Eğer bozucu etki şiddetli kısa devreler içeriyorsa, motorlar tekrar hızlanamayabilir. Bununla beraber şekil2-12 kavramsal değerleri göstermektedir.

2.7.2. Direnç yüklerinin yüksek oranı

Şekil2-13 %75 direnç yüklü duruma karşı gelen eğrileri göstermektedir (sistem karakteristikleri değiştirilmiyor). Eğer iletkenlik, G , a ve b eğrileri için $1p.u$ ve c eğrisi için $1.2p.u$ ise yük eşitliği $P=0.25+0.75n^2GV^2$ dir. c eğrisi için bu ekstra iletkenlik direnç yükünün termostatik regülasyon kısmından olabilir ve bütün ısıtıcılar çalışıyor gösterilebilir. LTC ve termostatik regülasyon için, yük $1p.u$ başlangıç değerinin üstüne çıkmayacaktır.



Şekil2-13: Sistem ve yük karakteristikleri. Yük karakteristiği: $P=0.25+0.75n^2GV^2$. Yük eğrisi "a" $n=1$ için, "b" $n=1.1$ için, "c" %20 daha fazla iletkenlik için ($G=1.2$) ve $n=1.1$ için.

Jeneratör akım limitleri olmaksızın, bozucu etki sonrası çalışma noktası dikey çizginin kesişiminde ve bozucu etki sonrası sistem karakteristiğindedir. Yük tamamen eski haline getirilir ve ayar oranı n yaklaşık olarak 1.03 olur. Jeneratör akım limitleri ile fakat iletkenlik eklenmeden, çalışma noktası b eğrisi ve en soldaki eğri ile kesişim noktasıdır. İletkenlik eklendikten sonraki çalışma noktası A noktasıdır.

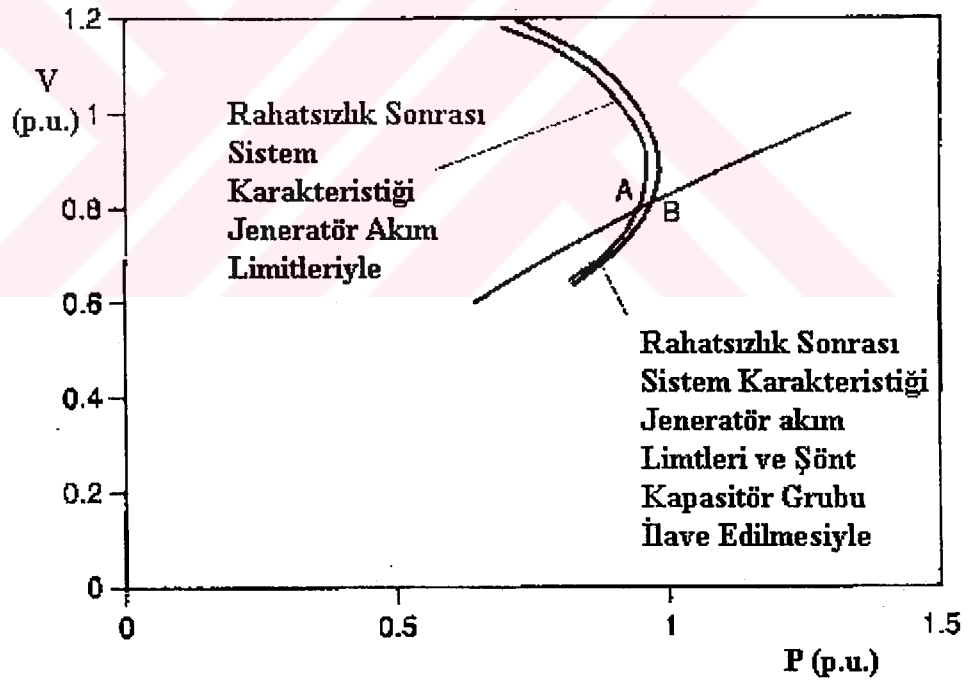
Bu yük karakteristikleri daha uygundur ve burada çalışma noktasının kaybı (kesişimin kaybı) gerilim çöküşüne neden olması muhtemel değildir. P-V eğrinin alt kısmındaki anormal bir şekildeki alçak gerilimde kararlılık mümkündür. Gerçekçi bir sistemde, sonuçlar, yeniden düzenleme çalışmalarının korunması ve otomatik ve manual olarak ayarlanmış sabit enerji yük miktarı motor çalışma performansına (çöken ve devre dışı kalanlarda içererek) bağlı olacaktır. Eğer çalışma noktası bir P-V eğrinin alt kısmında ise, yük iletkenliklerindeki bir artış yük gücünde bir azalma ile sonuçlanır. Güç sistemleri kısmi gerilim çöküşleri esnasında anormal alçak gerilimde kararlı olarak çalışırlar.

Yük eğrisi b jeneratör akım limitleri ile verilen sistem karakteristik eğrisinin devrilme noktasında kesişir. Eklenen ayarlı trafo yük gücünü düşürecek. Bunun anlamı ayarlı trafo yük tarafının gerilimini arttırma yerine azaltır. Bu ayarlı trafo kararsızlığı olarak adlandırılabilir.

Daha ileri bir nokta: Farzedelim ki sisteme termostatlar için uygun iletkenlik eklenmiş ve A noktasında taplarla kendi limitleri içerisinde çalışıyor. Şekil2-13 de diyebiliriz ki orijinal sistemin restorasyonunda (hatların tekrar kapanması denebilir) ayarlı trafoların yük kısmında mümkün aşırı gerilim ve başlangıç yükünden daha yüksek bir güç ile B noktasında geçici olarak çalışmaya başlayacaktır. (Bu faraziye de jeneratör gerilim regülatörleri yüksek gerilim için hemen cevap verir. Bu sürekli olarak hareket eden aşırı tahrik limitleri için doğrudur, burada regülatörler manual olmamalıdır.)

2.7.3. Şönt kapasitör grubunun devreye eklenmesi ve çıkarılmasının etkisi

Şekil2- 7 de gösterilen farklı güç faktörleri için P-V eğri grubunda, P-V eğrinin dip kısmında iken bir kapasitör grubunu ekleme veya çıkarmanın etkisini analiz edebiliriz. Şekil2- 14 gösterirki bir kapasitör grubu, %75 direnç durumu için çalışma noktası A dan B ye gider. Gerilim ve güç arttırılır. Gerilim/reaktif güç performansı normaldir.



Şekil2- 14: Yüksek gerilim hassasiyetli yükler ile P-V eğrisinin alt kısmında kapasitör grubunun eklenmesinin etkisi. Yük karakteristikleri Şekil2-13 deki c eğrisi ile aynıdır.

P-V eğrinin dip kısmındaki kararlı çalışma ve kapasitör ekleme çıkarma etkisi zaman domenli simülasyonu tarafından kontrol edilir.

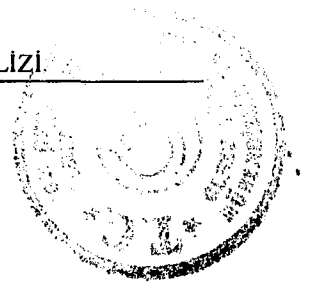
2.8. ÖZET

Gerilim kararlılığının iki tipini anlattık: Transient gerilim kararlılığı ve uzun dönem gerilim kararlılığı. Gerilim hassasiyetli yük modellerinide içeren uzun dönem gerilim kararlılığı geçtiğimiz yıllarda en büyük ilgiyi çekmişti.

Gerilim kararlılığı, yük, iletim ve büyük güç sistemlerinin üretim alt sistemlerini içerir. Gerilim kararlılığının üç anahtar özelliği

1. Yük karakteristikleri güç şebeke gövdesinde görüldüğü gibidir;
2. Jeneratörlerdeki ve şebekelerdeki gerilim kontrolü için geçerli bir metoddur; ve
3. Üretim noktasından tüketim noktasına güç, özellikle reaktif güç iletimi için şebekenin kabiliyetidir.

Gerilim kararsızlığı ve çökmesi dinamik ve normalde bir yük bozucu etki olaylarıdır. Şebekenin steady-state yüklenebilirlik limiti (bir P-V eğrisindeki maksimum güç noktası) gerilim kararsızlık limiti olması gerekli değildir. Ancak statik ve güç akışından oluşan bozucu etki sonrası steady-state analizleri, uzun dönem gerilim kararlılığı için faydalı bir analiz metodudur.



BÖLÜM 3.

LIAPUNOV KARARLILIK ANALİZİ

3.1. GİRİŞ

Genellikle bir enerji sistemi için en önemli şey kararlılıktır. Eğer, bir sistem lineer fakat zamana bağımlı değil ise, bu sistemde bir çok kararlılık kriteri var demektir; Nyquist kararlılık kriteri, Routh kararlılık kriteri[1] vesaire. Eğer, sistem lineer veya nonlinear (lineer olmayan) fakat zamana bağımlı ise o zaman yukarıda belirtilen kararlılık kriterleri uygulanamaz. Her ne kadar Nyquist kararlılık kriteri kararlılığı göstermekte kullanılıyorsa da, ancak özel bazı nonlinear sistemlere uygulanabiliyor.

Bu bölümde Liapunov'un ikinci metodu (Liapunov'un Direkt metodu) incelenecektir. Bu metod zamana bağımlı ve/veya nonlinear sistemlerin kararlılık durumlarının tespitinde en genel metoddur. Bu metod bilinen tüm sistemlere uygulanabilir. Liapunov'un bu metodunu anlatırken değişik sistemlere göre tanımlamalar yapacağız (örneğin, kontrol sistemi) bu yapacağımız tanımlamalar aynı zamanda güç sistemleri içinde geçerli olan tanımlamalardır.

Liapunov'un ikinci metodu ile sistemin kararlılığı, durum denklemleri çözülmeden tespit edilebilir. Açıktır ki, nonlinear ve/veya zamana bağımlı durum denklemlerini çözmek genelde zor ve karmaşık olduğundan bu özelliği Liapunov metodunu çok kullanışlı kılar.

Liapunov'un ikinci metodu çok fazla tecrübe ve hüner istese de, diğer metodların devre dışı kaldığı durumlarda, nonlinear sistemlerin kararlılık problemlerini çözebilir.

Bu bölümün yazılma sebebi; lineer ve nonlinear sistemlerin kararlılık analizinde Liapunov'un ikinci metodunu anlatmak ve kullanımını göstermektir.

Bu bölümün ikinci kısmında skaler fonksiyonların belirli kavramları ve sistem kararlılığının değişken tiplerinin belirlenmesi gibi temel konular gösterilecektir. Üçüncü kısımda Liapunov fonksiyonuna giriş ve ikinci metodun kararlılık teoreminin temelleri verilecektir. Dördüncü kısımda lineer, zamandan bağımsız sistemlerin kararlılık analizine Liapunov'un ikinci metodunun uygulanmasını tartışacağız. Beşinci kısımda nonlinear sistemlerin kararlılık analizi tartışılacak ve böyle sistemler için Liapunov fonksiyonların uygulanmasına dair iki metod incelenecektir. Altıncı kısımda ise bölümün sonuç fikrini özetliyeceğiz.

3.2. TANIMLAMALAR

Bu bölümde, ilk önce sistemin denge noktası, kararlılık, asimptotik kararlılık ve kararsızlık durumu anlatılacak; sonra skaler fonksiyonların belirsiz (indefinit),

belirli (definit) ve yarı belirlilik (semidefinit) durumları ile ilgili temel tanımlar verilecektir.

3.2.1 Sistem

Bu bölümde sistem aşağıdaki denklem ile belirlendi,

$$\mathbf{x}' = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$$

3- 1

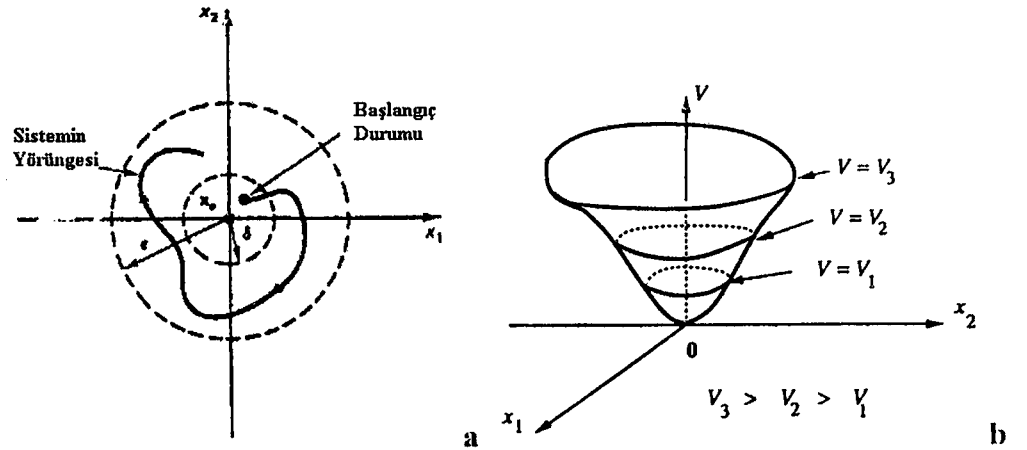
Burada $\mathbf{x}$, n-boyutlu bir durum vektörü olarak tanımlıdır. $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$ fonksiyonu da elemanları $x_1, x_2, \dots, x_n$ ve t olan n-boyutlu bir vektördür. Farzedelimki 3- 1 eşitliğinde sistem verilen ilk koşullarda tek çözüme sahip olsun. 3- 1 eşitliğinin çözümünü $\phi(t; \mathbf{x}_0, t_0)$ ile gösterebiliriz, burada $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$, $t = t_0$ ve t de herhangi bir gözlem zamanıdır. Böylece,

$$\phi(t_0; \mathbf{x}_0, t_0) = \mathbf{x}_0$$

olarak ifade edilebilir.

3.2.2 Bir Sistemin Yörüngesi

Daha önce belirtildiği gibi, nonlinear sistemlerin kararlılığının belirlenmesi için bir çok metod vardır. Çünkü, hiç bir metod tüm durumlara uygulanamaz. En yaygın olarak kullanılan metodlardan biri Liapunov kararlılığıdır. Liapunov kararlılığı aşağıdaki şekil3-1 yardımı ile belirlenir. İkinci dereceden sistem için, şekil3-1 a da gösterildiği gibi x_1 , x_2 arasındaki durumun grafiği (zamanla birlikte ve zaman parametrelerden biri) sistem yörüngesi olarak belirlenir. Eğer n boyutlu uzayda grafik çizmek mümkün olsaydı, n. dereceden sistem için sistem yörüngesinin grafiği çizilirdi. Ancak üçüncü dereceden büyük sistemler için sistem yörüngesinin grafiğini çizmek mümkün değildir. Fakat böyle bir sistem için bir sistem yörüngesi şartı altında düşünebiliriz. Şekil3-1 b de üçüncü dereceden bir sistem için sistem yörüngesinin grafiği gösterilmiştir.



Şekil3- 1: a) İkinci dereceden bir sistem için sistem yörüngesinin gösterilmesi, b) Üçüncü dereceden bir sistem için sistem yörüngesinin gösterilmesi.

3.2.3 Bir sistemin Denge Noktası

Bir sistemin denge noktası 3- 1 olu denklemin sıfıra eşit olduğu noktadır[2]. Bir başka deyişle, sistemin durum değişkenlerinin zamanla değişiminin (zamana göre türevi) sıfır olduğu noktadır. Sistem bir defa denge noktasına ulaşırsa zaman ne olursa olsun sistemin durum değişkenleri hep aynı kalır. 3- 1 nolu denklem ile verilen sistemde x_e ifadesi burada

$$f(x_e, t) = 0 \quad \text{bütün } t \text{ ler için}$$

3- 2

olarak tanımlıdır ve buna sistemin denge noktası denir. Eğer sistem lineer ve zamana bağımlı değil ise yani $f(x, t) = Ax$ ve A tekil değil ise, o zaman yalnızca bir tane denge noktası vardır. Eğer A tekil ise o zaman sonsuz tane denge noktası ortaya çıkar. Nonlineer sistem için bir veya daha fazla denge noktası olabilir. Bu durumlar sistemin sabit çözümlerine ($x = x_e$ bütün t ler için) uygundur. Denge noktalarının belirlenmesi, sistemin diferansiyel eşitliğinin çözümünü gerektirmez, denklem 3- 1 yalnızca 3- 2 eşitliğinin çözümünü gerektirir.

Herhangi bir izole edilmiş denge noktasının koordinatları orijine kaydırılabilir veya $f(0, t) = 0$ koordinat çevirmesi ile de yapılabilir. Bu bölümde biz yalnızca böyle durumların kararlılık analizini ele alacağız.

3.2.4 Liapunov'a Göre Kararlılık

Aşağıda, bir x_e denge noktası hakkında k yarıçaplı bir bölge gösterebiliriz ki;

$$\|x - x_e\| \leq k$$

ki, $\|x - x_e\|$ ye Öklid norm denir ve;

$$\|x - x_e\| = [(x_1 - x_{1e})^2 + (x_2 - x_{2e})^2 + \dots + (x_n - x_{ne})^2]^{1/2}$$

ile tanımlıdır.

Simdi öyle bir $S(\delta)$ bölgesi düşünelim ki bu $S(\delta)$ bölgesi tüm noktaları içersin, şöyle ki;

$$\|x - x_e\| \leq \delta$$

ve $S(\epsilon)$ bölgesi de bütün noktaları içersin,

$$\|\phi(t; x_0, t_0) - x_e\| \leq \epsilon \quad \text{tüm } t \geq t_0 \text{ için}$$

3- 1 eşitliğindeki sistemin bir x_e denge noktasında eğer her $S(\epsilon)$ a karşılık bir $S(\delta)$ geliyorsa sistemin Liapunov'a göre kararlı olduğu söylenir ki burada t sonsuza giderken $S(\delta)$ bölgesinde başlayan sistemin yörüngesi $S(\epsilon)$ dan ayrılmaz. Bir başka deyişle $S(\delta)$ bölgesinde başlayan sistemin yörüngesi t sonsuza giderken $S(\epsilon)$ bölgesi

içerisinde kalıyorsa sistem karardır denir Bu reel sayı δ , ϵ a ve genelde de t_0 a da bağımlıdır. Eğer t_0 a bağımlı değil ise denge noktası için uniform karardır [3].

Burada şu gösterildi; ilk önce $S(\epsilon)$ un yeri belirlenecek ve her $S(\epsilon)$ için bir $S(\delta)$ karşılık gelecektir ki yörünge $S(\delta)$ da başladığında t sonsuza giderken $S(\epsilon)$ dan ayrılmasın.

3.2.5 Asimptotik Kararlılık

3- 1 eşitliğindeki sistemin bir denge noktası x_e eğer Liapunov'a göre karardır ise ve $S(\delta)$ bölgesi içinde başlayan her çözüm t sonsuza giderken $S(\epsilon)$ dan ayrılmaksızın x_e ye yaklaşıyorsa asimptotik karardır olarak adlandırılır[4].

Pratikte asimptotik kararlılık, kararlılıktan daha önemlidir. Eğer asimptotik kararlılık bölgesel ise bu basitçe kurulu asimptotik kararlılık için sistemin uygun bir şekilde çalışacağı anlamına gelmez. Genelde asimptotik kararlılığın en büyük bölgesinin ölçülerinin bazı bilgileri gereklidir. Bu bölgeye çekicilik domeni (attractive domain) denir. Bu, asimptotik kararlılık yörüngelerinin olduğu uzayın bölgesidir. Bir başka değişle çekicilik domeninde meydana gelen her yörünge asimptotik kararlılıktır.

3.2.6 Geniş Anlamda Asimptotik Kararlılık

Eğer asimptotik kararlılık hangi yörüngeden oluşuyorsa oluşsun bütün durumları kapsıyorsa (uzaydaki tüm noktaları) denge noktası geniş anlamda asimptotik karardır olarak adlandırılır. Burada 3- 1 eşitliğinde verilen sistemin bir denge noktası x_e için, eğer sistem karardır ve her çözüm t sonsuza giderken x_e ye yaklaşıyorsa buna geniş anlamda asimptotik karardır denir[5]. Geniş anlamda asimptotik kararlılık için gereken şart; tüm uzayda yalnızca tek denge noktası olmasıdır.

Geniş anlamda asimptotik kararlılık kontrol mühendisliğinin problemlerinde önemli bir noktadır. Eğer denge noktası geniş anlamda asimptotik karardır değil ise o zaman problem asimptotik kararlılığın en büyük bölgesini belirlemek olacaktır. Bu genellikle çok zordur. Bütün bu pratiklerin yapılması yeterince büyük asimptotik kararlılık bölgesini tespit için yeterlidir ve bu bölgede bozucu etki aşılmış olacaktır.

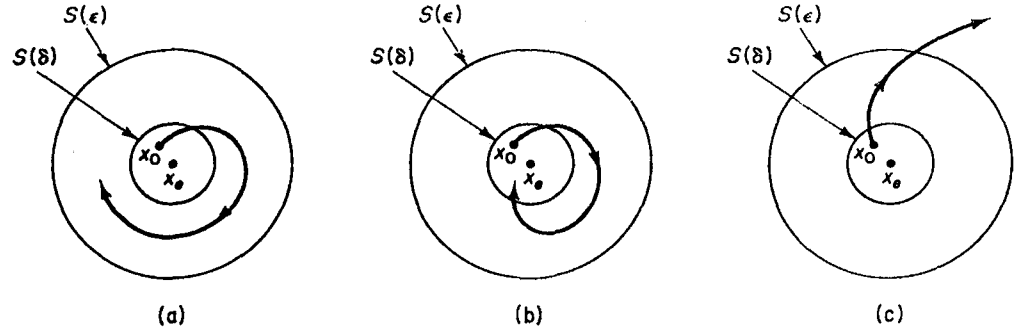
3.2.7 Kararsızlık

Bir x_e denge noktası için şu şartlarda kararsız denebilir; eğer bazı reel sayılar için $\epsilon > 0$ ve herhangi bir reel sayı $\delta > 0$ oluyorsa (ki bunun büyüklüğü önemli değil) orada daima bir x_0 durumu vardır ki yörünge $S(\delta)$ da başladığında $S(\epsilon)$ dan ayrılıyordur[6,7,8,9,10].

3.2.8 Kararlılık, Asimptotik kararlılık ve Kararsızlığın grafiksel gösterimi

Burada yukarıda anlattıklarımızı grafiksel gösterimle belirliyerek, kavramları daha açık izah etmeye çalışacağız.

İki boyutlu bir durum üzerinde düşünelim. Şekil3- 1, a, b ve c kararlılık, asimptotik kararlılık, ve kararsızlık durumlarına karşılık gelen denge noktası ve uygun yörünge tiplerini sıra ile göstermektedir. Şekil3- 1, a, b ve c de $S(\delta)$ bölgesi x_0 ın ilk durumunu ve $S(\epsilon)$ bölgesi de x_0 da yörüngeyi başlatmasını sınırlıyor.



Şekil3- 2: a) Kararlı denge noktası ve yörüngeyi gösterilimi b) Asimptotik kararlı denge noktası ve yörüngeyi gösterilimi, c) Kararsızlık denge noktası ve yörüngeyi gösterilimi.

Yukarıdaki belirlemelerde ilk şartların kesin bölgesi açıkça belirtilmemiştir. Bu şekilde tanımlanan yaklaşım, denge noktasının etrafında $S(\epsilon)$ bütün durum yüzeylerine karşılık gelinceye kadar devam eder.

Şekil3- 1 c de görüldüğü gibi yörünge $S(\epsilon)$ dan ayrılıyor, bunun anlamı denge noktası kararsızdır. Eğer yörünge $S(\epsilon)$ bölgesinde sınırın dışına yaklaşıyor ise, biz onun belirsizliğe gideceğini söyleyemeyiz. (İğer zamandan bağımsız bir sistem kararsızsa, yörünge kararsızlığa yakın denge noktasında başlar ve belirsizliğe gider. Fakat nonlinear sistemlerde bu durum için kesinlikle böyle olacak diyemeyiz.)

Yukarıda anlatılanlarla nonlinear ve lineer sistemlerin kararlılık analizlerinin anlaşılması için gerekli minimum şartları göstermiş oluyoruz. Bu belirlemeler bir denge noktasının kararlılık kavramının açıklanması için tek yol değildir. Gerçekte literatürde başka değişik yollarda vardır[1]. Örneğin, klasik kontrol teorisinde, sistemler Liapunov'a göre yalnızca asimptotik kararlı ise kararlı sistem olarak adlandırılır, eğer sistem Liapunov'a göre kararlı ise, kararsız sistem olarak adlandırılır.

3.2.9 Skaler fonksiyonun pozitif definitliği

Bir skaler fonksiyon $V(x)$ e Ω bölgesinde pozitif definit diyebiliriz (Ω uzayda orijini kapsar) öyleki Ω bölgesinde $V(x) > 0$ bütün $x \neq 0$ durumları için ve $V(0) = 0$ ise.

Bir zamana bağımlı fonksiyon $V(x, t)$ ye, aşağıdaki zamandan bağımsız bir pozitif definit fonksiyon $V(x)$ ile sınırlı ise, bu $V(x, t)$ fonksiyonuna Ω bölgesinde pozitif definit diyebiliriz[11] (Ω uzayda orijini kapsar) ki pozitif definit fonksiyon $V(x)$ şöyledir,

$$V(x, t) > V(x) \quad \text{bütün } t \geq t_0 \text{ için}$$

$$V(0,t)=0 \quad \text{bütün } t \geq t_0 \text{ için}$$

3.2.10 Skaler fonksiyonun negatif definitliği

Bir skaler fonksiyon $V(x)$ in negatifi pozitif definit ise $V(x)$ e negatif definit denir[11].

3.2.11 Skaler fonksiyonun pozitif semidefinitliği

Bir skaler fonksiyon $V(x)$, eğer Ω bölgesinde orjinden ve nerede sıfır olduğu belirli durumlardan başka her yerde pozitif definit ise bu $V(x)$ fonksiyonuna pozitif semidefinit denir[11].

3.2.12 Skaler fonksiyonun negatif semidefinitliği

Bir skaler fonksiyon $V(x)$ in negatifi pozitif semidefinit ise $V(x)$ e negatif semidefinit denir[11].

3.2.13 Skaler fonksiyonların indefinitliği

Bir skaler fonksiyon $V(x)$ bir Ω bölgesinde hem pozitif hem de negatifse bu $V(x)$ fonksiyonuna indefinit denir. Burada Ω bölgesinin ne kadar küçük olduğu önemli değildir[11].

3.2.14 Quadratik formlar

Liapunov'un ikinci metodunda kararlılık analizinin temelinde yer alan önemli kurallardan biride; skaler fonksiyonun sınıfı quadratik formda[12] olmalı, şeklinde formüle edilmiştir. Örneğin;

$$V(x) = x^T P x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

Not: P reel ve simetriktir.

Quadratik formda $V(x)$ in pozitif definitliği Sylvester kriteri[12] ile tespit edilebilir. Burada $V(x)$ in pozitif definit olması için gerek ve yeter şartları P nin tüm birbirini peşpeşe takip eden başlıca minörlerinin pozitif olması ile sağlanır. Yani;

$$p_{11} > 0, \quad \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{vmatrix} > 0, \dots, \quad \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{12} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1n} & p_{2n} & \dots & p_{nn} \end{vmatrix} > 0$$

P tekil ve tüm başlıca minörleri negatif değil ise $V(x) = x^* P x$ pozitif semidefinitir.

$-V(x)$ pozitif definit ise $V(x)$ negatif definittir. Benzer bir ifade ile $-V(x)$ pozitif semidefinit ise $V(x)$ negatif semidefinitir.

3.3. LIAPUNOV'UN İKİNCİ METODU

1892 yılında A. M. Liapunov sıradan diferansiyel eşitliklerle dinamik sistemlerin kararlılıklarının tespit edilmesi için anlatılan iki metod gösterdi[13]. (Bunlar birinci ve ikinci metod olarak adlandırıldı.)

Birinci metod diferansiyel eşitliklerin çözümlerinin açıklanmasının analizi için kullanılan tüm işlemlerden ibarettir. Bu metod bizim burada ilgilendığımız konu ile şu an direkt alakalı olmadığı için ele alınmayacaktır.

İkinci metod, diferansiyel eşitliklerin çözümleri gerektirmez. Bu yüzden ikinci metod, kesin çözümleri bulunmayan nonlinear sistemlerin kararlılık analizi için tamamen uygundur.

3.3.1 Liapunov'un İkinci Metodu:

Mekanik'in klasik teorisinden[6] biliyoruz ki, bir titreşimli sistemin toplam enerjisi (pozitif definit fonksiyon) bir denge noktasına ulaşana kadar sürekli azalıyorsa (toplam enerjisinin zamana göre türevi negatif definit olmak zorundadır) kararlıdır[6].

Liapunov'un ikinci metodu şu gerçeklerin genellemesinden ibarettir: Eğer sistem bir asimptotik kararlı denge noktasına sahipse, o zaman sistemin depolanan enerjisi denge noktasındaki minimum değerine ulaşmaya kadar zamanla azalır. Ancak, tamamen matematiksel sistemler ile "enerji fonksiyonu" nu açıklamanın basit yolu yoktur. Bu zorluklar içerisinde Liapunov bir hayali (fictitious) enerji fonksiyonu ortaya koydu ve bu fonksiyon Liapunov fonksiyonu olarak adlandırıldı. Bu fikir enerji fonksiyonundan daha genel ve daha uygulanabilir bir yapıdadır. Gerçekte her hangi bir skaler fonksiyon Liapunov'un kararlılık teorem şartlarını sağlıyorsa Liapunov fonksiyonu olarak kullanılabilir. (Basit sistemler için, uygun Liapunov fonksiyonları tahmin edebiliriz; fakat karmaşık bir sistemde, Liapunov fonksiyonu bulmak epeyi zor olabilir.)

Liapunov fonksiyonlar $x_1, x_2, \dots, x_n$ ve t ye bağımlıdır. Biz bunları $V(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ veya basitçe $V(x, t)$ ile gösterebiliriz, eğer Liapunov fonksiyonlar t yi

açıkça içermez ise o zaman $V(x_1, x_2, \dots, x_n)$ veya $V(x)$ olarak gösterebiliriz. Liapunov'un ikinci metodun da $V(x, t)$ nin tavrı ve zamana göre türevi $V'(x, t) = dV(x, t)/dt$ nin tavrı bize direkt olarak çözüme ihtiyaç hissettirmeden bir denge noktasının kararsız, kararlı ve asimptotik kararlılığı hakkında bilgi verir. (Bu durum lineer ve nonlinear sistemler için uygulanabilir.)

3.3.2 Liapunov'un Asıl Kararlılık Teoremi:

Eğer bir skaler fonksiyon $V(x)$ (x , n boyutlu vektör) pozitif definit ise o zaman x in durumları,

$$V(x) = C$$

olur ki C n -boyutlu uzayda en azından orijin civarında kapalı bir hiperyüzey boyunca uzanan bir pozitif sabittir. Eğer $\|x\| \rightarrow \infty$ iken $V(x) \rightarrow \infty$ ise o zaman oluşan yüzey bütün uzayı kapsar. Eğer $C_1 < C_2$ ise hiperyüzey $V(x) = C_1$, hiperyüzey $V(x) = C_2$ nin içinde yer alır.

Verilen bir sistem için, eğer bir pozitif definit skaler fonksiyon $V(x)$ böyle bulunabiliyor ve onun bir yörünge boyunca zamana göre alınan türevi daima negatifse, o zaman, zaman arttıkça $V(x)$ daha küçülür ve C nin daha küçülen değerlerini alır. Zaman arttıkça, $V(x)$ sıfıra çekilir ve böylece x de sıfıra çekilir. Bu uzayın orijininin asimptotik kararlılığını gösterir. Bu bahsedilen gerçeklerin genellemesinden ibaret olan Liapunov'un asıl kararlılık teoremi asimptotik kararlılık için yeterli bir şart oluşturur. Bu teorem aşağıdaki gibi gösterilebilir:

3.3.3 Teorem 1.

Aşağıdaki şekilde tanımlı bir sistem farzedelim.

$$x' = f(x, t)$$

burada,

$$f(0, t) = 0 \quad \text{bütün } t \text{ ler için}$$

Öyle bir skaler fonksiyon $V(x, t)$ belirliyelim ki, sürekli olsun, ilk kısmi türevi olsun ve aşağıdaki yeterlilik şartlarını sağlasın,

1. $V(x, t)$ pozitif definittir
2. $V'(x, t)$ negatif definittir

o zaman orijindeki denge noktası uniform asimptotik kararlıdır.

Eğer toplamda $\|x\| \rightarrow \infty$ iken $V(x) \rightarrow \infty$ ise o zaman orijindeki denge noktası geniş anlamda uniform asimptotik kararlıdır.

3.3.4 Yorum

Her ne kadar teorem-1 ikinci metodun temel teoremi ise de biraz kısıtlıdır. Çünkü $V'(x,t)$ nin negatif olması gerekir. Ancak toplam sınırlama $V'(x,t)$ ye yüklenirse o zaman orijin haricinde yörünge boyunca sıfır olmaz. Böylece $V'(x,t)$ nin negatif definit olma şartı yerine $V'(x,t)$ negatif semidefinit şartını koymak mümkün olabilir.

3.3.5 Teorem 2.

Aşağıdaki ifade ile tanımlı bir sistem farzedelim,

$$\dot{x} = f(x,t)$$

burada,

$$f(0,t) = 0 \quad \text{tüm } t \geq t_0 \text{ için}$$

Öyle bir skaler fonksiyon $V(x,t)$ belirliyelim ki, sürekli olsun, ilk kısmi türevi olsun ve aşağıdaki yeterlilik şartlarını sağlasın,

1. $V(x,t)$ pozitif definitdir
2. $V'(x,t)$ negatif semidefinitdir
3. $V'(\phi(t;x_0,t_0),t)$, $t \geq t_0$ da herhangi bir t_0 ve herhangi bir $x_0 \neq 0$ için sıfır olmaz, burada $\phi(t;x_0,t_0)$, t_0 da x_0 dan yörünge veya çözümün başladığını gösterir.

O zaman, sistemin orijinindeki denge noktası uniform olarak geniş anlamda asimptotik kararlıdır.

Not olarak belirtelimki, eğer $V'(x,t)$ negatif definit değil fakat negatif semidefinit ise o zaman temsil noktasının yörüngesi bazı özel yüzeylere teğet olabilir $V(x,t)=C$. Ancak $V'(\phi(t;x_0,t_0),t)$ den, $t \geq t_0$ da herhangi bir t_0 ve herhangi bir $x_0 \neq 0$ için sıfır olmaz, temsili nokta teğet noktasından geri kalmaz. (eğer bu nokta $V'(x,t)=0$ a karşılık gelirse) ve orijine doğru hareket etmelidir.

Ancak, bir pozitif semidefinit skaler fonksiyon $V(x,t)$ varsa ki $V'(x,t)$ tamamen sıfır, o zaman bu sistem bir limit dairede kalabilir. Bu durumda Liapunov'un ikinci görüşüne göre orijindeki denge noktasının kararlı olduğu söylenebilir.

3.3.6 Kararsızlık

Eğer sistemin bir denge noktası $x=0$ kararsız ise, o zaman orada denge noktasının kararsızlığını tespit eden bir skaler fonksiyon $W(x,t)$ vardır.

3.3.7 Teorem-3.

Aşağıdaki gibi tanımlanan bir sistem düşünelim,

$$\mathbf{x}' = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$$

burada,

$$\mathbf{f}(0, t) = 0 \text{ tüm } t \geq t_0 \text{ için}$$

Öyle bir skaler fonksiyon $W(\mathbf{x}, t)$ belirliyelim ki, sürekli olsun, ilk kısmi türevi olsun ve aşağıdaki yeterlilik şartlarını sağlasın,

1. $W(\mathbf{x}, t)$ orijin civarında bazı bölgelerde pozitif definit
2. $W'(\mathbf{x}, t)$ de aynı bölgede pozitif definit

böylece orijinde denge noktası kararsızdır.

3.4. LİNEER SİSTEMLERİN KARARLILIK ANALİZİ

Lineer zamandan bağımsız sistemlerin asimptotik kararlılığının araştırılması için bir çok metod mevcuttur. Örneğin, sürekli zaman sistemi için,

$$\mathbf{x}' = \mathbf{A}\mathbf{x}$$

sistemin orijininin asimptotik kararlılığı için gerek ve yeter şart; $\mathbf{A}$ 'nın bütün köklerinin reel kısımlarının negatif olması veya karakteristik polinomu sıfır yapan köklerinin,

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A}| = s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n$$

reel kısımlarının negatif olmasıdır. Aynı şekilde, ayrık zaman sistemi için

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{G}\mathbf{x}(k)$$

orjinin asimptotik kararlılığı için gerekli ve yeter şart $\mathbf{G}$ nin bütün köklerinin büyüklükleri birden küçük olmalıdır veya karakteristik polinomu sıfır yapan köklerin

$$|z\mathbf{I} - \mathbf{G}| = z^n + a_1z^{n-1} + \dots + a_{n-1}z + a_n$$

z düzleminin orijininde birim dairenin merkezinin içinde bulunması ile belirlenir[2].

Daha yüksek derceli sistemler veya karakteristik polinomların coefficientlerinin bazılarının nümerik olmama durumunda sistem köklerinin bulunması zor veya imkansız olur. Böyle bir durumda, Routh'un kararlılık kriterine başvurmak uygun olabilir. Bu yaklaşıma Liapunov'un ikinci metodundan temellenen bir alternatif mevcuttur. Liapunov yaklaşımı cebirsel ve karakteristik fonksiyonların etkisini gerektirmez. Ayrıca, bu yaklaşım sistemin geçici tavrını

tahmin etmek için kullanılabilir ve sistem dizaynı için başvurulabilir. Zaten bu bölüm lineer zamandan bağımsız sistemlerin kararlılık analizine Liapunov yaklaşımını göstermek için yazıldı.

3.4.1 Lineer Zamandan Bağımsız Sistemlerin Liapunov Kararlılık Analizleri

Aşağıda verilen sistemi lineer ve zamandan bağımsız olarak düşünelim

$$\mathbf{x}' = \mathbf{A}\mathbf{x}$$

3- 3

burada $\mathbf{x}$ n-boyutlu bir durum vektörü ve $\mathbf{A}$ n çarpı n boyutlu sabit bir matristir. $\mathbf{A}$ nın tekil olmadığını farzedelim. O zaman denge noktası yalnızca orijin $\mathbf{x}=0$ da olur. Liapunov'un ikinci metodu kullanılarak lineer zamandan bağımsız sistemlerin denge noktasının kararlılığı kolayca araştırılabilir.

3- 3 denkleminde açıklanan sistem için, Liapunov fonksiyon olabilecek bir denklem seçelim,

$$V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^* \mathbf{P} \mathbf{x}$$

burada $\mathbf{P}$ pozitif belirli bir Hermitian matristir[14] (eğer $\mathbf{x}$ bir reel vektör ise o zaman $\mathbf{P}$ pozitif belirli reel simetrik matris olarak seçilebilir). Herhangi bir yörünge boyunca $V(\mathbf{x})$ in zamana göre türevi;

$$\begin{aligned} V'(\mathbf{x}) &= \mathbf{x}'^* \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{x}^* \mathbf{P} \mathbf{x}' \\ &= (\mathbf{A}\mathbf{x})^* \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{x}^* \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x} \\ &= \mathbf{x}^* \mathbf{A}^* \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{x}^* \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x} \\ &= \mathbf{x}^* (\mathbf{A}^* \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \mathbf{x} \end{aligned}$$

Eğer $V(\mathbf{x})$ pozitif definit olarak seçilirse, asimptotik kararlılık için $V'(\mathbf{x})$ in negatif definit olması gerekir. Bu yüzden

$$V' = -\mathbf{x}^* \mathbf{Q} \mathbf{x}$$

olarak seçilir ve burada,

$$\mathbf{Q} = -(\mathbf{A}^* \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) = \text{pozitif definit}$$

Bu sebepten 3- 3 eşitliğindeki sistemin asimptotik kararlı olabilmesi için $\mathbf{Q}$ nun pozitif definit olması yeterlidir. Bir n çarpı n matrisin pozitif definitliğinin tespiti için Sylvester kriterine başvuruz ki Sylvester kriterinde matrisin pozitif definit olması için gerek ve yeter şart matrisin bütün birbirini takip eden başlıca minörlerinin determinantlarının pozitif olması idi.

İlk önce pozitif definit matris P yi seçip Q nun pozitif definit olup olmadığına bakmak yerine ilk önce Q yu seçip aşağıdaki

$$A^*P + PA = -Q$$

denkleminde P yi tespit etmek daha uygundur. Not olarak P nin pozitif definit olmasının gerek ve yeter şart olduğunu söyleyelim.

3.4.2 Teorem-4.

Aşağıdaki şekilde tanımlanan sistem hakkında düşünelim,

$$\dot{x} = Ax$$

burada x n-boyutlu bir durum vektörü ve A n çarpı n boyutlu sabit tekil olmayan bir matrisdir. Verilen herhangi bir pozitif definit Hermitian (veya reel simetrik) matris Q için gerek ve yeter şart denge noktasının $x=0$ geniş anlamda asimptotik kararlı olmasıdır ki bulunan bir pozitif definit Hermitian (veya reel simetrik) matris P şöyledir,

$$A^*P + PA = -Q$$

Skaler fonksiyon x^*Px bu sistem için bir Liapunov fonksiyondur (eğer denge noktası (orijin) asimptotik kararlı ise o zaman lineer sistemde geniş anlamda asimptotik kararlıdır).

Bu teoremi uygularken birkaç önemli nokta dikkate alınır.

1. Eğer $V'(x) = -x^*Qx$ herhangi bir yörünge boyunca sıfır olmuyorsa, o zaman Q pozitif semidefinit olarak seçilebilir.
2. Eğer Q gibi rastgele bir pozitif definit matris seçersek (veya Q gibi bir rastgele pozitif semidefinit matris eğer, $V'(x)$ herhangi bir yörünge boyunca sıfır olmuyorsa) ve P nin tespiti için matris denklemi çözülürse

$$A^*P + PA = -Q$$

P nin pozitif definitliği $x=0$ denge noktasının asimptotik kararlılığı için gerek ve yeter şarttır.

3. Son olarak eğer Q pozitif definit (veya pozitif semidefinit) ise P nin çözümü Q dan ziyade A ya bağlıdır
4. P matrisinin elemanlarının tespiti için $A^*P + PA$ matrisi ile $-Q$ matrisinin elemanlarını bire bir eşleriz. Bu sonuçlar P nin $p_{ij} = \bar{p}_{ji}$ elemanlarının

tespiti için $n(n+1)/2$ de lineer eşitliklerdir. Eğer A nın sistem köklerini $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ile gösterirsek karakteristik eşitliğin bir kökü gibi her tekrarlanmada onun çarpımı kadar sıklaşır ve eğer iki kökün her toplamı için,

$$\lambda_j + \lambda_k \neq 0$$

ise o zaman P nin elemanları birbirinden farksızca belirlenir. Eğer matris A , bir stabil sistem gösterirse, o zaman $\lambda_j + \lambda_k$ toplamı daima sıfırdan farklıdır.

5. Bir pozitif definit Hermitian (veya reel simetrik) matris P varmı yokmu diye tespit edilir, eğer I benzer bir matris ise $Q=I$ seçmek uygun olur. O zaman P nin elemanları,

$$A^*P + PA = -I$$

dan belirlenir ve P matrisi pozitif definitlik için test edilir.

3.5. NONLINEER SİSTEMLERİN KARARLILIK ANALİZİ

Lineer sistemde eğer bir denge noktası lokal asimptotik kararlı ise, geniş anlamda asimptotik kararlıdır. Ancak nonlinear sistemde bir denge noktası lokal asimptotik kararlı olabilir ve bu geniş anlamda asimptotik kararlı olmasını gerektirmez. Böylece nonlinear sistemler ve lineer sistemlerin denge noktasının, asimptotik kararlılıklarının ilgisi birbirinden tamamen farklıdır. Örneğin aşağıdaki denklem üzerinde düşünelim,

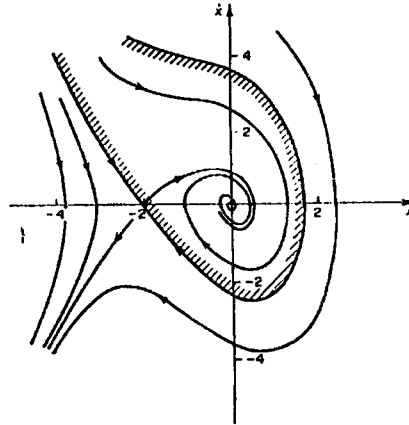
$$x'' + 0.5x' + 2x + x^2 = 0$$

Şekil3-3 bu sistem için faz planını gösterir. Bu durumda orijin asimptotik kararlıdır. Fakat görüldüğü gibi yörünge dış noktadan başlıyor, kırılma bölgesinden sosuza gidiyor. Gerçekten asimptotik kararlılığın lokal özellik olduğu bu örnekten açıkça görülür.

Çünkü nonlinear sistemlerin kararlılığı doğal olarak bölgeseldir, bu yüzden biz genellikle orijin civarında en geniş bölgede yeterli kararlılık şartlarını sağlayan Liapunov fonksiyonunu ararız.

Liapunov'un ikinci metodundan ortaya çıkan birkaç metod, nonlinear sistemlerin kararlılığının testi için uygundur. Bu kısımda bu şekildeki iki metod gösteriliyor. Bunlar, asimptotik kararlılığın testi için Krasovskii'nin metodu[15] ve

Liapunov fonksiyonların genellenmesi için Schultz Gibson'ın değişken gradient metodudur[15].



Şekil3- 3: $x''+0.5x'+2x+x^2=0$ ile tanımlanan sistemin faz plan diagramı.

3.5.1 Krasovskii'nin Metodu

Nonlineerliği kesin olan sistemler için, durum değişkenlerin şartlarındansa $\mathbf{x}'$ nün şartları tercih edilir ve buradan bir Liapunov fonksiyon seçilebilir. Krasovskii, Liapunov fonksiyonun $V=\|\mathbf{x}'\|^2$ veya $\mathbf{x}'$ nün Öklid normlarında olmasını öneriyor.

Aşağıda gösterilen Krasovskii'nin teoremi, denge noktasından küçük ayrılıklarla sınırlandırılmaz. Bu genel linerizasyon yaklaşımından esas olarak farklıdır. Krasovskii'nin teoremi, geniş anlamda asimptotik kararlılığın belirlenmesinde nonlineer sistemler için yeterli şartları ve lineer sistemler içinde gerekli ve yeterli şartları verir. (Bir nonlineer sistemin denge noktası, bu teoremdeki şartlar onun yeterli olmadığını gösterse de kararlı olabilir. Böylece Krasovskii'nin teoremini kullanırken dikkatli olmalıyız ki verilen nonlineer sistemin denge noktasının kararlılığı hakkında doğru olmayan sonuçlara varmayalım.)

Bir nonlineer sistemde birden fazla denge noktası olabilir. Ancak, uygun koordinat değişimi ile herhangi bir izole edilmiş denge noktasının orijinine transfer etmek mümkündür. Böylece denge noktasının orijinde olması şartı altında düşünmeliyiz.

Şimdi Krasovskii'nin teoremini gösterelim.

Teorem 6. (Krasovskii'nin teoremi). Aşağıdaki şekilde tanımlı bir sistem üzerinde düşünelim.

$$\mathbf{x}'=\mathbf{f}(\mathbf{x})$$

Burada $\mathbf{x}$ n boyutlu vektör. Farzedelimki $\mathbf{f}(0)=0$ ve $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ x_i ile diferansiyellenebilen bir fonksiyon ($i=1,2,...,n$). Bu sistem için $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ jakoben matrisi;

$$F(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

Açıklama;

$$\mathbf{F}^*(\mathbf{x}) = \mathbf{F}^*(\mathbf{x}) + \mathbf{F}(\mathbf{x})$$

Burada $\mathbf{F}^*(\mathbf{x})$, $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ in eşlenik transpozudur. Eğer Hermitian matris $\mathbf{F}^*(\mathbf{x})$ negatif definit ise o zaman denge noktası $\mathbf{x}=0$ da asimptotik karardır. Bu sistem için bir Liapunov fonksiyon aşağıdadır;

$$V(\mathbf{x}) = \mathbf{f}^*(\mathbf{x})\mathbf{f}(\mathbf{x})$$

eğer toplamda $\|\mathbf{x}\| \rightarrow \infty$ iken $\mathbf{f}^*(\mathbf{x})\mathbf{f}(\mathbf{x}) \rightarrow \infty$ ise, o zaman denge noktası geniş anlamda asimptotik karardır[5].

3.5.2 İspat

Eğer $\mathbf{F}^*(\mathbf{x})$ tüm $\mathbf{x} \neq 0$ için negatif definit ise $\mathbf{F}$ in determinanı $\mathbf{x} \neq 0$ haricinde her yerde sıfırdan farklıdır. O zaman tüm uzayda $\mathbf{x}=0$ dan başka denge noktası yoktur. Eğer $\mathbf{x} \neq 0$ ve $V(\mathbf{x}) = \mathbf{f}^*(\mathbf{x})\mathbf{f}(\mathbf{x})$ için, $\mathbf{f}(0)=0$, $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \neq 0$ ise $V(\mathbf{x})$ pozitif definittir.

$$\mathbf{f}'(\mathbf{x}) = \mathbf{F}(\mathbf{x})\mathbf{x}' = \mathbf{F}(\mathbf{x})\mathbf{f}(\mathbf{x})$$

V' nü şu şekilde bulabiliriz.

$$\begin{aligned} V'(\mathbf{x}) &= \mathbf{f}^*(\mathbf{x})\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{f}^*(\mathbf{x})\mathbf{f}'(\mathbf{x}) \\ &= [\mathbf{F}(\mathbf{x})\mathbf{f}(\mathbf{x})]^* \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{f}^*(\mathbf{x})\mathbf{F}(\mathbf{x})\mathbf{f}(\mathbf{x}) \\ &= \mathbf{f}^*(\mathbf{x})[\mathbf{F}^*(\mathbf{x}) + \mathbf{F}(\mathbf{x})]\mathbf{f}(\mathbf{x}) \\ &= \mathbf{f}^*(\mathbf{x})\mathbf{F}^*(\mathbf{x})\mathbf{f}(\mathbf{x}) \end{aligned}$$

Eğer $\mathbf{F}^*(\mathbf{x})$ negatif definit ise $V'(\mathbf{x})$ in de negatif definit olduğunu görürüz. Buradan da $V(\mathbf{x})$ in bir Liapunov fonksiyon olduğunu görürüz. Böylece orijin asimptotik karardır. Eğer $\|\mathbf{x}\| \rightarrow \infty$ iken $V(\mathbf{x}) = \mathbf{f}^*(\mathbf{x})\mathbf{f}(\mathbf{x})$ sonsuza giderse denge noktası teorem 1 den geniş anlamda asimptotik kararlı olur.

No. olarak $\mathbf{F}^*(\mathbf{x})$ in negatif definit olması, $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ in asıl köşegeninde sıfır olmayan elemanlara sahip olmasını gerektirir. Böylece, eğer $f_i(\mathbf{x})$ x_i yi içermez ise, o zaman $\mathbf{F}^*(\mathbf{x})$ negatif definit olamaz.

3.5.3 Değişken Gradient Metod

Değişken Gradient metod şuradan çıkarılır; eğer verilen bir sistem için kararlılığın doğruluğunu gösterebilen özel bir Liapunov fonksiyon varsa o zaman bu V fonksiyonunun bir gradienti de vardır[5].

Aşağıdaki eşitlik ile verilen sistem üzerinde düşünelim:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$$

Uzayın orjiniinde olan bir denge noktası farzedelim. (Daha önce belirtildiği gibi, herhangi bir izole edilmiş denge noktası daima orjine taşınabilir.) V ile bir test Liapunov fonksiyonu gösterelim. Bu fonksiyonda farzediyoruz ki, V , $\mathbf{x}'$ 'in açık fonksiyonu fakat t nin değildir. Öyleyse;

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x_1} x'_1 + \frac{\partial V}{\partial x_2} x'_2 + \dots + \frac{\partial V}{\partial x_n} x'_n$$

buradan şu şekilde yazılabilir;

$$\dot{V} = (\nabla V)^* \mathbf{x}'$$

Burada $(\nabla V)^*$, ∇V nin transpozudur. V nin gradyenti ∇V şöyle olur,

$$\nabla V = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial V}{\partial x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla V_1 \\ \vdots \\ \nabla V_n \end{bmatrix}$$

$\dot{V}$, ∇V nin çizgisel integrali gibi elde edilebilir.

$$\dot{V} = \int_0^x (\nabla V)^* dx$$

3- 4

Burada integralin üst limiti $\dot{V}$ nin bir vektör büyüklüğü olduğunu göstermez, fakat integral uzayda rastgele bir noktanın $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ çizgisel integraline tercih edilir. Bu integral integrasyon metodundan bağımsız yapılabilir.

Bir skaler fonksiyon V bir vektörel fonksiyon ∇V nin çizgisel integralinden tek bir şekilde elde edilebilmesi için, aşağıdaki F matrisi $\frac{\partial V_i}{\partial x_j}$ ile şekillendi.

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} & \frac{\partial V_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial V_2}{\partial x_1} & \frac{\partial V_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial V_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial V_n}{\partial x_1} & \frac{\partial V_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

matris simetrik olmalıdır. Böylece, aşağıdaki eşitliğin sağlanması gerekir,

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_j} = \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \quad (i,j=1,2,\dots,n)$$

Bu eşitliklerin toplam sayısı $n(n-1)/2$ dir. Örneğin, $n=3$ durumunda, üç eşitlik vardır;

$$\frac{\partial V_2}{\partial x_1} = \frac{\partial V_1}{\partial x_2}, \frac{\partial V_3}{\partial x_1} = \frac{\partial V_1}{\partial x_3}, \frac{\partial V_3}{\partial x_2} = \frac{\partial V_2}{\partial x_3}$$

∇V matrisindeki bu şarttan dolayı n boyutlu durum için bir genel rotasyonel ihtiyacı böyledir. Liapunov teoremi için yeterli olan bir V fonksiyonunu tesbit etmenin problemi bir ∇V bulma problemine dönüşür, ∇V nin bu n boyutlu rotasyoneli sıfıra eşittir. Daha ilerisinde ∇V den belirlenen V ve V' kararlılığın ispatı için yeterli olmalıdır; bunlar Liapunov teoremine yeterli olmalıdır. İlk kurulan ∇V bir rastgele sütun vektörüne eşittir.

Eğer nonlinear sistemlerin $x=0$ daki denge noktası asimptotik kararlı ise, o zaman Liapunov fonksiyonunu aşağıdaki usul ile elde edebiliriz.

1. ∇V seçilir.
2. ∇V den V belirlenir.
3. V , negatif definit veya en azından negatif semidefinit olmaya zorlanır.
4. “ ∇V deki bilinmeyen elemanları belirlemek için F simetrik olmalıdır” cümlesinin işaret ettiği $n(n-1)/2$ rotasyonel denklemi kullanılır.
5. V' tekrar kontrol edilir, gerekli terimlerin eklenmesi ile 4. adımın sonuçları V' nü değiştirebilir.

6. 3- 4 eşitliği ile V belirlenir.

7. Asimptotik kararlılığın bölgesi kontrol edilir.

Bu metodla uygun Liapunov fonksiyon elde edilmesinde başarısızlık, denge noktasının kararsızlığını göstermez.

3.6. SONUÇLARIN YORUMLANMASI

Bu bölümün sonunda, önemli noktaların hatırlanması için şunları özetleyelim:

1-Bir Liapunov fonksiyon aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- a) Skaler fonksiyondur.
- b) En azından orijin civarında pozitif definitir.
- c) Zamana göre türevi pozitif değildir.
- d) Verilen bir sistem için yeğane fonksiyon değildir.

2- Liapunov'un ikinci metodunun bir avantajı da, lineer ve nonlinear sistemlerin ikisi içinde geniş anlamda kararlılık bilgilerini verebilmesidir.

3- Eğer bir Liapunov fonksiyon, uzayda orijini içine alan bir Ω bölgesinde bulunabiliyorsa, o zaman orijinin kararlılığı doğrulanabilir. Ancak bu gerekli değil, yani, eğer Liapunov'un ikinci metodu yalnızca kararlılığın yeter şartları için kuruluysa, o zaman yörünge bir Ω bölgesinin dışındaki durumdan başlar ve belirsizliğe yaklaşır. (Hatırlarsak, Liapunov fonksiyonun kullanılmasında başarısızlığın denge noktasının kararlılık, kararsızlık veya asimptotik kararlılığını göstermekte herhangi bir anlamı yoktur.)

4- Eğer sistemin orijini kararlı veya asimptotik kararlı ise, o zaman bu sistem için gerekli özellikleri taşıyan bir Liapunov fonksiyon muhakkak vardır, ancak birini bulmak çok zor olabilir. Bu zorluk Liapunov'un ikinci metodunda kararlılık analizinin esas problemini oluşturuyor.

5- Bir kararlılık kriterinin tanıtımına ek olarak, Liapunov fonksiyonlar basit sistemlerin geçici cevap analizi için kullanılabilir. Liapunov fonksiyonlar kuadratik performans değişimlerinden oluşan optimizasyon problemlerinin çözümü için de kullanılabilir.

6- Liapunov fonksiyonlar güç sistemlerinin gerilim kararlılığı analizinde kullanılabilir ve özel bir kullanımı burada gösterilecektir.

BÖLÜM 4.

4.1. TEK MAKİNA TEK JENERATÖR VE SONSUZ BARA İÇİN DİNAMİK ANALİZ VE ENERJİ FONKSİYONU

Gerilimin çökmesinin konu edildiği bir çok raporda bu çöküşün büyük bir arızadan hemen sonra görüldüğü anlatılıyor. [1] deki sistemde; Arızanın başlamaması gerilim çökmesi ile geçici kararlılık arasındaki farklardan birisidir. Bunun yerine, sistemin çalışma noktası (dakikadan saate bir zaman skalasında) genellikle yavaş yavaş artan averaj yükün etkisi altında hareket eder. Bu senaryonun analizi yükün zamanla değişimi ile ilgilidir. Yükün ortalama değeri çok yavaşça değiştirilir iken geniş band frekans spektrumu ile birlikte bu ortalamanın olması ile ilgili küçük (%1-2 gibi) rastgele değişkenler beklenir. Yük modelleri üzerinde yapılan bütün araştırmalar, böyle küçük tesadüfi etkilerin yükteki gürültü ifadesiyle modellenebilirliğini defalarca göstermiştir [2], [3]. Bu tesadüfi değişikliklerin güçlü çalışma noktasındaki etkileri ihmal edilebilir, fakat çalışma noktası kritik noktaya yakın ise o zaman bunlar önemli olabilir. Referans [3] de çökme bara gerilimine yakın çalışma bölgesinin yükteki değişimlere karşı oldukça hassas olduğu gösterilmektedir.

Bu çalışma için, şekil1-1 de gösterilen yük modeli kullanılır. Jeneratör için de klasik model kullanıldığında, sistem eşitliği aşağıdaki ifade ile veriliyor,

$$\delta'_m = w$$

4-1

$$Mw' = -D_m w + P_m + E_m Y_m V \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin(\theta_m)$$

4-2

$$K_{qw} \delta' = -K_{qv2} V^2 - K_{qv} V + E'_0 Y'_0 V \cos(\delta + \theta'_0) + E_m Y_m V \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) - (Y'_0 \cos(\theta'_0) + Y_m \cos(\theta_m)) V^2 - Q_0 - Q_1$$

4-3

$$K_{qw} K_{pv} V' = K_{pw} K_{qv2} V^2 + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V + K_{pw} (Q_0 + Q_1 - Q) K_{qw} (P_0 + P_1 - P)$$

4-4

$P_m = P_L$ (Jeneratör mekanik gücü, aktif yükün kayıplarına denktir) koşulu altında yukarıdaki denklemler tekrar yazılabilir;

$$\bar{w}' = -\frac{D}{M^2} M\bar{w} - \frac{1}{M} f(\delta, \bar{\delta}_m, V)$$

4-5

$$\delta'_m = \frac{1}{M} M\bar{w}$$

4-6

$$\delta' = -g(\delta, \delta_m, V)$$

4-7

$$V' = -h(\delta, \delta_m, V)$$

4-8

burada,

$$f(\delta, \delta_m, V) = -(P_m + E_m Y_m V \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin(\theta_m))$$

4-9

$$g(\delta, \delta_m, V) = -\frac{1}{K_{qw}} (-K_{qv2} V^2 - K_{qv} V + E'_0 Y_0 V \cos(\delta + \theta'_0) + E_m Y_m V \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) - (Y'_0 \cos(\theta'_0) + Y_m \cos(\theta_m)) V^2 - Q_0 - Q_1)$$

4-10

$$h(\delta, \delta_m, V) = -\frac{1}{TK_{qw} K_{pv}} (K_{pw} K_{qv2} V^2 + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V + K_{pw} (Q_0 + Q_1 - Q) - K_{qw} (P_0 + P_1 - P))$$

4-11

4-1, 4-2, 4-3, 4-4 denklemleri ile verilen diferansiyel denklemlerin bu karışık sistemi, yüksek gerilim çalışma noktası civarında oldukça kompleks yük modellemesini içeren basit sistem modelinin tanımıdır. Fakat gerilim düşük olduğu zaman geçerli bir çözümü olmayabilir[4]. Gerilim çöküşünün analizi için bu sisteme gerekli olan model, muhtemelen gerilim çöküşünde karşılaşılan gerilimin tüm aralığı üzerindeki davranışları en azından nitelik olarak uygun olduğu modeldir.

4.2. GRADIENT SİSTEMİ KULLANARAK LIAPUNOV FONKSİYONUN ARAŞTIRILMASI

Belkide dinamik sistemin en basit formunda, kolayca oluşturulan Liapunov fonksiyon Gradient sistemdir[5].

Bu formun bir sistemi üzerinde düşünelim;

$$\mathbf{x}' = -A \nabla v(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)$$

4-12

burada;

$v, \mathcal{R}^n \times \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ devamlı olarak diferansiyellenebilir.

$$A \in \mathcal{R}^{n \times n}, \det(A) \neq 0$$

$$v(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = 0, \mathbf{x} = \mathbf{x}_0 \text{ da}$$

Açıkça, 4-12 denkleminde $v(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)$ doğal bir Liapunov fonksiyon adayı olarak vardır. Eğer $\mathbf{x}_0$ da $v(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0)$ ın Hessian'ı tamamen pozitif definite ise $\mathbf{x}_0$ da denge noktası asimptotik kararlıdır.

Liapunov fonksiyon aşağıdaki denklem ile verilir[6]:

$$V(\mathbf{x}) = \int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} [f(\xi)]^T d\xi$$

4-13

4.3. BASİT BİR GÜÇ SİSTEMİ İÇİN LIAPUNOV FONKSİYON FORMUNA GRADIENT SİSTEMİN TANIMLANMASI

Şekil1-1 de görülen sistem için Liapunov fonksiyonun elde edilmesinde 4-5, 4-6, 4-7, 4-8, denklemleri aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$\begin{bmatrix} \delta'_m \\ w' \\ \delta' \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & \frac{D}{M^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(\delta_m, \delta, V) \\ Mw \\ g(\delta_m, \delta, V) \\ h(\delta_m, \delta, V) \end{bmatrix}$$

4-14

direkt hesaplamalar bunların aynı olduğunu gösterir; ya i 4-1, 4-2, 4-3, 4-4 denklemlerinde tanımlanan sistem için denklem 4-14 bu sistem dinamikleri için alternatif bir tanımlamadır.

4-14 denklemini incelersek, $(w_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)$ ın bir denge noktası için, 4-14 denkleminin sağ tarafında görülen bir aday enerji fonksiyon (4-14 denkleminin sağ tarafında görülen (3×1) gradient matris) elde edilebilir ve böylece 4-13 denkleminde kullanılabilir. Aday enerji fonksiyonu üzerinde düşünelim:

$$v(w, \delta_m, \delta, V) = \int_{(w_0, \delta_{m0}, \delta_0, V_0)}^{(w, \delta_m, \delta, V)} \begin{bmatrix} Mx \\ f(\lambda, y, z) \\ g(\lambda, y, z) \\ h(\lambda, y, z) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \\ dy \\ dz \end{bmatrix}$$

4-15

$f(w, \delta_m, \delta, V)$, $g(w, \delta_m, \delta, V)$ ve $h(w, \delta_m, \delta, V)$ yı 4-15 denkleminde yerine koyarsak, güç sisteminin enerji fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} v(w, \delta_m, \delta, V) = & -\frac{1}{2} Mw^2 - P_m \delta_m - \cos(\delta - \delta_m - \theta_m) E_m Y_m V - E_m^2 Y_m \sin(\theta_m) \delta_m \\ & + 0.348 P_m + \cos(-\delta + .348 + \theta_m) E_m Y_m V + .348 E_m^2 Y_m \sin(\theta_m) - Q_0 \delta - K_{qv2} V^2 \delta - Q_1 \delta \\ & - K_{qv} V \delta + \sin(\delta + \theta'_0) E'_0 Y'_0 V - V^2 Y'_0 \cos(\theta'_0) \delta + \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) E_m Y_m V - \\ & V^2 Y_m \cos(\theta_m) \delta + 0.138 K_{qv2} V^2 + 0.138 Q_1 + 0.138 K_{qv} V - \sin(.138 + \theta'_0) E'_0 Y'_0 V \\ & - \sin(0.138 - \delta_m + \theta_m) E_m Y_m V + 0.138 V^2 Y'_0 \cos(\theta'_0) + 0.138 V^2 Y_m \cos(\theta_m) + 0.138 Q_0 \\ & - .2596 K_{qw} Y'_0 \cos(\theta'_0) - .5 K_{qw} K_{pv} V^2 + .5 K_{pw} K_{qv} V^2 - .2596 K_{qw} Y_m \cos(\theta_m) + \\ & \frac{1}{3} K_{pw} K_{qv2} V^2 - .2596 K_{pw} Y'_0 \cos(\theta'_0) - .2596 K_{pw} K_{qv2} - .92 K_{pw} Q_1 + .92 K_{qv} P_1 + .92 K_{qv} P_0 \\ & + .4232 K_{qv} K_{pv} - .4'232 K_{pw} K_{qv} - .2596 K_{pw} Y_m \cos(\theta_m) + .4232 K_{qv} E_m Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) \\ & + .4232 K_{qv} E'_0 Y'_0 \sin(\delta + \theta'_0) - .92 K_{pw} Q_0 + .4232 K_{pw} E_m Y_m \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) \\ & + .4232 K_{pw} E'_0 Y'_0 \cos(\delta + \theta'_0) + K_{pw} Q_1 V + \frac{1}{3} K_{pw} Y'_0 \cos(\theta'_0) V^3 + K_{pw} Q_0 V \\ & + \frac{1}{3} K_{qv} Y'_0 \cos(\theta'_0) V^3 + \frac{1}{3} K_{qv} Y_m \cos(\delta + \theta_0) V^2 + \frac{1}{3} K_{qv} Y_m \cos(\theta_m) V^2 \\ & - .5 K_{pw} E'_0 Y'_0 \cos(\delta + \theta'_0) V^2 - .5 K_{pw} E_m Y_m \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) V^2 - .5 K_{qv} E'_0 Y'_0 \sin(\delta + \theta'_0) V \\ & - .5 K_{qv} E_m Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) V^2 - K_{qv} P_0 V - K_{qv} P_1 V \end{aligned}$$

4-16

Tek jeneratör ve sonsuz bara sisteminin bir enerji fonksiyonu olan yukarıdaki 4-16 denklemi, sistem frekansı, yükün aktif ve reaktif gücü, yük gerilimi, yük açısı, jeneratör açısı, sabit parametreler ($K_{qv}, K_{pv}, K_{qw}, K_{pw}, vs.$) ile alakalı tüm parametreleri içerir ve sistem frekansı, gerilim, reaktif ve aktif güç ile şekil-1 in Thevenin eşdeğerine yerleştirilen kapasite “C” arasındaki ilişkileri ifade eder.

4.4. TEK MAKİNE VE SONSUZ BARA SİSTEMİ İÇİN ANALİZLER

Aşağıdaki analizler bu enerji fonksiyonu için kullanılacaktır[5]:

4.4.1. Analiz 1

Liapunov fonksiyon olarak kullanılan $v(x, x_0)$ için gerekli olan birinci kabul A , $\nabla v(x, x_0)$ ve 4-12 nin yörüngelerinin yapısıyla ilgilidir.

$$S = \{x \mid \nabla v(x, x_0)^T (A + A^T) \nabla v(x, x_0) = 0\}$$

4-17

$(A + A^T)$ matrisi pozitif semidefinittir.

4.4.2. Analiz 2

4-14 denkleminin denkliği yalnızca $\nabla v = 0$ noktalarında olur. Bu 4-14 denklemden takip edilir ve A tekil değildir.

4.4.3. Analiz 3

4-14 denkleminin linerizasyonu bir denklik noktasında kesin kararlıysa, yani tüm sistem köklerinin reel kısımları tamamen negatif ise, o zaman dengede değerlendirilen $v(w, \delta_m, \delta, V)$ nin Hessian'ı (ikinci türevi) tamamen pozitif reel sistem köklerine sahiptir. Bu sıra ile anlatılanlar $v(w, \delta_m, \delta, V)$ nin bu denklik noktasında bölgesel pozitif definit olduğunu gösterir.

Yukarıdaki analizlerin üçünden küçük bozucu etki kararlılığı olan bir çalışma noktası için, önerilen enerji fonksiyonu tamamen Liapunov fonksiyondur sonucuna varılabilir.

Gerilim çökmesi durumunda, yük yavaş yavaş artar ve böylece yüksek gerilim denkliği (normal güç-akış çözümü) alçak gerilim denkliğine yaklaşır. Yükteki bu artış potansiyeli azaltır ve devrilme noktasını küçültür ve en kolay kaçış yolunu gösterir. O zaman enerji fonksiyonu, yük değişimlerinin, bu sistem durumunu en yakın kararsızlık denklik noktasına iteceğini gösteren bir ölçü ortaya koyar.

4.5. DEPOLANMIŞ ENERJİ VE YÜK

Eğer güç sistemleri, iletim hatları, yükler, transformatörler, kapasitörler ve jeneratörlerden oluşursa, bunların herbiri indüktör ve kapasitörlerin şartlarında modellenebilirler. İyi bilinir ki indüktör ve kapasitörler kuruldukları yerde enerji depoluyabilirler. Bu arada güç sistemlerinin, iletim hatlarında, yükte, trafolar ve jeneratörlerde enerji depoluyabildiklerini göstermek için güç sisteminin bir enerji gösterilimi oluşturulmalıdır. Böylece Liapunov teorisi şekil1-1 deki sistemin tüm depolanan enerjisini gösterir.

Ancak güç sisteminin bu enerji gösterilimi sitem kararlılığı içinde bilgi sağlayabilir. Böylece bu çalışmadan güç sistemindeki tüm kararlılık ve depolanan enerjiyi elde edebiliriz.

Analiz, jeneratör rotor açısı δ_m ($1-\delta_m=0.8\text{rad.}$, $2-\delta_m=1.6\text{rad}$) ve yük durum değişkenlerine dayanan iki araştırma içerecektir. Sistem için denge noktası :

$$(\delta_m^*, w^*, \delta^*, V^*) = (0.348, 0.0, 0.138, 0.92)$$

4.6. ANALİZ 1: JENERATÖR ROTOR AÇISI $\delta_m=0.8\text{rad.}$,

SİSTEMİN FREKANSI $w=1\text{p.u}$

Bu analizde önemli olan 4 tane durum değişkeni vardır. Bunlar

w = Sistem frekansı (Hertz)

δ_m = jeneratör rotor açısı (Radyan)

δ = Yük açısı (Radyan)

V = Yük gerilimi (Volt,pu)

Bu çalışmanın asıl amacı, güç sisteminin tüm enerjisi üzerinde yükün ne çeşit etkilere sahip olabileceğidir. Şekil1-1 deki enerji değişimlerini incelemek için, enerji fonksiyonu 4-16, δ ve V gibi yükü belirten durum değişkenlerini içermelidir. Bununla birlikte jeneratör rotor açısı δ_m sistemde depolanan enerji seviyesini etkileyebilir.

$$v(\delta, V) = 1.872V^3 + a_2V^2 + a_1V + a$$

4-18

burada

$v(\delta, V)$ = Enerji fonksiyonu

V =Yük gerilimi

δ =Yük açısı

$$a_2 = 1.515 - 15.005\delta + 075\sin(\delta - .887) \\ + .3\sin(\delta - .217) - \cos(\delta - .887) - 4\cos(\delta - .217)$$

4-19

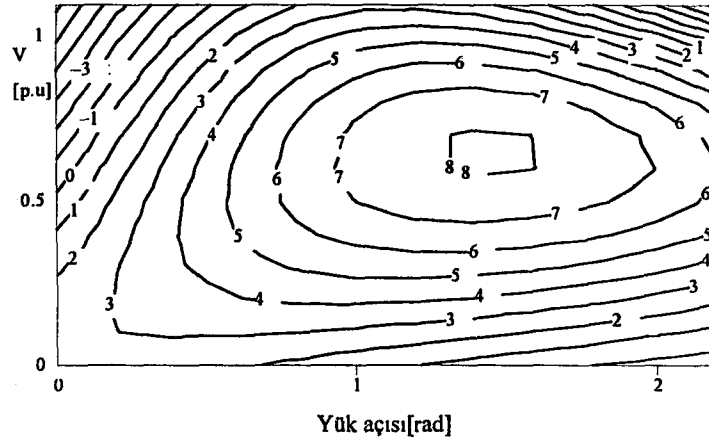
$$a_1 = 5.126 + 5\cos(-\delta + .261) - 5\cos(-\delta + .713) \\ + 5\sin(\delta - .887) + 20\sin(\delta - .217) + 2.8\delta$$

4-20

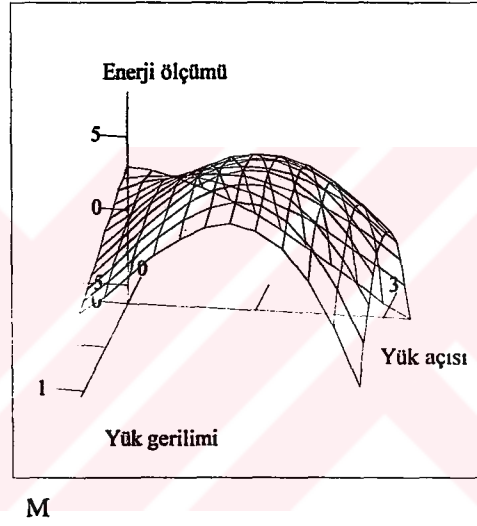
$$a = -.063\sin(\delta - .887) - .254\sin(\delta - .217) \\ + .846\cos(\delta - .887) + 3.386\cos(\delta - .217) - 1.3\delta - 1.408$$

4-21

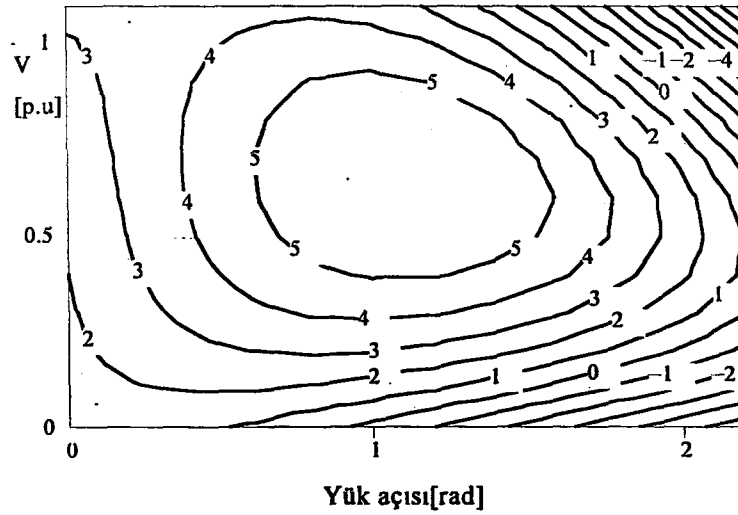
Tablo 1 (eklere bak) enerji ölçümüne göre, farklı yük açıları δ ve yük gerilimleri V için enerji fonksiyonunun (4-18) nümerik değerlerini gösterir, jeneratör rotor açısı $\delta_m = 0.8\text{rad.}$ ve sistem frekansını $w = 1\text{pu.}$ olarak kabul edelim. Yukarıdaki sonuçların grafiksel gösterilimi eş yükselti eğrileri olarak Şekil4- 1 de ve üç boyutlu olarak Şekil4- 2 de gösterilebilir. İki boyutlu eş yükselti grafiği enerji radyasyonunu veya diğer bir deyişle farklı çalışma noktalarında enerji yoğunluğunu gösterir. Her eş yükselti çizgisinin tablo 1 den belirlenebilen sabit enerji değerleri vardır. Şekil4- 1 aynı enerji seviyesinde sistemin alçak gerilim ve yüksek gerilimde çalışabileceğini gösterir. Eğer sistemin çalışması alçak gerilimde yapılamazsa, geriye tek seçenek yüksek gerilim çalışması kalır. Böylece yüksek gerilim seviyesine karar verilir ve o zaman yüksek gerilim seviyesine uyan yük açısı kolayca seçilebilir. Şekil4- 1 de enerji yoğunluğunun $0.6 < V \leq 1$ ve $1 \leq \delta \leq 1.4\text{rad.}$ arasında olacağı gözlenir. Bu noktalar etrafında enerji kuvveti 6 ve 8 (enerji ölçümü) arasında değişir. Çalışma notasına bağlı olarak, sistemin tüm depolanan enerjisinin sistem yükünün zamanla değişmesi ile alçalır veya yükselir olduğu gözlemlenir. Bu depolanmış enerji seviyesinin alçalması ve yükselmesi, alçak yük gerilimi ve yüksek yük gerilimi çalışmalarına tekabül eder. Böylece, sistem tarafından tolere edilemeyecek yük değişimleri arasındaki sınır kolayca belirlenebilir. Bu da gösterir ki $\delta_m = 0.8\text{rad.}$ ın seçimi ile oluşan bu yeni denklik noktası sistemin kararsız olmasına sebep olmadan daha büyük gerilim değişimleri olabilir.



Şekil4- 1: Güç sisteminin iki boyutlu enerji gösterilimi: $\delta_m=0.8\text{rad.}$ ve $w=1\text{pu}$



Şekil4- 2: Güç sisteminin enerjisinin üç boyutlu gösterilimi: $\delta_m=0.8\text{rad.}$ ve $w=1\text{pu}$



Şekil4- 3: Güç sisteminin enerjisinin iki boyutlu gösterilimi: $\delta_m=1.6\text{rad.}$ ve $w=1\text{pu}$

4.7. ANALİZ 2: JENERATÖR ROTOR AÇISI $\delta_m=1.6\text{rad.}$,

SİSTEM FREKANSI $w=1\text{p.u}$

Yüke bağlı olan durum değişkenleri ve güç üretim seviyesi aşağıdaki değişimler ile jeneratör açısı δ_m 0.8 radyandan 1.6 radyana bir seviye daha yükseltilir. Esas olarak bu, çalışma noktasını yeni bir seviyeye kaydırır. O zaman sonuçta enerji fonksiyonu şöyle ifade edilebilir.

$$v(\delta, V) = 1.872V^3 + a_2V^2 + a_1V + a$$

4-22

$v(\delta, V)$ = Enerji fonksiyonu

V = Yükle gerilimi

δ = Yükle açısı

$$a_2 = 1.515 - 15.005\delta + 0.075\sin(\delta - 1.687)$$

$$+ 0.3\sin(\delta - 2.217) - \cos(\delta - 1.687) - 4\cos(\delta - 2.217)$$

4-23

$$a_1 = 6.719 + 5\cos(-\delta + 2.261) - 5\cos(-\delta + 1.513)$$

$$+ 5\sin(\delta - 1.687) + 20\sin(\delta - 2.217) + 2.8\delta$$

4-24

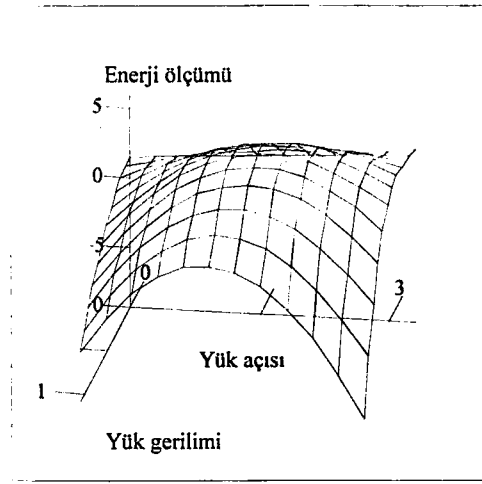
$$a = -0.063\sin(\delta - 1.687) - 0.254\sin(\delta - 2.217)$$

$$+ 0.846\cos(\delta - 1.687) + 3.386\cos(\delta - 2.217) - 1.3\delta - 1.859$$

4-25

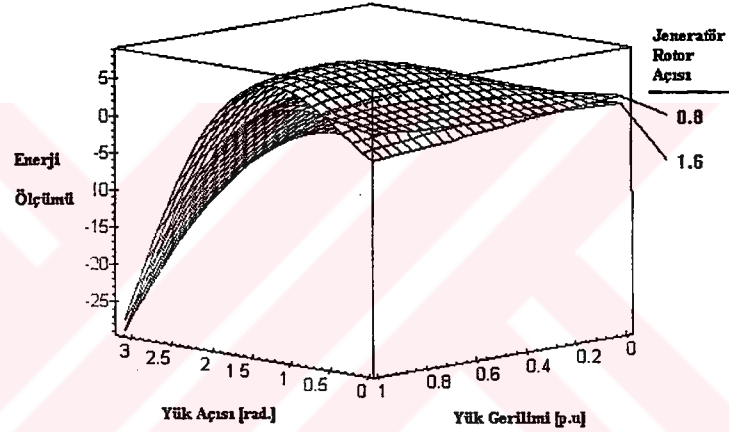
Sonuçta nümerik değerler tablo 2 de gösterilmektedir. Uygun görülen sonuçlar iki boyutlu olarak şekil4-3 de üç boyutlu olarak Şekil4- 4 de görülmektedir.

Güç üretim seviyesi $\delta_m=0.8\text{rad.}$ dan $\delta_m=1.6\text{rad.}$ a değiştirilir iken sistemin çalışma noktasıda kaydırılır. Tüm depolanan enerjinin değerinin düştüğünü gözlemledik. Enerji ölçümündeki bu düşüş çalışma noktasının kararsızlık bölgesine doğru hareketinin bir göstergesidir. Analiz 1 de maksimum okunan enerji 8.36 (enerji birimi) idi, $\delta=1.4\text{rad.}$ ve $V=0.8(\text{p.u.})$ iken. Ancak bu analizde δ ve V nin aynı değerlerinde maksimum enerji seviyesi 5.15 (enerji birimi) oluyor. Çalışma noktasının bu yeni seviyesinde açıkça görüldüğü gibi yükteki herhangi bir değişim depolanan enerji seviyesini aşağılara düşürmeye hatta belkide negatif değerlere kadar düşürmeye devam edecektir.



M

Şekil4- 4: Güç sistem enerjisinin üç boyutlu dalga biçimi: $\delta_m=1.6$ rad. ve $w=1$ pu



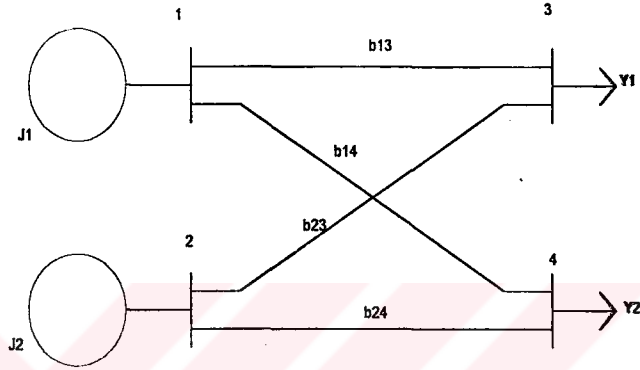
Şekil4- 5: Jeneratörün farklı çalışma noktaları için olan enerji dalgalanması

Şekil4- 5 deki grafiği incelersek, burada δ_m in seçimiyle oluşan çalışma noktasının iki seviyesi gösteriliyor. şekilde görüldüğü gibi yavaşça enerji seviyesini düşürürken, sonunda bir durumda negatif noktaya gelecekti. Bu da gösteriyor ki enerji seviyesi çalışma noktasının kararsızlığa yakınlığının ölçüsüdür. Yükteki bir değişimin depolanan enerjide bir artışa sebep olduğu durumda, sistem kararsızlık noktasından uzaklaşma eğilimi gösterir. Böylece bu analizden, depolanan enerji ölçümünün, çalışma noktasının kararsızlık bölgesine yakınlığını gösterdiği sonucuna varılır

BÖLÜM 5

5.1. 4 BARALI SİSTEM'İN İNCELENMESİ

Bir önceki bölümde, bu çalışmada anlatılanları tek makine tek jeneratör ve sonsuz bara sisteminden oluşan basit bir sisteme uygulamış ve Liapunov fonksiyonlar yardımı ile sistemin enerji fonksiyonunu elde ederek sistemin depolanmış enerji grafiklerini çizdirmiştik. Bu grafikler yardımı ile de sistemin kararlılığı hakkında yorum yaptık. Şimdi bu bilgileri daha kompleks bir devreye uygulayacağız. Bu çalışma için kullanacağımız devrenin şekli aşağıda verilmiştir.



Şekil5- 1: 4 Baralı sistem

Şekil5- 1 için yük akış denklemleri aşağıdadır. Burada 1 nolu bara referans bara olarak seçilmiştir. Bu devre ile ilgili bilgiler ekler bölümündeki tablo 14 den okunabilir.

$$\tilde{f}_2(\delta_2, V_2) = V_2 V_3 b_{23} \sin(\delta_2 - \delta_3) + V_2 V_4 b_{24} \sin(\delta_2 - \delta_4)$$

5- 1

$$\tilde{f}_3(\delta_3, V_3) = V_1 V_3 b_{13} \sin(\delta_1 - \delta_3) + V_2 V_3 b_{23} \sin(\delta_3 - \delta_2)$$

5- 2

$$\tilde{f}_4(\delta_4, V_4) = V_1 V_4 b_{14} \sin(\delta_1 - \delta_4) + V_2 V_4 b_{24} \sin(\delta_4 - \delta_2)$$

5- 3

$$\tilde{g}_2(\delta_2, V_2) = -V_2 V_3 b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) - V_2 V_4 b_{24} \cos(\delta_2 - \delta_4) - V_2^2 (b_{23} + b_{24})$$

5- 4

$$\tilde{g}_3(\delta_3, V_3) = -V_2 V_3 b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) - V_1 V_3 b_{13} \cos(\delta_3 - \delta_1) - V_3^2 (b_{23} + b_{13})$$

5- 5

$$\tilde{g}_4(\delta_4, V_4) = -V_1 V_4 b_{14} \cos(\delta_4 - \delta_1) - V_2 V_4 b_{24} \cos(\delta_4 - \delta_2) - V_4^2 (b_{14} + b_{24})$$

5- 6

$$f_i(\delta_i, V_i) = \tilde{f}_i(\delta_i, V_i) + P_i^0$$

5- 7

$$g_i(\delta_i, V_i) = \tilde{g}_i(\delta_i, V_i) + Q_{D,i}(V_i)$$

5- 8

Bu bölümdeki analizler için Şekil 5- 1 deki 4 baralı sistem kullanılacaktır. Buna göre sistem eşitliği aşağıdaki gibidir. $P_m = P_L$ (jeneratör mekanik gücü, aktif yükün ihtiyacına denktir) koşulu altında yukarıdaki denklemler tekrar yazılabilir.

$$\delta'_3 = -D_3^{-1} \{ V_1 V_3 b_{13} \sin(\delta_1 - \delta_3) + V_2 V_3 b_{23} \sin(\delta_3 - \delta_2) + P_3^0 \}$$

5- 9

$$\delta'_4 = -D_4^{-1} \{ V_1 V_4 b_{14} \sin(\delta_1 - \delta_4) + V_2 V_4 b_{24} \sin(\delta_4 - \delta_2) + P_4^0 \}$$

5- 10

$$V'_3 = -\frac{1}{\varepsilon'} V_3^{-1} \{ -V_2 V_3 b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) + V_3 V_1 b_{13} \cos(\delta_3 - \delta_1) - V_3^2 (b_{23} + b_{13}) + Q_{D,3}(V_3) \}$$

5- 11

$$V'_4 = -\frac{1}{\varepsilon'} V_4^{-1} \{ -V_1 V_4 b_{14} \cos(\delta_4 - \delta_1) + V_4 V_2 b_{24} \cos(\delta_4 - \delta_2) - V_4^2 (b_{14} + b_{24}) + Q_{D,4}(V_4) \}$$

5- 12

$$w'_1 = -M_1^{-1} \{ -P_1^0 \}$$

5- 13

$$w'_2 = -M_2^{-1} \{ V_2 V_3 b_{23} \cos(\delta_2 - \delta_3) + V_2 V_4 b_{24} \sin(\delta_2 - \delta_4) - P_1^0 \}$$

5- 14

Bu çalışmada jeneratör açısı δ'_m nün oluşturduğu eşitlik ihmal edilmiştir. Buna göre 5- 1, 5- 2, 5- 3, 5- 4, 5- 5, 5- 6 denklemlerine göre 5- 7, 5- 8, 5- 9, 5- 10, 5- 11, 5- 12, 5- 13, 5- 14 denklemlerini yeniden yazalım;

$$\delta'_3 = -D_3^{-1} \{ \tilde{f}_3(\delta_3, V_3) + P_3^0 \}$$

5- 15

$$\delta_4' = -D_4^{-1} \{ \tilde{f}_4(\delta_4, V_4) + P_4^0 \}$$

5- 16

$$V_3' = -\frac{1}{\varepsilon'} V_3^{-1} \{ \tilde{g}_3(\delta_3, V_3) + Q_{D,3}(V_3) \}$$

5- 17

$$V_4' = -\frac{1}{\varepsilon'} V_4^{-1} \{ \tilde{g}_4(\delta_4, V_4) + Q_{D,4}(V_4) \}$$

5- 18

$$w_1' = -M_1^{-1} \{ -\tilde{f}_1(1,0) - P_1^0 \}$$

5- 19

$$w_2' = -M_2^{-1} \{ -\tilde{f}_2(\delta_2, V_2) - P_2^0 \}$$

5- 20

5.2. GRADIENT SİSTEMİ KULLANARAK LIAPUNOV FONKSİYONUN ARAŞTIRILMASI

Daha önceki bölümde de belirttiğimiz gibi dinamik sistemin en basit formunda, kolayca oluşturulan Liapunov fonksiyon Gradient sistemdir.

Bu formun bir sistemi üzerinde düşünersek;

$$\mathbf{x}' = -A \nabla v(\mathbf{x}, x_0)$$

5- 21

burada;

$v, \mathcal{R}^n \times \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ devamlı olarak diferansiyellenebilir.

$A \in \mathcal{R}^{n \times n}, \det(A) \neq 0$

$v(\mathbf{x}, x_0) = 0, \mathbf{x} = x_0$ da

Açıkça, 5- 21 denkleminde $v(\mathbf{x}, x_0)$ doğal bir Liapunov fonksiyon adaydır. Eğer x_0 da $v(\mathbf{x}, x_0)$ ın Hessian'ı tamamen pozitif definite ise x_0 da denge noktası asimptotik kararlıdır.

Liapunov fonksiyon aşağıdaki denklem ile verilir:

$$V(x) = \int_{x_0}^x [f(\xi)]^T d\xi$$

5- 22

5.3. GRADIENT SİSTEMİN 4 BARALI SİSTEME UYGULANMASI

Şekil5- 1 için Liapunov fonksiyonun elde edilmesinde 5- 15, 5- 16, 5- 17, 5- 18 denklemleri şöyle yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \delta_3' \\ \delta_4' \\ V_3' \\ V_4' \\ w_1' \\ w_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_3^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -D_4^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\varepsilon'} V_3^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\varepsilon'} V_3^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -M_1^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -M_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(\delta_3, V_3) \\ f(\delta_4, V_4) \\ g(\delta_3, V_3) \\ g(\delta_4, V_4) \\ f(\delta_1, V_1) \\ f(\delta_2, V_2) \end{bmatrix}$$

5- 23

5- 9, 5- 10, 5- 11, 5- 12, 5- 13, 5- 14, denklemleri ile tanımlanan sistem için 5- 23 denklemi alternatif bir tanımlama getirir.

5- 23 denklemini incelersek $(\delta_3^0, \delta_4^0, V_3^0, V_4^0, w_1^0, w_2^0)$ ın bir denge noktası için 5- 23 denkleminin sağ tarafında görülen bir aday enerji fonksiyon (5- 23 denkleminin sağ tarafında görülen 6 çarpı 1 gradient matris.) elde edilebilir ve 5- 22 denkleminde kullanılabilir. Aday enerji fonksiyonu üzerinde düşünelim;

$$V(\delta_3, \delta_4, V_3, V_4, w_3, w_4) = \int_{(\delta_3^0, \delta_4^0, V_3^0, V_4^0, w_3^0, w_4^0)}^{(\delta_3, \delta_4, V_3, V_4, w_3, w_4)} \begin{bmatrix} f(\delta_3, V_3) \\ f(\delta_4, V_4) \\ g(\delta_3, V_3) \\ g(\delta_4, V_4) \\ f(\delta_1, V_1) \\ f(\delta_2, V_2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} d\delta_3 \\ d\delta_4 \\ dV_3 \\ dV_4 \\ dw_1 \\ dw_2 \end{bmatrix}$$

5- 24

Şimdi 5- 1, 5- 2, 5- 3, 5- 4, 5- 5, 5- 6 denklemlerini 5- 7 ve 5- 8 denklemlerine göre 5- 24 denkleminde yerine koyarsak, güç sisteminin enerji fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir;

$$\begin{aligned}
 & \cos(\delta_1 - 2.2 \cdot 10^{-2}) \cdot V_1 \cdot V_3 \cdot b_{13} + .309 \cdot b_{32} + \cos(-6.8 \cdot 10^{-2} + \delta_2) \cdot V_2 \cdot V_4 \cdot b_{42} \dots \\
 & + \cos(2.2 \cdot 10^{-2} + \delta_2) \cdot V_3 \cdot V_2 \cdot b_{32} + 2.2 \cdot 10^{-2} \cdot P_3 - 6.8 \cdot 10^{-2} \cdot P_4 - \cos(\delta_1 - 6.8 \cdot 10^{-2}) \cdot V_1 \cdot V_4 \cdot b_{14} \dots \\
 & + (-1.02 \cdot Q_{D4}) + .353 \cdot b_{42} \cdot P_1 \cdot w_1 - .976 \cdot Q_{D3} + P_4 \cdot \delta_4 + P_3 \cdot \delta_3 - \frac{1}{3} \cdot (V_3)^3 \cdot b_{13} - \frac{1}{3} \cdot (V_4)^3 \cdot b_{14} \dots \\
 & + Q_{D3} \cdot V_3 + \cos(\delta_1 - \delta_4) \cdot V_1 \cdot V_4 \cdot b_{14} + Q_{D4} \cdot V_4 + V_3 \cdot V_2 \cdot b_{32} \cdot \sin(-\delta_3 + \delta_2) \\
 & (V_2 \cdot V_4 \cdot b_{42} \cdot \sin(-\delta_4 + \delta_2) - P_2) \cdot w_2 - \cos(-\delta_3 + \delta_2) \cdot V_3 \cdot V_2 \cdot b_{32} \dots \\
 & + \cos(\delta_1 - \delta_3) \cdot V_1 \cdot V_3 \cdot b_{13} + .309 \cdot b_{13} + .353 \cdot b_{14} \dots \\
 & + (-\cos(-\delta_4 + \delta_2) \cdot V_2 \cdot V_4 \cdot b_{42}) - .5 \cdot V_2 \cdot b_{42} \cdot \cos(\delta_1 - \delta_4) \cdot (V_4)^2 - \frac{1}{3} \cdot (V_4)^3 \cdot b_{42} - \frac{1}{3} \cdot (V_3)^3 \cdot b_{32} \dots \\
 & + -.5 \cdot V_1 \cdot b_{14} \cdot \cos(\delta_1 - \delta_4) \cdot (V_4)^2 - .5 \cdot V_1 \cdot b_{13} \cdot \cos(\delta_1 - \delta_3) \cdot (V_3)^2 \dots \\
 & + [-.5 \cdot V_2 \cdot b_{32} \cdot \cos(-\delta_3 + \delta_2) \cdot (V_3)^2] + .476 \cdot V_2 \cdot b_{32} \cdot \cos(-\delta_3 + \delta_2) + .5202 \cdot V_1 \cdot b_{14} \cdot \cos(\delta_1 - \delta_4) \dots \\
 & + .5202 \cdot V_2 \cdot b_{42} \cdot \cos(\delta_1 - \delta_4) + .476 \cdot V_1 \cdot b_{13} \cdot \cos(\delta_1 - \delta_3)
 \end{aligned}$$

5- 25

4 baralı bir sistemin enerji fonksiyonu olan yukarıdaki 5- 25 denklemleri, sistem frekansı, yükün aktif ve reaktif gücü, yük gerilimi, yük açısı, jeneratör açısı, sabit parametreler ($b_{12}, b_{23}, \dots$) ile alakalı tüm parametreleri içerir ve **Şekil 5- 1** deki sistem frekansı, gerilim, reaktif ve aktif güç arasındaki ilişkileri ifade eder.

5.4. 4 BARALI SİSTEM İÇİN ANALİZLER

Aşağıdaki analizler bu enerji fonksiyonu için kullanılacaktır:

5.4.1. Analiz 1

Liapunov fonksiyon olarak kullanılan $v(x, x_0)$ için gerekli olan birinci kabul A , $\nabla v(x, x_0)$ ve 5- 21 in yörüngelerinin yapısıyla ilgilidir.

$$S = \{x \mid \nabla v(x, x_0)^T (A + A^T) \nabla v(x, x_0) = 0\}$$

5- 26

$(A + A^T)$ matrisi pozitif semidefinitir.

5.4.2. Analiz 2

5- 23 denkleminin denkliği yalnızca $\nabla v = 0$ noktalarında olur. Bu 5- 23 denklemden takip edilir ve A tekil değildir.

5.4.3. Analiz 3

5- 23 denkleminin lineerizasyonu bir denklik noktasında kesin kararlıysa, yani tüm sistem köklerinin reel kısımları tamamen negatif ise, o zaman dengede

değerlendirilen $v(w, \delta_m, \delta, V)$ nin Hessian'ı (ikinci türevi) tüm pozitif reel sistem köklerine sahiptir. Bu sıra ile anlatılanlar $v(w, \delta_m, \delta, V)$ nin bu denklik noktasında bölgesel pozitif definit olduğunu gösterir.

Yukarıdaki analizlerin üçünden küçük rahatsızlık kararlılığı olan bir çalışma noktası için, önerilen enerji fonksiyonu tamamen Liapunov fonksiyondur sonucuna varılabilir.

Gerilim çökmesi durumunda, yük yavaş yavaş artar ve böylece yüksek gerilim denkliği (normal güç-akış çözümü) alçak gerilim denkliğine yaklaşır. Yükteki bu artış potansiyeli azaltır ve devrilme noktasını küçültür ve en kolay kaçış yolunu gösterir. O zaman enerji fonksiyonu, yük değişimlerinin, bu sistem durumunu en yakın kararsızlık denklik noktasına iteceğini gösteren bir ölçü ortaya koyar.

5.5. ANALİZ 1: 3 NOLU BARDAKİ YÜK SABİT İKEN

Bu analizde önemli olan 6 tane durum değişkeni vardır. Bunlar;

$V_3 = 3$ nolu baradaki yük gerilimi

$V_4 = 4$ nolu baradaki yük gerilimi

$\delta_3 = 3$ nolu baradaki yük açısı

$\delta_4 = 4$ nolu baradaki yük açısı

$w_1 =$ sistem frekansı

$w_2 =$ sistem frekansı

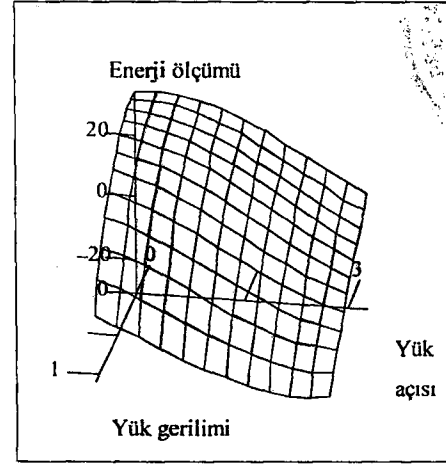
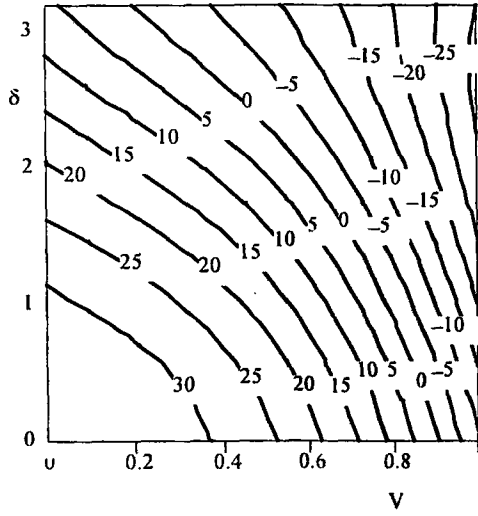
5- 25 denkleminde tüm sabitleri ve 3 nolu baradaki yüklerin sabit başlangıç değerlerini yerine koyduğumuzda elde edeceğimiz V_4 ve δ_4 e bağlı olarak çıkan denklem şöyle olur.

$$11.940 - 10.081V_4 + 3.18\delta_4 - 14.201(V_4)^3 + 11.346\cos(\delta_4) \cdot V_4 - 15.534V_4 \cdot \sin(\delta_4) - 21.207\cos(\delta_4) \cdot (V_4)^2 + \dots + 22.064\cos(\delta_4)$$

5- 27

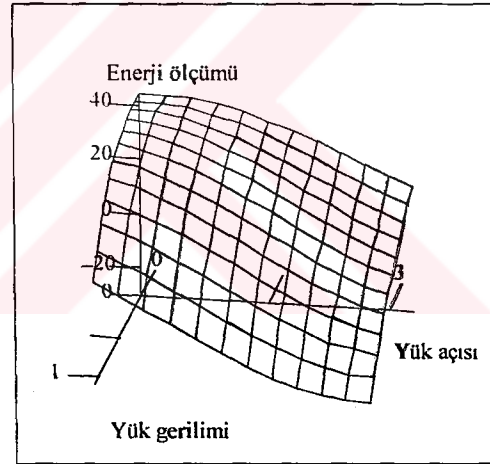
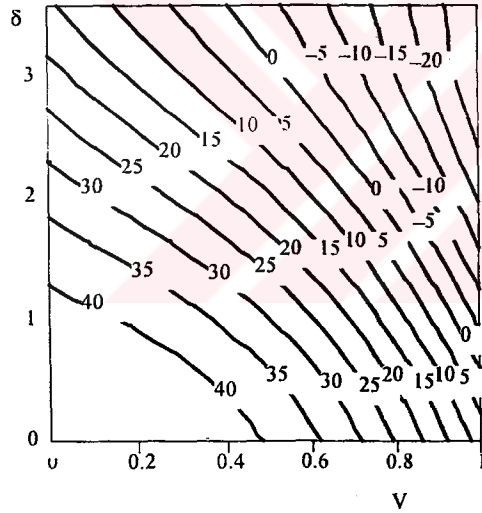
Bu analizde 3 nolu baradaki yükte herhangi bir değişiklik olmadığı yani sabit bir yük bulunduğunu farz ederek 4 nolu baradaki değişimler karşısında sistemin kararlılığını inceleyeceğiz.

Buradaki analizleri yaparken ilk önce 4 baralı sistemde bulunan 3 nolu baradaki yükü sabit kabul edecek ve 4 nolu baradaki yük değişimini inceleyeceğiz. Bu baradaki yük değişimini incelerken 1 nolu baranın referans seçilmesinden dolayı burada herhangi bir işlem yapmazken diğer jeneratör barası olan 2 nolu baradaki jeneratör açısını 0 dan başlayarak 0.4 artımla 1.6 değerine kadar değiştirip sistemin hareketini inceledik. Buna göre elde ettiğimiz grafikler ve bunların yorumları aşağıdadır.



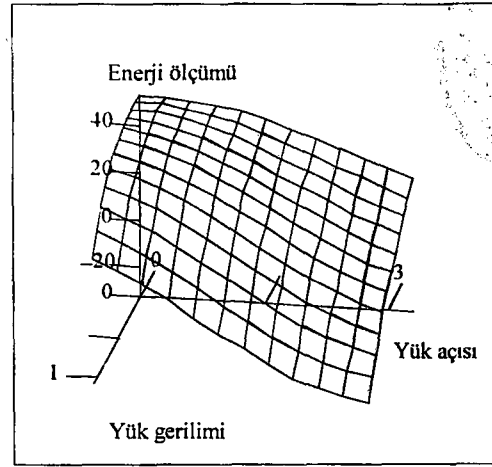
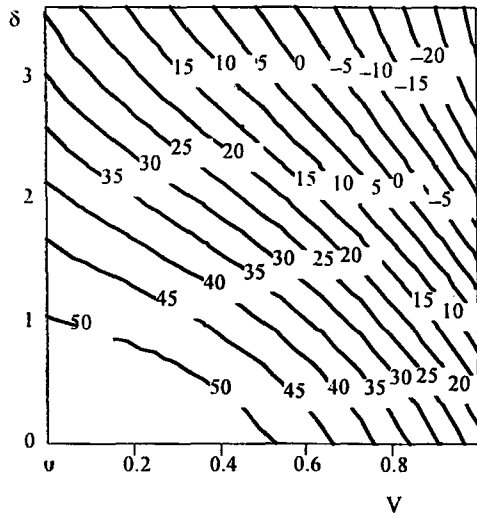
Şekil5- 2: Jeneratör açısı $\delta_2=0$ durumunda sistemin depolanmış enerjisinin iki ve üç boyutlu gösterilimi.

Yuakrıdaki şekilde jeneratör açısı $\delta_2=0$ durmunda sistemin depolanan enerjisinin maksimum 30 (enerji birimi) u aştığını görmekteyiz. Burada yük gerilimi V 0.9 ile 1p.u arasında sistemin depolanmış enerji yoğunluğunun sıfır'ın altında olduğunu görmekteyiz bu $\delta_2=0$ için sistemin karasız olduğunu göstermektedir.



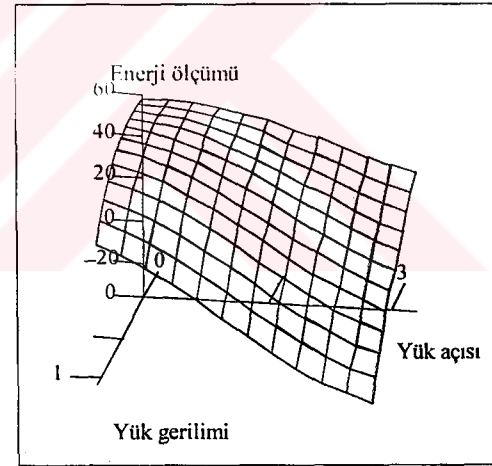
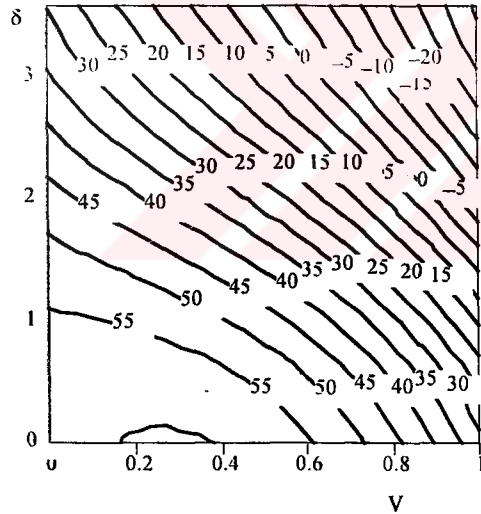
Şekil5- 3: Jeneratör açısı $\delta_2=0.4$ durumunda sistemin enerjisinin iki ve üç boyutlu gösterilimi.

Yuakrıdaki şekilde jeneratör açısı $\delta_2=0.4$ durmunda ise sistemin depolanan enerjisinin maksimum 40 (enerji birimi) ı aştığını görmekteyiz. Burada sistemin depolanmış enerjisinin $V=1p.u$ ve δ_4 0 ile 0.8 arasında iken pozitif değerler almakta olduğunu görmekteyiz bu halde sistemimiz bu arada kararlı olarak çalışmakta fakat $\delta > 0.8$ değerleri için kararsızlık başgöstermektedir.



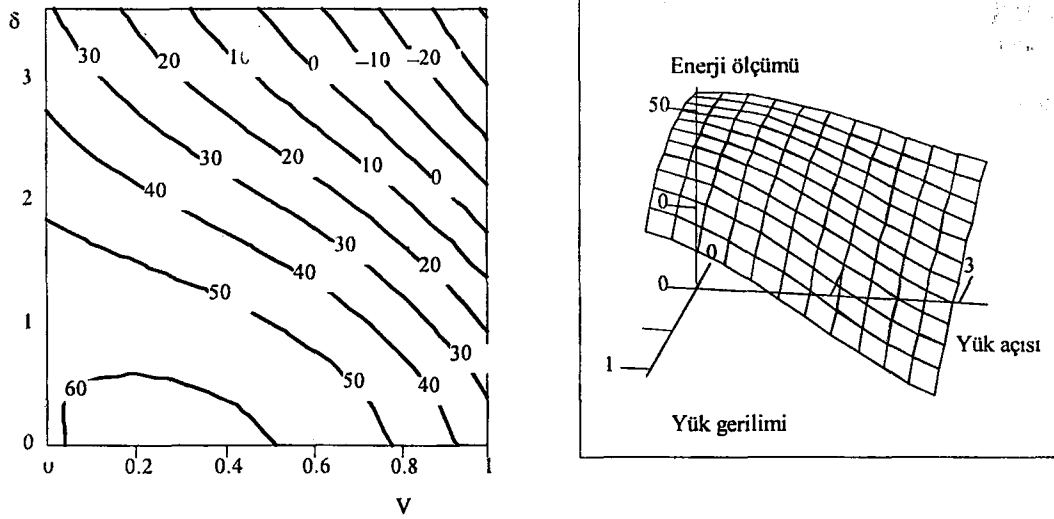
Şekil5- 4: Jeneratör açısı $\delta_2=0.8$ durumunda sistem enerjisinin iki ve üç boyutlu gösterilimi.

Yuakrıdaki şekilde jeneratör açısı $\delta_2=0.8$ durmunda sistemin depolanan enerjisinin maksimum 50 (enerji birimi) yi aştığını görmekteyiz. Burada ise sistemin depolanmış enerjisinin $V=1p.u$ ve δ_4 0 ile 1.6 arasında pozitif olmaktadır ve sistem bu aradaki yük değerleri için karalı olarak çalışabilir. Fakat $\delta_4>1.6$ için sistem kararsızlığa gitmektedir.



Şekil5- 5: Jeneratör açısı $\delta_2=1.2$ durumunda sistemin enerjisinin iki ve üç boyutlu gösterilimi.

Yuakrıdaki şekilde jeneratör açısı $\delta_2=1.2$ durmunda sistemin depolanan enerjisinin maksimum 55 (enerji birimi) i aştığını görmekteyiz. Yuakrıdaki grafikte görüldüğü gibi $V=1p.u$ ve δ_4 0 ile 1.8 arasında sistem karalı olarak çalışabilmekte fakat $\delta_4>1.8$ için sistem kararsızlığa gitmektedir.



Şekil5- 6: Jeneratör açısı $\delta_2=1.6$ durumunda sistemin enerjisinin iki ve üç boyutlu gösterilimi.

Yuakrıdaki şekilde jeneratör açısı $\delta_2=1.6$ durmunda sistemin depolanan enerjisinin maksimum 60 (enerji birimi) ı aştığını görmekteyiz. Buradaki durumda $V=1p.u$ ve δ_4 0 ile 2 arasında kararlı olarak çalışmakta ve $\delta_4>2$ değerleri için ise sistem karasızlığa gitmektedir

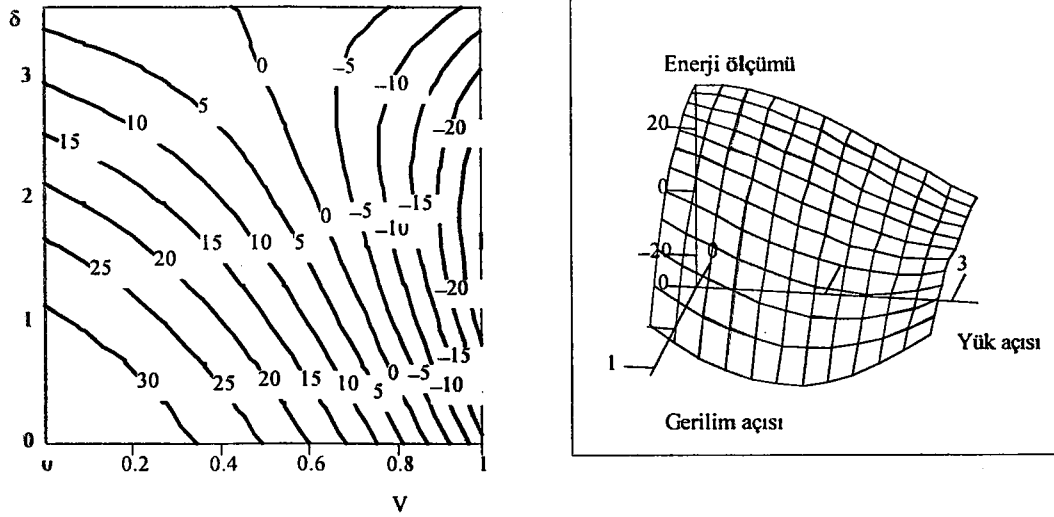
5.6. ANALİZ 2: 4 NOLU BARADAKİ YÜK SABİT İKEN

Bu analiz içinde yine ilk analizde olduğu gibi 5- 25 denkleminde sabit sayıları ve 4 nolu baradaki yükün başalnğıç değerlerini sabit kabul ederek yerine koyduğumuzda elde edeceğimiz denklem şöyle olur.

$$7.954 \cdot V_3 + 11.738 + 2 \cdot \delta_3 - 15.574 \cdot (V_3)^3 - 26.558 \cdot V_3 \cdot \sin(\delta_3) - 6.717 \cdot \cos(\delta_3) \cdot V_3 - \dots \\ + 23.199714 \cdot \cos(\delta_3) \cdot (V_3)^2 - 22.099 \cdot \cos(\delta_3)$$

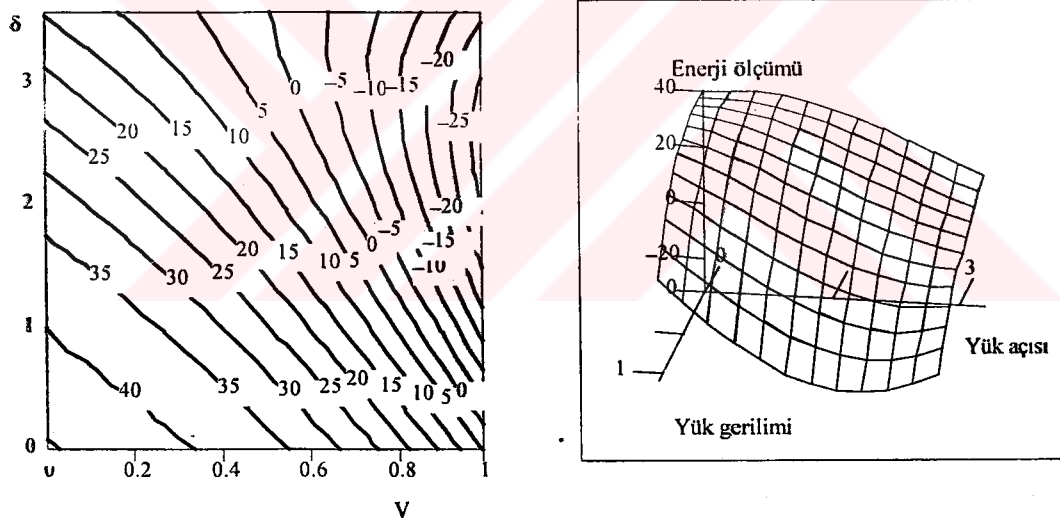
5- 28

Şimdi yapacağımız analizlerde ise 4 baralı sistemde bulunan 4 nolu baradaki yükü sabit kabul edecek ve 3 nolu baradaki yük değişimini inceleyeceğiz. Bu baradaki yük değişimini incelerken 1 nolu baranın referans seçilmesinden dolayı burada herhangi bir işlem yapmazken diğer jeneratör barası olan 2 nolu baradaki jeneratör açısını 0 dan başlayarak 0.4 artımla 1.6 değerine kadar değiştirip sistemin hareketini inceledik. Buna göre elde ettiğimiz grafikler ve bunların yorumları aşağıdadır.



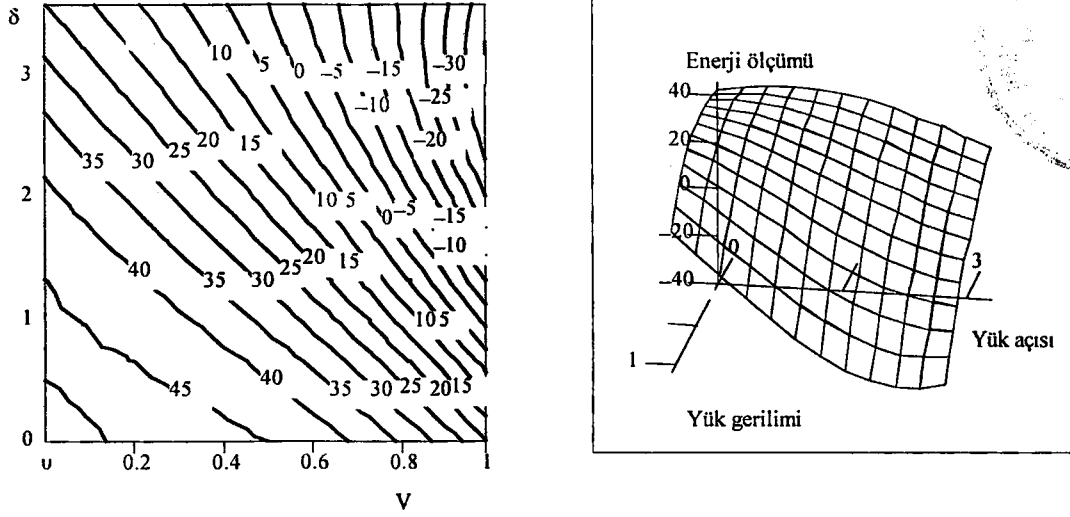
Şekil5- 7: Jeneratör açısı $\delta_2=0$ durumunda sistemin enerjisinin iki ve üç boyutlu gösterilimi.

Yuakrındaki şekilde jeneratör açısı $\delta_2=0$ durmunda sistemin depolanan enerjisinin maksimum 30 (enerji birimi) u aştığını görmekteyiz. Fakat V 0.85 ile 1p.u arasında sistemin depolanmış enerjisinin negatif olmasından dolayı sistem $\delta_2=0$ durumu için kararsızdır denir.



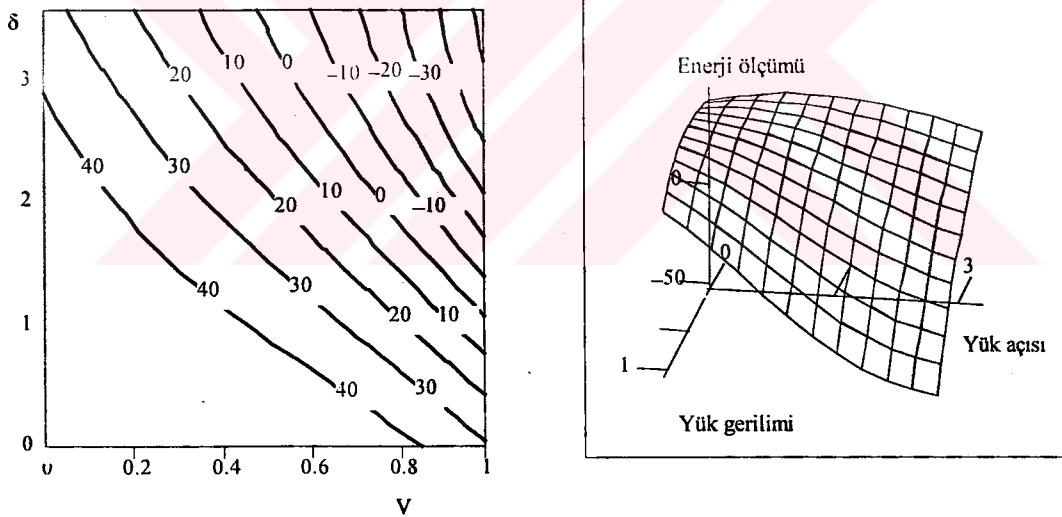
Şekil5- 8: Jeneratör açısı $\delta_2=0.4$ durumunda sistemin enerjisinin iki ve üç boyutlu gösterilimi.

Yuakrındaki şekilde jeneratör açısı $\delta_2=0.4$ durmunda sistemin depolanan enerjisinin maksimum 40 (enerji birimi) ı aştığını görmekteyiz. Fakat burada $V=1p.u$ ve δ_3 0 ile 0.4 gibi çok küçük bir yük aralığında sistem kararlı olarak çalışabilmektedir. Fakat $\delta_3>0.4$ için sistem kararsızlık göstermeye başlar.



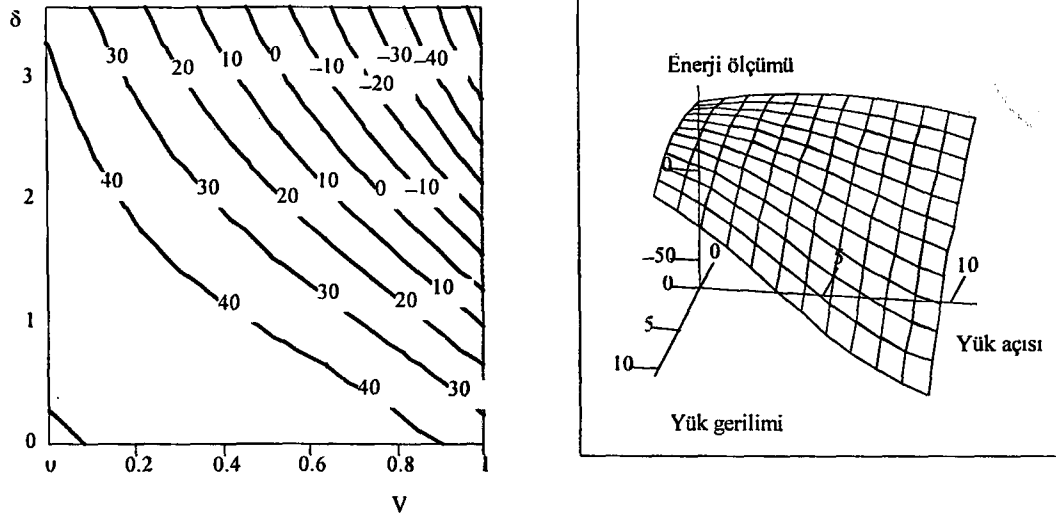
Şekil5- 9: Jeneratör açısı $\delta_2=0.8$ durumunda sistemin enerjisinin iki ve üç boyutlu gösterilimi.

Yuakrıdaki şekilde jeneratör açısı $\delta_2=0.8$ durmunda sistemin depolanan enerjisinin maksimum 45 (enerji birimi) i aştığını görmekteyiz. Yukarıdaki grafiktende görüldüğü gibi $V=1p.u$ ve δ_3 0 ile 1 değerleri arasında sistemin depolanan enerjisi pozitif değerler almakta ve bu arada sistem kararlı olarak çalışabilmektedir fakat $\delta_3>1$ değerleri için sistem kararsızlık baş göstermektedir.



Şekil5- 10: Jeneratör açısı $\delta_2=1.2$ durumunda sistemin enerjisinin iki ve üç boyutlu gösterilimi.

Yuakrıdaki şekilde jeneratör açısı $\delta_2=1.2$ durmunda sistemin depolanan enerjisinin maksimum 40 (enerji birimi) ı aştığını görmekteyiz. Bu arda depolanan enerji seviyesinin $V=1p.u$ ve δ_3 0 ile 1.4 arasında sistemin kararlı çalışabildiğini fakat δ_3 ün daha büyük değerleri için kararsızlığa gittiği izlenmektedir



Şekil5- 11: Jeneratör açısı $\delta_2=1.6$ durumunda sistemin enerjisinin iki ve üç boyutlu gösterilimi.

Yuarıdaki şekilde jeneratör açısı $\delta_2=1.6$ durumunda sistemin depolanan enerjisinin maksimum 40 (enerji birimi) ı aştığını görmekteyiz. Şekilden görüldüğü gibi sistmin depolanmış enerji seviyesi $V=1p.u$ ve δ_3 0 ile 1.6 arsında pozitif değerler alıp δ_3 ün daha büyük değerleri için karasızlığa gitmektedir.

Yuarıdaki grafikler sayesinde **Şekil5- 1** deki sistem için çeşitli jeneratör açısı ve yük durumları için sistemin enerjisini görmekteyiz. Bu grafiklere bakarak sistemin hangi şartlara karşı nasıl bir cevap vereceğini de tahmin edebiliriz. Yuarıdaki şekillerle ilgili olarak her bir grafiğin çeşitli yük açısı ve yük gerilimleri altında ne kadar bir enerji depolandığını gösteren tablolar ekler bölümünde ayrı ayrı olarak verilmiştir.

BÖLÜM 6.

6.1. TEK MAKİNA TEK JENERATÖR VE SONSUZ BARA SİSTEMİ İÇİN SONUÇ

Basit bir güç sisteminin enerji gösterimi bir Liapunov fonksiyon olarak ifade edilir. Bu analizde sistem frekansı $w=1$ p.u. olacağı kabul edilir ve jeneratör rotor açısı δ_m 0.8rad. ve 1.6rad lık iki farklı çalışma noktasında oluşur. Bu iki çalışma noktasında sistem yükünün değişiminin etkileri incelenir.

$\delta_m=0.8$ rad. durumunda yük yavaşça değiştiğinden sistemin enerji seviyesinde bir artış meydana gelir. Bu çalışmada elde edilen maksimum enerji seviyesi 8 (enerji ölçümü) civarındadır. Bununla birlikte, eğer yük yüksek gerilimde kullanılsaydı (örneğin $V=1$ p.u.) o zaman sistemin kararlılığını koruyabilmesi için sistemin mümkün olan maksimum enerjiye sahip olmasına imkan veren yük açısı $\delta=1.2$ rad. olacaktı. Bu noktada okunan enerji 7.17 (enerji ölçümü) dir. (bak tablo1)

Güç üretim seviyesi $\delta_m=1.6$ rad. a yükseldiği durumda, yük yavaşça değiştiğinden, enerji seviyeside aynı şekilde artar. $\delta=1.2$ rad. ve $V=1$ p.u. noktasında elde edilmesi mümkün olan maksimum enerji 4.09 (enerji ölçümü) dur (bak tablo 2). Jeneratör rotor açısı $\delta_m=0.8$ rad. durumu ile karşılaştığımızda depolanan enerji 7.17 den 4,09 (enerji ölçümü) a düşer. Böylece, sonuç olarak, üretim seviyesi düşerken (örneğin, çalışma noktası değişirken) depolanan enerji seviyesi, sistem yükündeki küçük değişimlerin bir sonucu olarak düşer ve sistem hassasiyetini kararsızlığa zorlar.

Bizim bu alandaki çalışmamız, farklı seviyelerdeki, sistem çalışmasının gösterimi ve yük gerilimlerine karşılık gelen depolanmış enerji seviyelerinde elde edilen kritik yük açıları ile bir jeneratör ve sonsuz bara sisteminin kararlılık tavrını açıkça gösterebilecek daha gerçekçi bir enerji fonksiyonu elde edilebileceğini göstermektedir. Böylece bu da sistemdeki enerji dalgalanmalarının, sistemin kararlılığı üstündeki etkisini çok iyi bir şekilde gösterebilmektedir. Neticede, yük açısı ve yük geriliminin en uygun aralığı, yük açıları ve yük gerilimlerine bağlı sistem için kararlılık aralığını grafiklendiren bu enerji dalgalanmalarıyla belirlenebilir.

Çok makinalı güç sistemleri için 4- 1 den 4- 4 e kadar olan denklemlerdeki durum değişkenleri olan (δ, δ_m, V) şu şekilde bir işlem görür ve $(\delta_{m1}, \delta_{m2}, \delta_{m3}, \dots, \delta_{mn} | \delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_L | V_1, V_2, V_3, \dots, V_L)$ olur. $w=1$ p.u olarak kabul edilecektir. Aynı zamanda, atalet sabiti M her makine için $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ olur. Sonuç olarak, n çarpı L boyutlu bir sistem matrisi şekillenebilir ve Liapunov teoremini kullanarak çok makinalı güç sistemlerindeki depolanan enerji elde edilebilir. Genellikle bu metod çok makineli güç sistemleri için kullanılır. Netice itibarı ile bu durum değişkenleri, sistem frekansının sabit olacağı farzedilen bir güç sistemindeki jeneratör ve yüklerin sayısındaki değişikliklerden etkileneneğinden bu jeneratör ve yüklerin sayısındaki artma ve eksilmeye uyum sağlaması için

zorlanmalıdır. İlk önce bu oluşturulur ondan sonra uygun sistem matrisi şekillenebilir ve Liapunov teoremi ile çok makineli güç sistemlerindeki depolanan enerji değerlendirilebilir.

6.2. 4 BARALI SİSTEM İÇİN SONUÇ

Basit bir güç sisteminin enerji gösterimini bir Liapunov fonksiyon olarak ifade ettikten sonra, bu 4 baralı bir sisteme uygulandı. Bu analizde iki ayrı yük barasındaki yüklerde sıra ile bozucu etki incelendi yani, 4 nolu yük barasındaki bozucu etki incelenirken 3 nolu yük barasındaki yük sabit (başlangıç değerlerinde) kabul edildi, aynı olay 3 nolu yük barasındaki yük incelenirken 4 nolu baraya uygulandı. Burada sistem frekansı w_1 ve w_2 1p.u olarak kabul edildi ve jeneratör rotor açısı δ_2 nin 0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 değerleri için analizler yapılarak sistem yükünün etkileri incelendi.

Bölüm 4 te yapılan her iki analiz sırasında $\delta_2=0$ rad. durumunda görülüyorki $V=0.9$ p.u değerinden sonra sistemin depolanan enerjisi sıfır ve sıfırın altına düşmektedir. Bu sistemin $\delta_2=0$ rad lık jeneratör açısı altında her ne kadar düşük yük gerilimleri altında depolanan enerji ölçümü 30(enerji birimi) değerini aşıyorsa da (gerçekte sistemin bu değerlerde sıhhatli çalışması mümkün olmayacağından) kararlı çalışması mümkün değildir. Bu sebepten sistemin bu jeneratör açısı altında çalışmasına kararsızdır denir.

$\delta_2=0.4$ rad değerinde iken analiz1 (3 nolu baradaki yük sabit iken 4 nolu baradaki bozucu etkinin incelenmesi) de sistemin depolanan enerjisinin $V=1$ p.u iken $0<\delta_4<0.8$ ve analiz2 (4 nolu baradaki yük sabit iken 3 nolu baradaki bozucu etkinin incelenmesi) de $0<\delta_4<0.4$ gibi küçük bir yük değeri altında sistem kararlı olarak çalışabilmektedir bunu aşan yük değerlerinde sistemin kararsızlığa gideceğini grafikten açıkça görmekteyiz.

$\delta_2=0.8$ rad değerine baktığımızda her iki analizde sistemin daha iyi çalışma şartları ortaya koyduğunu görmekteyiz. Buna göre $V=1$ p.u iken analiz1 de yük açısı $0<\delta_4<1.6$ ve analiz2 $0<\delta_3<1$ rad. değerine ulaştığını görmekteyiz. Buradan bu jeneratör açısının sistem için daha tercih edilir bir seviye oluşturduğunu söyleyebiliriz.

$\delta_2=1.2$ rad. değerine ulaştığında yine $V=1$ p.u değerinde analiz1 de yük açısının $0<\delta_4<1.8$ ve analiz2 de $0<\delta_3<1.4$ değerine ulaştığını görürüz ve bu değerler sistem açısından daha iyi bir sonuç ortaya koyduğunda söyleyebiliriz.

$\delta_2=1.6$ rad. bu çalışmanın son analizi olup sistemin depolanan enerjisi açısından en iyi sonuçların elde edildiği analizdir. Burada $V=1$ p.u değerinde iken analiz1 de yük açısı $0<\delta_4<2$ ve analiz2 de $0<\delta_3<1.6$ rad. değerine kadar ulaşmaktadır. Buda bize sistemin kararlılığı açısından $\delta_2=1.6$ rad. değerinin tercih edilmesinin gerekliliğini göstermektedir.

Sonuç olarak şunu söyleyebilirizki sistem $\delta_2=0$ değeri haricinde 0.4, 0.8, 1.2, ve 1.6 jeneratör açısı değerlerinde her iki analiz içinde kararlı olarak çalışabilir, fakat

$\delta_2=0$ değerinde kararlı çalışması mümkün değildir. Yine bu sistemde jeneratör açısı $\delta_2=0.4$ ve 0.8rad. değerlerinde düşük yüklerde kararlı çalışabilmekte isede büyük yükler karşısında kararsızlığa doğru gitmektedir. Bu sebeble sistem büyük yükler altında çalışacak ise jeneratör açısı $\delta_2=1.2$ ve 1.6rad değerlerinde çalışması gerekmektedir. Çünkü bu açılarda her iki anlizdende görüldüğü gibi depolanan enerji değeri daha büyük yük açalarına karşı sistemin kararlı çalışmasına imkan vermektedir.

Yine yukarıdaki grafiklerden şunu çıkarabiliriz ki 3 nolu barada bulunan yük 4 nolu barada ki yüke karşı kararsızlığa daha yakındır. Çünkü 3 nolu barada δ_2 nin tüm değerlerinde sistem enerjisi 4 nolu baradan daha az seviyelerde olmuştur. Buda bu barada bulunan yükün bozucu etkilere karşı daha hassas olduğunu gösterir.

Bu anlizde yaptığımız çalışma, farklı seviyelerdeki sistem çalışmasının gösterimi ve yük gerilimlerine karşılık gelen depolanmış enerji seviyelerinde elde edilen kritik yük açıları ile 4 bara sisteminin kararlılık tavrını açıkça gösterebilecek daha gerçekçi bir enerji fonksiyonu elde edilebileceğini göstermektedir. Böylece sistemdeki enerji dalgalanmalarının sistemin kararlılığına etkisi çok iyi bir şekilde görülmektedir. Sonuçta yük açısı ve yük geriliminin sistemin kararlılığı açısından en uygun aralığını sistemin enerji dalgalanmalarını gösteren bu grafiklerden belirlenebilir.

Daha büyük güç sistemleri için tek makine tek jeneratör ve sonsuz bara sistemi için yazdığımız sonuç da belirttiğimiz şekilde sistem eşitliklerini oluşturan denklemleri 1,2,3...n indisleri ile belirterek ve aynı çözüm metodunu uygulayarak sonuç elde etmek mümkündür. Bizim analiz2 de ihmal ettiğimiz jeneratör açısının eşitliğinde ekliyerek sistemin enerji fonksiyonu elde edilip çözüm yapmamız mümkündür.

Yukarıdaki çalışmalar ışığı altında ileride yapılması düşünülen başlıca iki çalışma vardır. Bu çalışmalar ;

- 1- 3 nolu yük barasındaki yükün değerini tam yüklü, yarım yüklü ve yüksüz olarak kabul ederek 4 nolu barada bozucu etkinin incelenmesi. Aynı şekilde 4 nolu baradaki yükü tam yüklü, yarım yüklü ve yüksüz kabul ederek 3 nolu baradaki bozucu etkinin incelenmesi
- 2- Sistem bir bozucu etki karşısında kaldığı zaman, sistemin depolanmış enerji seviyesine bakılarak tekrar ne kadar zaman sonra sistemin kararlı hale geleceğinin araştırılması (transient kararlılık).

KAYNAKLAR DİZİNİ

Bölüm 1

- [1] E.Eşiyok, A.T.Hocaoğlu, M.Dumanlı, "Güç sistemlerinde yapay sinir ağları ile yük tahmin analizi" EMO 6. Ulusal kongresi Eylül 1995 p.69-72
- [2] H.Griffiths, M.H.Hocaoğlu, A.T.Hocaoğlu, "Topraklama sistemlerinin performans analizinde arıza seviyesi kontrolü ve güvenlik kriteri için yeni yaklaşımlar" EMO 7. Ulusal kongresi Eylül 1997
- [3] B.M.Weedy, B.R.Cox, "Voltage stability of radial power links,". Proc.IEE, vol. 115, no. 4, pp. 528-536, April 1968.
- [4] C.L.DeMarco, A.R.Bergen, "Application of singular perturbation technique to power system transient stability analysis, I.S.C.A.S. proc., pp. 597-601, Montreal, May 1984.
- [5] A.Araposthatis, S.Sastry, P.Varaiya, "Analysis of the power flow equation," Int. J. of Electrical Power Energy Systems, vol. 3, pp. 115-126, July 1981.
- [6] H.G.Kwatny, A.K.Pasrija, L.Y.Bahar, "Loss of steady state stability and voltage collapse in electric power systems, "Proc. of 24th IEEE C.D.C., pp. 804-811, Dec. 1985.
- [7] A.Tiranuchit, et al., "Towards a Computationally Feasible On-Line Voltage Instability Index," PICA Proc., pp. 136-142, Montreal , Quebec, May 1987.
- [8] R.J.Thomas, A.Tiranuchit, "Dynamic Voltage Instability, "Proc. 26th IEEE CDC, pp. 53-58, Los Angeles, CA, Dec. 1987.
- [9] M.Ilic, F.Mak, "Mid-Range Voltage Dynamics Modelling With the Load Controls Present," Proc. 26th IEEE CDC, pp. 45-52, Los Angeles, CA, Dec. 1987.
- [10] C.W.Barbier, J.P.Barret, "An analysis of voltage collapse on a transmission system." Rev. Gen. Elect., vol. 89. n0. 10. Pp. 672-690, oct.1980.
- [11] F.D. Galiana, E. Handschin and A.R. Fiechter, "Identification of stochastic electric load models from physical data," IEEE Trans.Automatic Control, vol. AC-19, pp. 887-893, Dec. 1974.
- [12] C. W. Brice et al., "Physical based stochastic models for power system loads, "U.S. Dept. Of Energy Report DOE/ET/29129, sept, 1982.
- [13] A.R. Bergen, D.J. Hill, "A structure preserving model for power systems stability analysis, "IEEE Trans. Power App. And Sys., vol. PAS-101, pp. 25-35, Jan. 1981.

- [14] S.S: Sastry, C.A: Desoer, P. Varaiya, "Jump Behavior of Circuits and Systems, "IEEE Trans. Circuits and Systems, vol. CAS-28, no. 12, Dec. 1982.
- [15] M. Vidyasagar, Nonlinear Systems Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1978.
- [16] C.L. DeMarco, "A New Method of Constructing Lyapunov Functions for Power System, pp. 905- 908, Espoo, Finland, June 1988.
- [17] C.L. DeMarco, A.R. Bergen , A. Security Measure or Random Load Disturbances in Nonlinear Power System Models, "IEEE Trans. Circuits and Systems, pp. 1546-1557, vol. CAS-34, no. 12, Dec. 1987.
- [18] A:A Foued et al., "Direct Transient Stability Analysis Using Energy Functions: Applications to Large Power Networks, "IEEE Trans. On Power Systems, vol.PWRS-2, pp. 37-44, Feb. 1987.

Bölüm 2

- [1] K.Ogata, "Modern control engineering" second edition, Prentice-hall inc. 1990 p.217-249
- [2] C.L.Phillip, R.D.Harbo, "Feedback control systems" second edition, Prentice-hall international edition p.598-614
- [3] D.Siljak, "Nonlinear systems" University of Santa clara, John Wiley & Sons, Inc. 1969 p. 302-342
- [4] M.Pavella, p.G.murthy, "Transient stability of Power systems", John Wiley & Sons, 1994 151-204
- [5] J.J.E.Slotin, W.Li, "Applied Nonlinear Control", Prentice-hall international edition, 1991 p.57-97
- [6] Lj.T.Grujic, A.A.Martnyuk and M.Ribbens-Pavella "Large scale systems stability under structural and singular perturbations." Lecture notes in control and information sciences series, Springer-Verlag, Berlin. P.154-205
- [7] N.N. Krasovskii, "Stability of motion" (in Russian) translated by J.L.Brenner, Stanford University Press, Stanford, California. 1959 p.154-160
- [8] K.S.Narendra and J.W.Taylor "Frequency domain criteria for absolute stability," Academic press inc., New York.
- [9] D.D.Siljak, "Nonlinear systems The parameter analysis and design." John Wiley and Sons, inc., New York p.154-155
- [10] J.L.Willems, "The computation of finite stability regions by means of open Liapunov surfaces." Int.J.Control. 1969 p.537-544

- [11] G.James, D.Burley, P.Dyke, J.Searl, N.Steele, J.Wright, "Advanced Modern Engineering Mathematics" 1993 p.481-499
- [12] R.J.Richards "An introduction to dynamics and control" New York 1979 p.325-339
- [13] A.M.Liapunov "Probleme general de la stabilite du mouvement" French Translation in 1907 of Russian edition, Commun.Soc. Math. Kharkow, 1893. Reprinted in annals of mathematical studies, No.17, Princeton University Press, Princeton,N.J., 1949.
- [14] C.G.Cullen "Lineer algebra and differential equatins" University of Pittsburg 1991 p.82-88

Bölüm 3

- [1] CIGRE Working group 38.01, "Planning against voltage collapse," Electra, pp.55-75, March 1987.
- [2] B.M.Weedy, "Electric power systems" Third edition revised, John Willey & Sons, 1987 (earlier edition 1967,1972, and1979).
- [3] CIGRE Task Force 38-02-10, "Modelling of voltage collapse including dynamic phenomena, 1993.
- [4] D.J.Hill, Per-Anders Löf and G.Andersson, "Analysis of long term voltage stability," Tenth power system computing conference, pp.1252-1259, Graz Austria, 1990
- [5] IEEE committee Report "Proposed terms and definitions for power system stability," IEEE Trasactions on power apparatus and systems, vol.PAS-101, No.7, pp.1894-1898, july 1982
- [6] M.K.Pal, "Voltage stability conditions considering load charecteristics" IEEE Transactions on power systems, vol.7 No.1, pp.243-249, February 1992.
- [7] T.V.Custem, "Dynamics and static aspects of voltage collapse" Proceedings: Bulk power system voltage phenomena-voltage stability and security, EPRI EL-6183, pp.6-55-6-79, january 1989.
- [8] Y.Tamura, "A senario of voltage collapse in a power system with induction motor loads with a cascaded transition of bifurcations," Proceedings: Bulk power system voltage phenomena II: Voltage stability and security, Deep Creek Lake, Maryland, pp.143-146, 4-7 August 1991.
- [9] IEEE Committee report, "Voltage stability of power systems: Concepts, Anaylitical tools, and Industry experience, IEEE publication 90TH0358-2-PWR

- [10] E.S.Cate, K.Hemmaplardh, J.W.Manke and D.P.Gelopulos, "time frame notion and time response of the models in transient, mid-term and long-term stability programs," IEEE transactions on power apparatus and systems, vol.PAS-103, No.1, pp.143-151, january 1984.
- [11] C.W.Taylor, "Concepts of undervoltage load shedding for voltage stability" IEEE Transactions on power delivery, vol.7, No.2, pp.480-488, April 1992.
- [12] H.K.Clark, "Voltage stability: Criteria, Planning tools, load modelling, "EPRI/NERC forum on operational and planning aspects of voltage stability, Breckendridge, Colorado, 14-15 September 1992.
- [13] D.McInnis, "South Florida Blackout," Florida power & light report.
- [14] CIGRE Working group 14-07 and IEEE working group 15.05.05, "Guide for planning DC links terminating at AC systems locations having low short circuit capacities," Part I: AC/DC Interaction phenomena, CIGRE, june 1992.
- [15] M.k.Pal, discussion of "An investigation of voltage instability problems" by N.Yorino et al., IEEE Transactions on power systems, vol. 7, No.2, pp.600-611, May 1992.
- [16] C.Barbier and J.P.Barret, "Analysis of phenomena of voltage collapse on a transmission system," Revue Generale de l'electricite, vol.89, October 1980, pp.672-690
- [17] J.Carpentier, R.Girard and E.Scanno, "Voltage collapse proximity indicators computed from an optimal power flow," Proceedings of the 8th power system computing conference, pp.671-678, Helsinki, 1984.
- [18] T.V.Custem, "Voltage collapse mechanisms: A case study," Proceedings: Bulk power system voltage phenomena II: Voltage stability and security, Deep Creek Lake, Maryland, pp.85-101, 4-7 august 1991.
- [19] R.J.Thomas and A.Tiranuchit, "Dynamic voltage instability," proceedings of the 26th conference on decision and control, Los Angeles, pp.53-58, December 1987.
- [20] C.W.Taylor, "A conceptual analysis of voltage stability as related to load characteristics," survey of voltage collapse phenomena, North American Electric Reliability council, 1991.

Bölüm 4

- [1] R.A: Schlueter, A.G. Costi, J.E. Sekerke, H.L. Forgey, "Voltage Stability and Security Assessment", EPRI Report, EL-5967, Project 1999-8, August 1988.
- [2] Y. Tamura, K. Sakamoto, Y. Tayama, "Voltage Instability Proximity Index (VIPI) Based on Multiple Load Flow Solutions in III-Conditioned Power Systems", Proc. 27th IEEE Conf. Decision and Control, Austin, TX, Dec. 1988.

- [3] Y. Tamura , K. Iba, S. Iwamoto, "A Method for Finding Multiple Load Flow Solutions for General Power Systems", IEEE PES Winter Meeting, A 80 043, New York, Feb. 1980.
- [4] S. Iwamoto, Y. Tamura, "A Load Flow Calculation Method fir III-Conditioned Power Systems", IEEE Trans. Power App. And Sys., vol PAS-100, pp. 17366-1743, April 1981.
- [5] Y. Tamura et al., " Monitoring and Control Strategies ot Voltege Stability Based on Voltage Instability Index", Engineering Foundation Conference on Bulk Power System Voltage Phenomena: Voltage Stability and Security, Potosi, MO, Sep. 1988.
- [6] K.Ogata, "Modern control engineering" second edition,Prentice-hallinc. 1990 p.217-249



EKLER

Aşağıdaki tablolar Bölüm 4 ve bölüm 5 de yapılan analizler için sistemin depolanmış enerji seviyelerini gösterir.

Acı					Enerji Ölçümü						
0	2.537	2.306	2.024	1.702	1.35	0.9805	0.6041	0.2322	-0.124	-0.4533	-0.7444
0.2	2.416	2.636	2.74	2.741	2.65	2.477	2.234	1.932	1.583	1.197	0.7859
0.4	2.132	2.815	3.324	3.669	3.863	3.915	3.839	3.643	3.341	2.943	2.46
0.6	1.687	2.829	3.742	4.435	4.921	5.21	5.315	5.245	5.013	4.629	4.105
0.8	1.087	2.668	3.966	4.993	5.761	6.281	6.563	6.619	6.461	6.099	5.545
1	0.3463	2.327	3.977	5.307	6.33	7.055	7.494	7.659	7.58	7.209	6.618
1.2	-0.5162	1.812	3.764	5.35	6.583	7.472	8.03	8.268	8.197	7.827	7.171
1.4	-1.477	1.134	3.324	5.106	6.49	7.488	8.111	8.37	8.276	7.841	7.076
1.6	-2.507	0.3102	2.665	4.57	6.035	7.072	7.692	7.906	7.726	7.163	6.228
1.8	-3.576	-0.6356	1.802	3.748	5.214	6.211	6.75	6.843	6.5	5.733	4.553
Gerilim	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Tablo 1: $\delta_m=0.8$, $w=1p.u$ için Enerji ölçümü

Acı					Enerji Ölçümü						
0	1.467	1.643	1.783	1.897	1.996	2.091	2.195	2318	2.471	2.666	2.913
0.2	1.404	1.917	2.328	2.648	2.889	3.062	3.179	3249	3.286	3.299	3.3
0.4	1.202	2.058	2.752	3.294	3.695	3.966	4.12	4166	4.117	3.983	3.777
0.6	0.856	2.052	3.027	3.793	4.359	4.738	4.941	4979	4.864	4.605	4.216
0.8	0.3711	1.89	3.133	4.111	4.836	5.318	5.57	5602	5.426	5.052	4.493
1	-0.2441	1.568	3.053	4.221	5.084	5.654	5.941	5957	5.713	5.22	4.489
1.2	-0.9756	1.09	2.78	4.104	5.075	5.703	6	5976	5.643	5.013	4.096
1.4	-1.804	0.4666	2.315	3.751	4.787	5.434	5.703	5605	5.152	4.354	3.223
1.6	-2.708	-0.2877	1.665	3.161	4.212	4.829	5.023	4806	4.188	3.181	1.797
1.8	-3.661	-1.152	0.8459	2.343	3.352	3.883	3.947	3557	2.722	1.455	-0.2344
Gerilim	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Tablo 2: $\delta_m=1.6$, $w=1p.u$ için Enerji ölçümü

Acı					Enerji Ölçümü						
0	34.01	34.2	33.54	32.06	29.86	27.04	23.75	20.14	16.38	12.65	9.119
0.2	33.91	33.77	32.76	30.92	28.36	25.21	21.62	17.75	13.78	9.907	6.3
0.4	33.3	32.85	31.5	29.35	26.49	23.07	19.24	15.19	11.11	7.173	3.572
0.6	32.09	31.33	29.69	27.25	24.15	20.52	16.54	12.4	8.275	4.366	0.851
0.8	30.21	29.15	27.23	24.55	21.26	17.49	13.43	9.273	5.199	1.399	-1.95
1	27.56	26.21	24.04	21.16	17.73	13.89	9.831	5.736	1.794	-1.813	-4.914
1.2	24.06	22.42	20.03	17	13.48	9.636	5.649	1.701	-2.024	-5.354	-8.129
1.4	19.63	17.71	15.12	11.97	8.422	4.641	0.8015	-2.917	-6.341	-9.31	-11.68
1.6	14.17	11.99	9.219	5.996	2.474	-1.18	-4.796	-8.204	-11.24	-13.77	-15.65
1.8	7.613	5.17	2.249	-1.01	-4.452	-7.912	-11.23	-14.24	-16.81	-18.81	-20.12
Gerilim	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Tablo 3: $\delta_2=0$ için 4 nolu baradaki enerji ölçümü

Acı					Enerji Ölçümü							
0	44.05	44.25	43.58	42.11	39.9	37.09	33.8	30.19	26.43	22.7	19.17	
0.2	44.6	44.36	43.21	41.21	38.49	35.16	31.4	27.36	23.24	19.24	15.52	
0.4	44.64	43.97	42.35	39.89	36.69	32.92	28.75	24.37	19.99	15.79	11.97	
0.6	44.08	42.99	40.94	38.04	34.43	30.29	25.79	21.14	16.57	12.26	8.43	
0.8	42.84	41.34	38.88	35.59	31.62	27.16	22.41	17.59	12.91	8.58	4.807	
1	40.84	38.93	36.09	32.45	28.17	23.47	18.54	13.62	8.918	4.653	1.019	
1.2	37.99	35.69	32.48	28.53	24	19.12	14.09	9.151	4.515	0.3956	-3.018	
1.4	34.2	31.51	27.97	23.75	19.03	14.03	8.978	4.099	-0.3869	-4.277	-7.389	
1.6	29.39	26.32	22.47	18.02	13.16	8.114	3.113	-1.62	-5.873	-9.449	-12.18	
1.8	23.48	20.04	15.9	11.26	6.312	1.289	-3.587	-8.094	-12.03	-15.21	-17.48	
Gerilim	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	

Tablo 4: $\delta_2=0.4$ için 4 nolu baradaki enerji ölçümü

Acı					Enerji Ölçümü							
0	52.42	52.62	51.95	50.48	48.27	45.46	42.17	38.56	34.8	31.07	27.54	
0.2	53.51	53.22	51.99	49.89	47.03	43.55	39.61	35.41	31.12	26.94	23.08	
0.4	54.1	53.33	51.55	48.87	45.4	41.33	36.82	32.09	27.36	22.83	18.71	
0.6	54.08	52.85	50.55	47.32	43.31	38.7	33.7	28.54	23.44	18.64	14.35	
0.8	53.39	51.69	48.91	45.18	40.67	35.59	30.17	24.66	19.28	14.29	9.912	
1	51.93	49.78	46.53	42.34	37.39	31.91	26.15	20.36	14.79	9.7	5.308	
1.2	49.63	47.03	43.34	38.72	33.39	27.58	21.55	15.57	9.891	4.778	0.4543	
1.4	46.38	43.35	39.24	34.24	28.58	22.51	16.28	10.19	4.491	-0.5592	-4.734	
1.6	42.12	38.66	34.16	28.82	22.88	16.61	10.27	4.143	-1.494	-6.396	-10.34	
1.8	36.75	32.87	28.01	22.37	16.21	9.795	3.414	-2.656	-8.148	-12.82	-16.46	
Gerilim	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	

Tablo 5: $\delta_2=0.8$ için 4 nolu baradaki enerji ölçümü

Acı					Enerji Ölçümü							
0	57.8	57.99	57.33	55.85	53.65	50.83	47.54	43.93	40.17	36.44	32.91	
0.2	59.24	58.97	57.73	55.58	52.63	49.04	44.97	40.61	36.15	31.81	27.77	
0.4	60.18	59.46	57.65	54.87	51.24	46.94	42.17	37.13	32.06	27.18	22.72	
0.6	60.53	59.35	57.01	53.64	49.38	44.44	39.03	33.41	27.81	22.49	17.68	
0.8	60.19	58.57	55.73	51.8	46.97	41.45	35.49	29.36	23.32	17.63	12.56	
1	59.09	57.04	53.72	49.28	43.92	37.9	31.46	24.9	18.49	12.53	7.273	
1.2	57.14	54.87	50.89	45.97	40.15	33.68	26.84	19.93	13.26	7.101	1.739	
1.4	54.26	51.37	47.15	41.81	35.58	28.73	21.56	14.39	7.521	1.256	-4.131	
1.6	50.35	47.05	42.43	36.7	30.11	22.95	15.53	8.177	1.202	-5.09	-10.42	
1.8	45.34	41.64	36.64	30.56	23.67	16.26	8.668	1.211	-5.787	-12.02	-17.22	
Gerilim	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	

Tablo 6: $\delta_2=1.2$ için 4 nolu baradaki enerji ölçümü

Açı					Enerji Ölçümü						
0	59.32	59.52	58.85	57.38	55.17	52.36	49.07	45.46	41.7	37.97	34.44
0.2	60.88	60.7	59.51	57.38	54.42	50.78	46.63	42.15	37.56	33.08	28.86
0.4	61.94	61.38	59.68	56.94	53.28	48.89	43.95	38.69	33.35	28.17	23.37
0.6	62.4	61.47	59.3	55.98	51.68	46.59	40.95	34.99	28.98	23.2	17.89
0.8	62.17	60.9	58.27	54.42	49.53	43.82	37.53	30.96	24.37	18.07	12.33
1	61.19	59.56	56.51	52.17	46.74	40.47	33.62	26.51	19.43	12.7	6.606
1.2	59.35	57.39	53.93	49.14	43.23	36.46	29.14	21.57	14.08	6.998	0.6325
1.4	56.58	54.29	50.45	45.25	38.91	31.72	23.99	16.04	8.226	0.8815	-5.676
1.6	52.79	50.17	45.98	40.41	33.7	26.15	18.08	9.844	1.789	-5.735	-12.4
1.8	47.89	44.96	40.45	34.54	27.52	19.67	11.35	2.895	-5.317	-12.94	-19.64
Gerilim	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Tablo 7: $\delta_2=1.6$ için 4 nolu baradaki enerji ölçümü

Açı					Enerji Ölçümü						
0	33.84	33.8	32.89	31.18	28.74	25.68	22.15	18.29	14.29	10.32	6.542
0.2	33.71	33.16	31.81	29.71	26.98	23.74	20.12	16.3	12.44	8.716	5.283
0.4	33.03	31.98	30.2	27.77	24.81	21.45	17.84	14.14	10.52	7.127	4.123
0.6	31.7	30.16	27.98	25.26	22.13	18.72	15.2	11.71	8.415	5.456	2.97
0.8	29.62	27.6	25.05	22.08	18.84	15.47	12.11	8.923	6.046	3.611	1.73
1	26.71	24.21	21.32	18.15	14.86	11.59	8.481	5.682	3.317	1.497	0.3089
1.2	22.86	19.9	16.69	13.37	10.09	6.988	4.216	1.896	0.1352	-0.9789	-1.386
1.4	17.99	14.58	11.08	7.644	4.429	1.579	-0.7779	-2.531	-3.594	-3.91	-3.449
1.6	12.01	8.147	4.384	0.8812	-2.205	-4.736	-6.594	-7.69	-7.964	-7.39	-5.973
1.8	4.806	0.512	-3.486	-7.012	-9.91	-12.05	-13.33	-13.68	-13.07	-11.51	-9.051
Gerilim	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Tablo 8: $\delta_2=0$ için 3 nolu baradaki enerji ölçümü

Açı					Enerji Ölçümü						
0	39.75	40.71	40.8	40.04	38.48	36.19	33.29	29.89	26.16	22.25	18.35
0.2	40.65	40.9	40.3	38.89	36.74	33.96	30.67	27.01	23.16	19.28	15.54
0.4	41.01	40.54	39.25	37.21	34.52	31.3	27.7	23.87	19.99	16.21	12.72
0.6	40.74	39.54	37.57	34.93	31.73	28.14	24.29	20.36	16.53	12.96	9.813
0.8	39.75	37.8	35.16	31.94	28.28	24.36	20.34	16.4	12.71	9.428	6.713
1	37.94	35.24	31.92	28.15	24.08	19.88	15.76	11.88	8.416	5.522	3.33
1.2	35.22	31.75	27.78	23.47	19.02	14.62	10.46	6.718	3.568	1.148	-0.4305
1.4	31.5	27.25	22.62	17.8	13.02	8.46	4.334	0.819	-1.93	-3.786	-4.661
1.6	26.68	21.64	16.36	11.06	5.978	1.324	-2.698	-5.912	-8.173	-9.375	-9.455
1.8	20.67	14.83	8.903	3.149	-2.191	-6.887	-10.73	-13.57	-15.25	-15.71	-14.91
Gerilim	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Tablo 9: $\delta_2=0.4$ için 3 nolu baradaki enerji ölçümü

Açı					Enerji Ölçümü						
0	42.56	44.4	45.45	45.69	45.13	43.8	41.77	39.14	36.03	32.58	28.95
0.2	44.34	45.38	45.59	44.98	43.59	41.49	38.78	35.59	32.08	28.35	24.61
0.4	45.64	45.85	45.2	43.74	41.55	38.72	35.39	31.7	27.82	23.92	20.17
0.6	46.38	45.72	44.2	41.9	38.92	35.39	31.49	27.37	23.21	19.2	15.52
0.8	46.44	44.89	42.49	39.35	35.6	31.42	26.99	22.5	18.14	14.11	10.58
1	45.76	43.28	39.98	36	31.51	26.71	21.8	17	12.52	8.546	5.254
1.2	44.22	40.79	36.58	31.76	26.55	21.16	15.83	10.79	6.252	2.415	-0.5531
1.4	41.73	37.33	32.19	26.54	20.62	14.68	8.983	3.762	-0.756	-4.375	-6.935
1.6	38.21	32.79	26.71	20.23	13.63	7.184	1.164	-4.173	-8.598	-11.92	-13.98
1.8	33.56	27.1	20.06	12.76	5.495	-1.429	-7.719	-13.11	-17.37	-20.31	-21.8
Gerilim	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Tablo 10: $\delta_2=0.8$ için 3 nolu baradaki enerji ölçümü

Açı					Enerji Ölçümü						
0	41.83	44.29	46.11	47.23	47.63	47.3	46.27	44.6	42.37	39.69	36.67
0.2	44.21	45.9	46.84	47.02	46.44	45.14	43.19	40.69	37.74	34.49	31.07
0.4	46.2	47.07	47.11	46.33	44.77	42.53	39.69	36.39	32.78	29.02	25.28
0.6	47.72	47.72	46.83	45.07	42.54	39.36	35.66	31.62	27.4	23.2	19.19
0.8	48.65	47.76	45.89	43.14	39.64	35.54	31.01	26.27	21.5	16.92	12.72
1	48.92	47.08	44.22	40.46	35.99	30.98	25.66	20.25	14.98	10.09	5.779
1.2	48.43	45.6	41.71	36.93	31.48	25.59	19.49	13.47	7.762	2.621	-1.735
1.4	47.08	43.21	38.27	32.46	26.03	19.26	12.43	5.834	-0.2582	-5.583	-9.912
1.6	44.78	39.84	33.81	26.95	19.55	11.92	4.382	-2.749	-9.172	-14.62	-18.85
1.8	41.45	35.38	28.23	20.31	11.93	3.461	-4.755	-12.37	-19.07	-24.57	-28.63
Gerilim	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Tablo 11: $\delta_2=1.2$ için 3 nolu baradaki enerji ölçümü

Açı					Enerji Ölçümü						
0	37.66	40.4	42.67	44.42	45.58	46.13	46.06	45.39	44.16	42.43	40.3
0.2	40.27	42.38	43.86	44.69	44.85	44.34	43.2	41.49	39.3	36.73	33.9
0.4	42.6	44.02	44.68	44.56	43.69	42.12	39.92	37.21	34.09	30.73	27.25
0.6	44.55	45.24	45.03	43.94	42.03	39.39	36.15	32.44	28.44	24.31	20.25
0.8	46.03	45.94	44.82	42.73	39.76	36.06	31.78	27.1	22.24	17.41	12.8
1	46.94	46.03	43.96	40.84	36.8	32.02	26.71	21.1	15.42	9.913	4.821
1.2	47.19	45.41	42.36	38.17	33.05	27.19	20.87	14.33	7.861	1.735	-3.789
1.4	46.7	43.99	39.91	34.64	28.41	21.48	14.14	6.707	-0.515	-7.219	-13.12
1.6	45.36	41.67	36.53	30.15	22.79	14.78	6.448	-1.864	-9.805	-17.04	-23.27
1.8	43.08	38.37	32.12	24.6	16.11	7.014	-2.311	-11.48	-20.1	-27.83	-34.33
Gerilim	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Tablo 12: $\delta_2=1.6$ için 3 nolu baradaki enerji ölçümü

Aşağıdaki tablolar şekil1-1 ve şekil5-1 de verilen sistem modellerindeki parametreleri belirtmektedir.

Simulasyonda kullanılan yük, şebeke ve jeneratör parametre değerleri;

$K_{pw}=0.4$, $K_{pv}=0.3$, $K_{qw}=-0.03$, $K_{qv}=-2.8$, $K_{qv2}=2.1$, $T=8.5$, $P_0=0.6$, $Q_0=1.3$, $P_1=0$, $Q_1=0$

$Y_0=20$, $\theta_0=-5$, $E_0=1$, $C=12$, $Y_0'=8$, $\theta_0'=-12$, $E_0'=2.5$, $Y_m=5$, $\theta_m=-5$, $E_m=1$, $P_m=1$, $D_m=0.05$, $M=0.3$

Tablo 13: Şekil1-1 deki şebeke, yük ve jeneratör parametreleri

Simulasyonda kullanılan yük, şebeke ve jeneratör parametreleri;

$b_{13}=19.841$, $b_{14}=26.881$, $b_{23}=26.881$, $b_{24}=15.723$, $P_1^0=0.52$, $P_2^0=1.7$, $P_3^0=2$, $P_4^0=3.18$, $Q_{D1}^0=0$, $Q_{D2}^0=0$, $Q_{D3}^0=1.239$, $Q_{D4}^0=1.239$, $V_1=1$, $V_2=0.988$, $V_3=0.976$, $V_4=1.02$, $\delta_1^0=0$, $\delta_2^0=0.003$, $\delta_3^0=-0.022$, $\delta_4^0=0.068$

Tablo 14: Şekil5-1 deki şebeke yük ve jeneratör parametreleri.

Not: Tablo 14 de verilen sistemin başlangıç değerleri yük akış analiz programı kullanılarak bulunmuştur.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Turan Hocoğlu, 1967 yılında Antakya'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini burada tamamladıktan sonra, 1984 yılında Antakya Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümü'nü bitirdi. 1985 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği (akşam) bölümüne kayıt yaptırdı. 1990 yılında mezun oldu. Bu tarihten itibaren İstanbul'da Genas adlı asansör firmasında çalışmaya başladı. 1992 yılında askerlik görevi nedeniyle çalıştığı firmadan ayrıldı. Askerlik dönüşü İstanbul'da elektrikli ev aletleri üretimi yapan özel bir fabrikada İmalat Müdürü olarak göreve başladı. 1994 yılında EMO İstanbul Şubesi müdürü olarak çalışmaya başladı. Aynı yıl Eylül döneminde GYTE Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans çalışmalarına başladı. 1995 yılı Kasım ayında GYTE'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 1996 Temmuz ayında GYTE tarafından tez konusu üzerinde araştırma yapmak üzere görevli olarak University of Wales-Cardiff (İngiltere) e gönderildi. Evli ve bir çocuk babası olan Ahmet Turan Hocoğlu, halen GYTE'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.