

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

128776

**ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE GERİLİM  
KARARLILIĞI ve KAOS TEORİSİ ile İNCELENMESİ**

Elektrik Müh. Olcay Burak YILMAZ

FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında  
Hazırlanan

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU**

*Mehmet Uzunoglu*

128776

Yrd. Doç. Dr.  
Migdem TANKIÖVEN  
*Migdem Tankioven*

İSTANBUL, 2002

Doç. Dr. -  
Halim Ürdü  
*Halim Ürdü*

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	i
KISALTIMA LİSTESİ.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ .....	iv
TABLO LİSTESİ .....	vi
ÖNSÖZ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. SİSTEM ve YAPILARIN ANATOMİSİ.....	4
2.1 Açık, Kapalı ve İzole Sistemler.....	4
2.1.1 Durum Uzayı .....	5
2.2 Denge ve Dengesizlik.....	7
2.3 Kararlılık ve Kararsızlık.....	8
2.3.1 Rayleigh Benard Kararsızlığı .....	10
2.4 Tersinmezlik.....	11
3. KAOS TEORİSİ.....	14
3.1 Kaos Teorisi Nedir .....	14
3.1.1 Kompleksliğin İki Farklı Yüzü .....	16
3.1.2 Garip Yakınsaklar .....	19
3.1.3 Kaos Durumuna Geçiş .....	26
3.1.4 Deneysel Sistemlerde Kaosun Bulunması.....	28
4. GERİLİM KARARLILIĞI .....	33
4.1 Gerilim Kararlılığı, Gerilim Çökmesi ve Gerilim Güvenliği.....	34
4.2 Gerilim Kararsızlığı ve İşleyiş Biçimi için Zaman Aralıkları.....	36
4.2.1 Gerilim Kararsızlığı İşleyiş Biçimleri ve Senaryolar .....	37
4.2.2 Motor Yükleri ve Gerilim Kararsızlığı.....	40
4.3 Mekanizmalar-Yük Dinamikleri, Denge Noktaları ve Çekim Bölgesi.....	41
4.3.1 Gerilim Kararlılığı ile Rotor Açısı Kararlılığının İlişkisi.....	44
4.3.2 Eski Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı .....	45
4.3.3 Gerilim Kararlılığı Analizleri:P-V Eğrileri .....	46
4.3.4 Gerilim Kararlılığı Analizleri:Q-V Eğrileri .....	48
4.4 Sistem ve Yük Modeli.....	51
4.4.1 Çekim Bölgesi .....	53
4.4.2 Büyük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı .....	55

4.4.3	Yükün Bir Bölümü Statik Olduğunda Gerilim Kararlılık Sınırı .....	57
4.4.4	Büyük Şebekelere Uygulanması .....	59
4.4.5	Karma Yükler için Büyük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı .....	60
4.4.6	Hızlı Cevap Veren Yükler için Gerilim Kararlılığı.....	61
4.4.7	Uzun Dönem Gerilim Kararlılığının Grafik Açıklaması.....	64
4.4.8	Şönt Kapasitör Anahatarlamanın Etkileri.....	67
5.	SAYISAL UYGULAMA.....	68
5.1	Sistemin Gerilim Kararlılığı Açısından Kritik Değerlerinin Bulunması .....	70
5.2	Güç Faktörünün Değişiminin Kritik Değerlere Etkimesi .....	75
5.3	İletim Hattı Uzunluğunun Değişiminin Kritik Değerlere Etkimesi .....	77
5.4	Paralel Hat Sayısının Değişiminin Kritik Değerlere Etkimesi.....	79
5.5	Seri Kompanzasyonun Kritik Değerlere Etkimesi .....	81
5.6	Hat Kayıp Faktörünün Kritik Değerlere Etkimesi .....	83
5.7	Hat Başı Gerilimin Gerilim Kararlılığına Etkisi .....	84
5.8	Çatallaşma Durumunda Kaos Analizi .....	84
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	92
KAYNAKLAR.....		95
ÖZGEÇMİŞ .....		97

## SİMGE LİSTESİ

$c$	Konsantrasyon
$C$	Kapasite
$d$	Plakalar arası mesafe
$D$	Difüzyon katsayısı, Hausdorf-Besicovitch boyutu
$D_m$	Damping katsayısı
$e$	Küp kenar uzunluğu
$f$	Frekans
$g$	İvme katsayısı
$G$	Kondüktans
$G_L$	Rezistif yük kondüktansı
$I_R$	Hat sonu akımı
$I_{sc}$	Kısadevre akımı
$I_s$	Hat başı akımı
$K_{pv}$	Aktif güç-gerilim sabiti
$K_{pw}$	Aktif güç-açısal hız sabiti
$K_{qv}$	Reaktif güç-gerilim sabiti
$K_{qw}$	Reaktif güç-açısal hız sabiti
$l$	İletim hattı uzunluğu
$M$	Generatör atalet momenti
$n$	Boyut sayısı, kademe değiştirici sarım sayısı
$N(e)$	Küp sayısı
$P$	Aktif güç
$P_0$	Başlangıç mekanik gücü
$P_1$	Motor yükü aktif gücü
$P_2$	Sabit akım yükü aktif gücü
$P_{kritik}$	Kritik güç
$P_m$	Mekanik güç
$Q$	Reaktif güç
$Q_1$	Motor yükü reaktif gücü
$Q_2$	Sabit akım yükü reaktif gücü
$R$	Direnç
$R_a$	Rayleigh sayısı
$R_{acr}$	Kritik Rayleigh sayısı
$s$	Motor kayması
$t$	Zaman
$T_H$	Üst plakanın ısısı
$T_L$	Alt plakanın ısısı, yük zaman sabiti
$x^s$	Kararlı denge noktası
$x^u$	Kararsız denge noktası
$X_C$	Kapasitif reaktans
$X_L$	Endüktif reaktans
$V$	Frekans hızlarının ortalaması, kinematik viskozite sabiti, hız
$V_{kritik}$	Kritik gerilim
$V_L$	Yük gerilimi
$V_R$	Hat sonu gerilimi
$V_S$	Hat başı gerilimi
$Y$	Eşdeğer admitans
$Z$	Eşdeğer reaktans
$\nabla^2$	Nabla operatörü

$\rho$	Yoğunluk
$\alpha$	Genleşme sabiti
$\kappa$	Isı iletim sabiti
$\beta$	Isı artışı
$\gamma$	Zaman gecikmesi
$\delta$	Yük açısı
$\delta_{kritik}$	Kritik iletim (yük) açısı
$\delta_s$	Generatör rotor açısı
$\omega$	Açısal hız
$\varphi$	Güç açısı



## KISALTMA LİSTESİ

CIGRE	Conseil International des Grand Reseaux Electriques
EPRI	Electric Power Research Institute
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LTC	Load Tap Changing
RTN	Ruelle-Takens Newshouse



## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	n boyutlu faz uzayı .....	6
Şekil 2.2	Faz diyagramı .....	7
Şekil 2.3	Akış hücrelerinin görünümü.....	10
Şekil 3.1	Akışkan bir sistemin türbülansa geçişi .....	18
Şekil 3.2	Lorenz yakınsağı .....	21
Şekil 3.3	Henon yakınsağı .....	23
Şekil 3.4	Henon yakınsağının yapısı .....	24
Şekil 3.5	Akışkan akışında periyodun iki kata çıkması.....	31
Şekil 3.6	Kimyasal bir sistemde kaos.....	31
Şekil 4.1	Gerilim kararlılığı olayları ve tepki süreleri .....	37
Şekil 4.2	Güney Florida gerilim çökmesi için gerilim ve frekans değişimi.....	38
Şekil 4.3	Gerilime duyarlı yüklerin toparlanması için üç mekanizma.....	42
Şekil 4.4	Gücün yük dinamiklerinin durum değişkenlerine göre değişimi .....	43
Şekil 4.5	Farklı kararlılık tipleri .....	45
Şekil 4.6	Rezistans yük ve reaktans iletim hattı için gerilim, akım ve güç ilişkileri ..	47
Şekil 4.7	Sonsuz kaynak ve reaktans şebeke için P-V eğrileri.....	48
Şekil 4.8	Sonsuz kaynak ve reaktans şebeke için Q-V eğrileri .....	50
Şekil 4.9	Reaktif güç toleransları .....	50
Şekil 4.10	Gerilime duyarlı yüklerin ve limitindeki kademe değiştiricilerin etkilerini gösteren Q-V eğrileri .....	51
Şekil 4.11	Yükü bir iletim hattı üzerinden besleyen sabit kaynak gerilimi ile besleyen bir güç sistemi ve fazör diyagramı .....	52
Şekil 4.12	Şekil 4.11'deki sistem için güç-gerilim eğrisi .....	53
Şekil 4.13	Sistem P-V eğrileri, sürekli hal ve anlık yük karakteristikleri.....	56
Şekil 4.14	Rezistif ve sabit güç yükü kombinasyonu için yük karakteristikleri ve sistem P-V eğrileri.....	58
Şekil 4.15	Yükün bir kısmı statik olduğunda sürekli ha ve anlık yük karakteristikleri ile sistem P-V eğrileri .....	61
Şekil 4.16	Hızlı cevap veren yükler için geçici P-V eğrileri ile büyük bozucu etki gerilim kararlılığı.....	62
Şekil 4.17	Hızlı cevap veren bir yük için büyük bir bozucu etki ardından gerilim kararsızlığının görünümü .....	63
Şekil 4.18	Enerji sistem modeli.....	64
Şekil 4.19	%75'lik motor yükü için sistem ve yük karakteristikleri .....	65
Şekil 4.20	%25'lik motor yükü için sistem ve yük karakteristikleri .....	66
Şekil 4.21	Gerilime duyarlı yük durumunda kapasitör gurubunun devreye girmesinin P-V eğrisinin alt kısmında etkisi .....	67
Şekil 5.1	Simetrik $\Pi$ devresi.....	68
Şekil 5.2	İletim hattı ve yük parametreleri verilmiş basit bir enerji sistemi .....	69
Şekil 5.3	Sistemin fazör diyagramı .....	70
Şekil 5.4	Paralel hatların empedans ve kapasite eşdeğerleri .....	79
Şekil 5.5	Seri kompanzasyonun iletim hattı endüktansına etkimesi ve fazör diyagramı.....	81
Şekil 5.6	Yük geriliminin zamana göre değişimi .....	87
Şekil 5.7	Yük açısının zamana göre değişimi .....	87
Şekil 5.8	Açısal hızın zamana göre değişimi.....	88
Şekil 5.9	Generatör açısının zamana göre değişimi .....	88

Şekil 5.10	Yük açısı ile yük gerilimi arasındaki kaos yakınsağı .....	89
Şekil 5.11	Açısal hız ile yük gerilimi arasındaki kaos yakınsağı.....	89
Şekil 5.12	Generatör açısı ile yük gerilimi arasındaki kaos yakınsağı.....	90
Şekil 5.13	Açısal hız ile yük açısı arasındaki kaos yakınsağı .....	90
Şekil 5.14	Generatör açısı ile yük açısı arasındaki kaos yakınsağı .....	91
Şekil 5.15	Generatör açısı ile açısal hız arasındaki kaos yakınsağı .....	91



## TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1	Sistemlerin karakteristikleri .....5
Tablo 4.1	Güç sistem kararlılığının sınıflandırması .....33
Tablo 5.1	Aynı iletim hattı, hat sonu gerilim ve güç değerleri için yeni akım ve hat başı gerilim değerleri .....76
Tablo 5.2	Değişik $\cos\phi$ değerleri için sistemin gerilim kararlılığı açısından yeni kritik değerleri .....76
Tablo 5.3	km.-faz başına aynı hat parametrelerine sahip 4 farklı uzunluktaki iletim hattı için hat ve simetrik $\Pi$ devre parametreleri .....78
Tablo 5.4	Aynı hat sonu gerilim, güç ve $\cos\phi=0,97$ değerleri için 4 farklı uzunluktaki iletim hattının gerilim kararlılığı açısından kritik değerleri .....78
Tablo 5.5	Aynı hat sonu gerilim, $\cos\phi=0,97$ ve yük değerleri için iki paralel hatla iletim ile tek hatla iletim durumlarında kritik değerlerin değişimi.....80
Tablo 5.6	Dört farklı kompanzasyon değeri için seri kapasitör, kompanzasyon ardından endüktif reaktans ve toplam hat reaktansı değerleri .....81
Tablo 5.7	Dört farklı kompanzasyon oranı için simetrik $\Pi$ devre sabitleri ve hat başı gerilimleri .....82
Tablo 5.8	Dört farklı kompanzasyon değeri ve ilk incelenen sistem için kritik gerilim kararlılık büyüklükleri.....82
Tablo 5.9	Beş farklı endüktif reaktans değeri için hat kayıp faktörünün değişimi ve bunlara ait kritik gerilim kararlılığı değerleri .....83
Tablo 5.10	Yük, şebeke ve generatör parametreleri .....86

## ÖNSÖZ

Gerilim kararlılığı konusunda ortaya koyduğum bu çalışmada, sistem parametrelerinin değişiminin gerilim kararlılığı için kritik değerlere etkimesi incelenmiş ve Kaos Teorisi açısından ele alınmıştır.

Çalışmam boyunca yardımını esirgemeyip büyük sabır ve yol gösteren tez danışmanım sayın Yrd.Doç.Dr. Mehmet UZUNOĞLU'na ve başta annem olmak üzere her açıdan destek olan aileme teşekkür ederim.

Olca Burak YILMAZ  
İstanbul  
Ağustos 2002



# ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI ve KAOS TEORİSİ ile İNCELENMESİ

Olcay Burak YILMAZ  
Elektrik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi

Günümüzün güç sistemlerinde artan enerji iletimi ihtiyacı ile gerilim kararlılığı probleminin önemi de artmaktadır. Mevcut iletim hatlarının daha yoğun kullanılması, gerilim kararlılığına bağlı yeni sınırlamalar getirmekte ve bu problemi enerji sistemlerinin planlanması ve işletilmesinde temel bir konu yapmaktadır.

Bu çalışmada basit bir güç sistemi örneği incelenmiş ve kararlılık sınırları  $\cos\phi$ , iletim hattı uzunluğu, paralel hat sayısı, kompanzasyon oranı ve hat başı gerilim gibi sistem parametrelerindeki değişimlere göre her defasında yeniden hesaplanmıştır. Yükün tipi de belirleyici bir faktör olarak göz önüne alınmıştır. Sistemin gerilim kararlılık görünümü ortaya konulduktan sonra, durum uzayında çatallanmaların meydana gelebileceği bazı özel noktalarda bozucu bir etkinin sistemi kaosa nasıl götürebileceği gösterilmiştir.

Sistemin durum değişkenlerinin kaos grafiklerinin gösterilmesinde Matlab 6.5 bilgisayar programı kullanılmıştır. Sonuçlar gerilim kararlılığının ve onu etkileyen faktörlerin mekanizmalarını göstermektedir. Bire yakın endüktif güç faktörleri, daha kısa iletim hatları, daha çok sayıda paralel hat ve daha büyük kompanzasyon oranları ile daha yüksek hat başı gerilimleri sistemi gerilim kararlılığı açısından daha güvenli kılar. İyi bir reaktif güç akış dengesi, sistemi çatallanma noktaları ve olası kaos durumlarına karşı korur.

**Anahtar Kelimeler:** Gerilim kararlılığı, gerilim çökmesi, Kaos Teorisi, çatallanma noktaları.

JÜRİ:

1. Yrd. Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU (Danışman)
2. Yrd. Doç. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN
3. Doç. Dr. Hakan ÜNDİL

Kabul Tarihi: 03.10.2002  
Sayfa Sayısı: 97

# THE ANALYSIS of VOLTAGE STABILITY in ELECTRIC POWER SYSTEMS with CHAOS THEORY

Olcaý Burak YILMAZ  
Electrical Engineering, M. S. Thesis

Importance of voltage stability problem increases with the more demands of power transmission in today's power systems. Intensive use of available transmission lines brings more voltage stability-imposed limits and makes this problem a major concern in planning and operating electric power systems.

In this paper a basic power system is studied and its stability limits are calculated each time up to changes of system parameters such as  $\cos\phi$ , transmission line strength, number of parallel lines, compensation ratio and source voltage. Load type is also considered as a determinitive factor. After describing the voltage stability view of system, at some special points of phase space could occur bifurcations it is shown that how a disturbance will lead the system to the chaos.

Matlab 6.5 computer code was used to show the Chaos Graphics of state variables of the system. Results demonstrate the mechanisms of voltage stability and its affecting factors. Inductive power factors near 1, shorter transmission lines, bigger parallel line numbers and compensation ratios and higher source voltages make the system more safe for voltage stability. A good reactive power flow equilibrium saves system against bifurcation points and possible chaos state.

**Keywords:** Voltage stability, voltage collapse, Chaos Theory, bifurcation points.

JURY:

1. Yrd. Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU (Supervisor)
2. Yrd. Doç. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN
3. Doç. Dr. Hakan ÜNDİL

Date: 03.10.2002

Page: 97

## 1. GİRİŞ

Enerji sistemlerinde daha ağır hat yüklenmeleri konusunda varolan ve devam eden trend, reaktif güç akışı yönetimi ihtiyacında bir artış ve gerilim kararsızlığı ile çökmesi ihtimallerinde yükselme durumlarını gündeme getirmiştir. Gerilim kararsızlığı ve çökmesi için duyulan endişeler, problemi etkili ve ekonomik şekilde çözmeye dair daha iyi anlayışlar bulmaya itmiştir. Gerilim kararlılığı ve reaktif güç kontrol problemi, yani sistemin uygun yerlerinde gerekli reaktif beslemeleri sağlayarak sistem gerilimini kabul edilebilir sınırlar içinde tutma konusu, teorik olarak iyi anlaşılmış ve rapor edilmiştir. Bununla birlikte sıkça olmasına karşın iyi bir gerilim profili taşımanın otomatik olarak gerilim kararlılığını garanti etmeyeceği ve gerilim kararsızlığının mutlaka düşük gerilimlerle birlikte olmasının gerekmediği iyi değerlendirilmemiştir.

Bilindiği üzere güç iletim kapasitesi hem rotor açısı kararlılığı hem de termal yüklenme kapasiteleri ile sınırlıdır. Sistemin tümden çöküşü, geçici kararlılık konusuyla alakalı olsa da bu sorun hızlı akım kesiciler, güçlü uyarım sistemleri ve çeşitli özel kararlılık kontrol sistemlerinin gelişimiyle bir hayli azalmıştır.

Bununla birlikte 'gerilim kararlılığı' elektrik güç sistemlerinde işlem ve planlamalar yapılırken gitgide daha çok göz önüne alınan bir faktör olmaktadır. Giderek artan elektrik ihtiyacı mevcut hatların daha yoğun kullanılmasıyla birlikte gerilim kararlılığına bağlı sorunları ön plana çıkarmaktadır. Gerilim kararsızlığı ve çökmesinin 1987'de Tokyo'da olduğu gibi ciddi sistem çökmelerine neden olacağı bu konuda yaşanmış örneklerdir.

Yakın gelecek için gerilim kararlılığı önemi artmakta olan bir problem olarak gözükmektedir. Bunun bir sebebi mevcut iletim hatlarının daha yoğun kullanımıdır. Mevcut iletim hatlarının daha yoğun kullanılması reaktif güç kompanzasyonu ile bir derece mümkün olsa da yeni bir iletim hattının daha tercih edilir olduğu elektriksel açıdan kesindir.

Gerilim kararlılığı son yıllarda yapılan pek çok araştırma sonucunda gayet iyi anlaşılan bir konu olmasına karşın, problemin generatör kontrollerinden, reaktif güç kompanzasyonuna, iletim ağı dizaynına ve yük karakteristiklerine kadar pek çok yönü vardır. Sistem bileşenlerinin fiziksel karakteristikleri ve matematiksel modelleri bu açıdan önemlidir.

Elektrik enerji sistemlerinde tüketicilerin ihtiyacının sürekli ve güvenli bir şekilde karşılanması ancak sağlıklı bir kararlılık profiline sahip sistemlerde gerçekleşebilir. Devreye giren ya da devreden çıkan yükler olduğu kadar, üretim veya iletim sisteminde meydana gelebilecek değişiklikler de (örneğin bir generatörün ya da paralel iletim hattının devreden çıkması) sistem tarafından kısa sürede algılanmalı ve yeni duruma göre cevap verilmelidir.

Enerji sisteminin kuşkusuz en önemli bölümlerinden biri dağıtım ve yüklerdir. Gitgide büyüyen, yeni üretim birimlerinin dahil olmasıyla genişleyen ve artan enerji ihtiyaçlarıyla daha yoğun kullanılan enterkonnekte enerji sistemlerinde yük tipleri, gerilim kararlılığı açısından daha da önem kazanmaktadır. Sabit empedanslı, sabit akımlı ve sabit güçlü olarak sınıflandırılabilen yük tiplerinin davranışları farklı olduğundan, sistemde meydana gelebilecek herhangi bir bozucu etki gerilim kararlılığını tehdit edebilir.

Tüketim noktalarındaki yüklerin tipi göz önüne alınarak yapılan bir planlama, enerji sisteminin işleyişini daha güvenli kılar. Bunun dışında günlük-aylık gibi değişik zaman periyotlarında yapılacak yaklaşık yük tahminleri ve işletme programları da kararlılık sınırlarını zorlamadan güvenli bir güç akışını beklenmedik durumlar dışında temin eder. Bir kısadevre arızası ya da üretim biriminin devre dışı kalması gibi beklenmedik durumlara karşı ise, alıcıların beslenmesinin devamını sağlamak için önceden bazı senaryoların göz önüne alınması kısıtlı olan zamanda doğru manevraları yapmakta fayda sağlayabilir.

Yük barasındaki gerilimlerin makul sınırlar içinde tutulması ve yüklerin aktif ve reaktif güç ihtiyaçlarının sağlıklı bir şekilde sağlanması, kararlı bir sistemin başlıca özeliğidir. Doğadaki her sistemin kararlı bir şekilde işleminin, sistemin parametrelerinin sistem durum uzayında kararlı değişimleriyle mümkün olduğu gibi, elektrik enerji sistemlerinde de; gerilim, aktif ve reaktif güç ile yük açısı gibi parametrelerin sistem durum uzayında kritik değerleri aşmadan ve bazı çatalanma noktalarına uğramadan değişmesi, kararlılığının devamlılık şartıdır.

Durum uzayında çatalanmaların meydana geldiği noktalar, sistemin de kaos durumuna iletiildiği noktalar. Böyle bir noktadan sonra, sistemin bir parametresinin geleceğini öngörmek hayli zor hatta imkansız olacaktır. Ayrıca yine böyle bir çatalanma noktasında sistemin temel bir parametresini değiştirmek, çalışma noktasını durum uzayında çok farklı noktalara da iletir.

Bu çalışmada, öncelikle doğadaki sistemlerin genel özellikleri ve ortak yanları ile kararlılık, denge gibi bazı kavramların üzerinde durulmuştur. Ardından durum uzayında meydana

gelebilecek bazı özel noktalarda sistemin uğrayabileceği kaos durumu ve Kaos Teorisi hakkında bilgiler verilmiş ve son olarak da temel konu gerilim kararlılığı işlenmiştir.

Sayısal uygulamada incelenen enerji sisteminin farklı tipte yükler içermesi, yük davranışları ve gerilim kararlılık sınırlarının ortaya konması açısından tercih edilmiştir. Güç faktörü, iletim hattı uzunluğu, paralel hat sayısı, seri kompanzasyon oranı, hat kayıp faktörü ve hat başı gerilimi gibi gerilim kararlılığında belirleyici rol oynayan sistem parametreleri, hat sonundan beslenmesi istenen aynı yük değerleri için değiştirilerek, gerilim kararlılığı açısından kritik değerleri nasıl etkilediği ortaya konmuştur. Sonuç olarak elde edilen kritik gerilim ve güç değerleri, bu faktörlerin değişiminin sisteme olumlu ya da olumsuz etkilerini ortaya koymaktadır.

Gerilim kararlılığı açısından kritik değerlerin hesaplanarak ortaya konması ardından, durum uzayında bu kritik değerlerde bir çatallanmanın meydana gelmesi halinde sistemin düşebileceği kaos durumu gösterilmiştir.

Çalışmanın amacı olan bir enerji sisteminin gerilim kararlılığı profilini ve onu etkileyen faktörleri ortaya koymaya ilave olarak, sistemin bazı özel çatallanma noktalarına uğradığı takdirde kaosa düşeceği de belirtilmiştir. Uygulanan yöntem de gerilim kararlılığını etkileyen faktörlerin değişiminin kritik değerlere etkimesi ve bunların yorumlanması üzerinedir.

## 2. SİSTEM ve YAPILARIN ANATOMİSİ

### 2.1 Açık, Kapalı ve İzole Sistemler

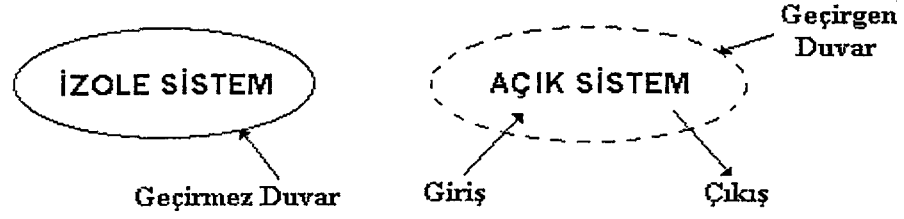
En basit şekilde bir tanım olarak sistem, organik ya da inorganik maddelerden ya da kurumsal varlıklardan oluşan ve bir duvarla çevrelenmiş bir topluluktur. Bu duvar, sistemin kendi özeliğine göre kendini sınırlayan ya da sınırsız bırakacak şekilde gerçek ya da hayali olabilir. Sistemler kendilerini sınırlayan duvarların tipine göre üç şekilde tanımlanır: İzole sistemler, kapalı sistemler ve açık sistemler.

İzole sistemler, sistemden içeri ve dışarı geçişe izin vermeyen katı ve geçirmez duvarlarla çevrelenmiştir. Gerçek hayatta böyle bir sistemin uzun süre hayatta kalması imkansızdır çünkü her zaman bir tür geçiş mutlaka mevcut olur.

İzole sistem kavramı bilimsel araştırmalarda kullanılır. Çünkü elektromagnetizma ve yerçekimi gibi dış kuvvetleri hesaba katmayarak, analizler en iyi halde yaklaşık da olsa daha kullanışlı anlayışlar sağlayabilir ve daha kolay işlenir olabilir. Ekonomi alanında da dış etkenler hariç tutulur, fakat bu da çok gerçekçi değildir. Bunun nedeni, ekonomik sistemlerin de hükümet yönetimi, sosyal istekler ve politik güçler tarafından etki altında kalmasıdır. Gerçekte ise sistemler denge durumundan aşağı ya da yukarı itilip çekilirler. Kendi işleyişinde meydana gelen en ufak bir değişiklik ya da hareket bile bir ölçüde buna neden olur.

Kapalı sistemler madde geçişine izin vermeyen duvarlarla sınırlanmış sistemlerdir. Bununla birlikte enerji ve bilgi geçişine müsaade eder. Açık sistemler ise; madde, enerji, bilgi ya da entropinin iki yönde de geçebildiği geçirgen duvarlara sahiptir. İnsan vücudu açık bir sistem için en iyi örnektir. Besleyici besinlerin, sıvıların alınışı, atıkların vücuttan dışarı atılışı, enerji elde edilmesi ve harcanması, bilginin öğrenilmesi, uygulanması ve kullanıldıktan sonra geçmesi açık bir sistemin tüm özelliklerini ortaya koyar. Bir otomobil ya da bir iş yeri de açık sistem sınıfına giren örneklerdir.

Bütün bunlar organik, inorganik ve kurumsal açık sistemlerin en sık rastlanan genel örnekleridir. Bunlar ayrıca dinamikler ve göreceli boyutlarda farklılık gösterirler. Teknik olarak akışlar; madde, enerji, bilgi ya da entropi akışı olabilir. Bu akışlar sisteme giren ve çıkanlar olarak da adlandırılabilir. Açık ve izole sistemlerin karakteristikleri Tablo 2.1'de gösterilmiş ve karşılaştırılmıştır (Çambel, 1993).



<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mükemmel şekilde geçirmez olan duvar sistemi kendini çevreleyen ortamdan ayırır. Duvardan iki yönde de kesinlikle herhangi bir geçiş olamaz.</li> <li>2. Sistemin sadece makroskobik yönleri gözönüne alınmıştır.</li> <li>3. Sistem denge durumundadır.</li> <li>4. Sistem tutucu bir sistemdir. (Hamiltonian)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sistemi çevresinden geçirgen bir duvar ayırır. Bu sayede içeri ya da dışarı akışlar sözkonusudur. Bu akışlar materyal, bilgi, enerji ve de entropi içerir.</li> <li>2. Sistemin hem makroskobik hem de mikroskobik yönleri gözönüne alınmıştır.</li> <li>3. Sistem dengede olabilir ya da olmayabilir ve bu mikroskobik ya da makroskobik seviyelerde gerçekleşebilir.</li> <li>4. Sistem tersinmez işlemleri içerebilir, yani dağınıktır.</li> </ol>
--	---

**Tablo 2.1 Sistemlerin karakteristikleri.**

### 2.1.1 Durum Uzayı

Durum uzayı bir noktanın konumunu açık olarak belirtmemizi sağlayan kavramsal bir terimdir. Bir noktanın yerinin belirtilmesi geleneksel olarak x, y ve z yönlerinde dikdörtgen biçimindeki kartezyen koordinat sistemiyle yapılır. x, y ve z; noktanın eksenlere olan uzaklığını ifade eder. Fakat bu yöntem dinamik sistemleri ele aldığımızda yetersizdir çünkü dinamik sistemler bir yerde durmaz ve hareket eder. Yani durum zamana bağlıdır. Bu  $[x(t), y(t), z(t)]$  diye yazarak gösterilebilir. Dinamik ya da hareket aşağıdaki denklem takımıyla ifade edilir.

$$\partial x / \partial t = \dot{x} = f_1(x, y, z)$$

$$\partial y / \partial t = \dot{y} = f_2(x, y, z)$$

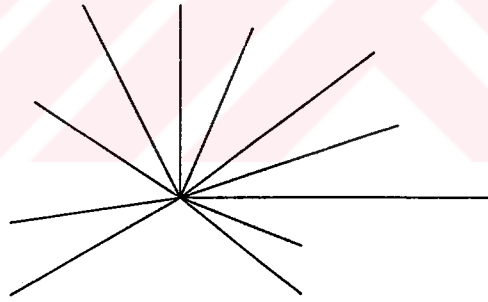
$$\partial z / \partial t = \dot{z} = f_3(x, y, z)$$

(2.1)

Burada  $(\partial x/\partial t)$ ,  $(\partial y/\partial t)$  ve  $(\partial z/\partial t)$  hızlara karşılık gelirken,  $f_1$ ,  $f_2$  ve  $f_3$ ;  $x$ ,  $y$  ve  $z$  koordinatlarının durum fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlar  $x'$ ,  $y'$  ve  $z'$  olarak da gösterilebilirler.

Bu denklem takımları üçüncü sınıf bir dinamik sistem ortaya koyar. Eğer  $x$ ,  $y$  ve  $z$  mesafe ise türevleri hız olacaktır. Bununla birlikte durum değişkenleri, populasyon ya da ekonomik büyüklükler gibi bazı diğer terimler olabilir. Uzaylar, durum değişkenleri için oluşturulmuştur. Durum değişkenleri de koordinatlar oluşturduğundan, o zaman türevleri, faz uzayı ya da durum uzayı olarak adlandırılır. Bu iki terim de sıkça kullanılır. Eğer  $f_1$ ,  $f_2$  ve  $f_3$  fonksiyonları zamana açık olarak bağlı değilse, sistem –otonom- olarak tanımlanır. Çünkü ‘faz uzayı’ kavramı istatistiksel fizik üzerine temellendirilmiştir. Genel olarak istatistiksel fizikte bir sistemin durumu iki genelleştirilmiş koordinat sistemiyle gösterilir( $q_i$  ve  $p_i$ ).

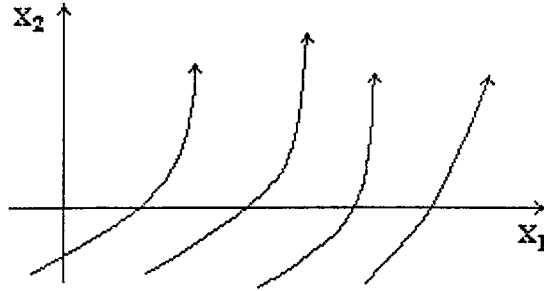
Durum uzayı kavramı kompleks sistemlerle çalışılırken sıkça kullanılır, fakat istatistiksel mekanik formülasyonundan farklılıklar gösterir. Sistem bir takım diskrit elementlerden oluşmaktadır.  $n$  boyutlu bir durum uzayı hep alıştığımız gibi düzenli ve simetrik olmak zorunda bile değildir (Şekil 2.1).



**Şekil 2.1 n boyutlu faz uzayı.**

Bununla birlikte böyle bir  $n$  boyutlu durum uzayının gözönüne getirilmesi hayli zordur, çünkü her boyut;  $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$  gibi bir ışına sahiptir. Buradaki  $n$ , sistemdeki önemli değişkenlerin sayısıdır. Faz uzayının bu tipi, tutucu sistemlerdekinden daha geneldir. Durumun gereklerine bağlı olarak farklı yollarda oluşturulmuş uzayları izler.

Önceki fonksiyonları yöneten uygun programlar olduğu ve bunların yukarıdaki diferansiyel denklemlerle ifade edildiğini kabul edersek; bu denklemlerin çözümleri  $(x_1, x_2)$  faz yüzeyinde yörüngelerle birlikte ‘faz diyagramı’ olarak adlandırılan bir takım yörünge ve akış hatları ortaya koyar. Buna bir örnek Şekil 2.2’de görülmektedir.



**Şekil 2.2 Faz diyagramı.**

Durum uzayında bir yörünge kendine yaklaştığında bir dirsek şekli ortaya koyar ve bu bir 'orbit' olarak adlandırılır.

1895' te Dinamik Sistemler Teorisinin kurucusu Henri Poincare bu durumu şu şekilde sorgulamıştır:

'Hareket eden bir nokta kapalı bir eğri tanımlar mı ve bu her zaman düzlemin belli bir kısmı dahilinde kalabilir mi? Başka bir deyişle bu noktanın orbiti kararlı mı kararsız mıdır?'

## 2.2 Denge ve Dengesizlik

Genel olarak denge durumu, sistemin işlevlerini rahat ve sarsılmaz şekilde devam ettirdiği hal olarak tanımlanır. Kompleks dinamik sistemlerde ise denge, sanki geçici bir ölçüp belirleme durağı gibidir. Dinamik olaylar, sistem sadece denge durumundan saptığında gerçekleşebilir. Buna göre dengenin limitlerinin anlaşılması için yardımcıdır.

Bununla birlikte 'denge durumu' karşıt kuvvetlerin eşit büyüklüğü sebebiyle sistemin hareketinin sürdüğü kararlı ve sarsıntısız hal olarak da tarif edilir. Karşıt kuvvetlerin eşit olması, sistemde hiçbir hareketin olmadığı anlamına gelmez. Örneğin bir kimyasal reaksiyon, giren ve çıkanların yönlerinin zıt olmasına karşın, hızlarının eşit olması durumunda dengede olabilir. Bu da genel olarak 'Girenler ↔ Çıkanlar' olarak ifade edilir.

Matematiksel olarak denge durumu da basit bir şekilde tarif edilebilir. Eğer  $\frac{\partial x_1}{\partial t} = \frac{\partial x_2}{\partial t} = 0$  ise sistem dengededir. Bu durumda bazı 'sabit noktalar'dan söz edilecektir. Pek çok örnekte 'kritik durumlar'la, örneğin çatalanmalarla karşılaşmıştır.

Dengenin bir kaç farklı çeşidi vardır. Kısaca, 'Mikro Denge' sistemin en küçük bileşenleri kendi yakın çevreleriyle dengede oldukları zaman görülen dengedir. 'Makro Denge' sistemlerin yapısı büyüklükleri ile göz önüne alındığı zaman karşımıza çıkar. 'Global Denge' ise birden fazla sistemin karşılıklı olarak dengede olduğu durumdur. Bununla birlikte tüm sistem, kesin şartlar altında tersine işleyebilir işlemlerle karşılaşabilir. Sistemin küçük parçaları, zamana göre esasen sabit olan dahili parametrelere sahip olabilir. Bu da 'Yerel Denge' olarak adlandırılır.

Denge olmadığı zaman hüküm süren durumun dengesizlik olduğunu söylemek fazla yanlış olmaz. Dengenin olmadığı bu nokta, farklı sınıflarda dengesizliklerin söz konusu olabileceği durumdur. Bunlardan biri 'dengeye yakın' olan haldir. Bir kural olarak, ısı iletimi, elektrik iletimi ya da kütle transferi gibi bir iletim işleminin olduğu doğal olaylar bu sınıfa dahil edilebilir. Bunlar genel olarak Ohm kanunu, Fourier kanunu vb. ile tanımlanmıştır. Böyle dengeye yakın rejimlerde akışlar, güçlerin (potansiyellerin) lineer fonksiyonlarıdır. Buna karşın pek çok kompleks sistemde akışlar, karmaşık ve güçlerin non-lineer fonksiyonudur. Bu durumda da 'dengeden uzak' koşullardan söz edilebilir.

### 2.3 Kararlılık ve Kararsızlık

Karmaşıklık, dinamik olma durumu ile ilgili olduğundan, dengesizlik koşullarında gerçekleştiği görülebilir. Denge ve kararlılık birbirine çok yakın kavramlardır. Dengenin çeşitli şekilleri olduğu gibi kararlılığın da pek çok çeşiti vardır.

Kararsızlık, her çeşit yapıda meydana gelebilir (Katı, sıvı, kurumsal vs.). Sistem akışındaki bazı karışıklıklar kararlı sistemi kararsız kılabilir. Bununla birlikte kararsız yapı, şekil ve fonksiyon olarak daha karmaşık ve daha iyi organize sistemlere de geçebilir. Bu da kararlılık konusunun, karmaşıklığın önemli bir yüzü olduğunu ortaya koyar.

Bir sistem normal olarak kararlı olabilir, fakat bazı anormal karışıklıklar sebebiyle kararsızlığa geçebilir. Sistemin hassasiyeti olduğu kadar karışıklığın tipi ve büyüklüğü de göz önüne alınması gereken faktörlerdir. Kararlı durumdan kararsız duruma geçişte, sıkça birden fazla karışıklık tipi gereklidir. Örneğin bir hastalığın gelişip sonra da yayılması için birden fazla şartın birarada meydana gelme gerekliliği buna uygundur. Bütün bunların birarada varolması olasılığı da her an gerçekleşecek kadar yüksek değildir.

Kararlı ve kararsız dengenin farklarının ortaya konması, sistem davranışının tanımlanıp sınıflandırılması için faydalıdır. Eğer durum uzayında her başlangıç şartı dengeye yakınsa ve dengeye yakın olan diğer koşullara hareket ediyorsa, sistemin kararlı olduğu söylenebilir. Fakat 'dengeye yakın olmak' çok farklı büyüklük derecelerinde çeşitlilik gösteriyor da olabilir. Buna uygun olarak zayıf ve güçlü şekilde kararlı olan iki denge durumunun farkı ortaya çıkar.

Bir sistemde bir akış-işleyişin, yöneten kuvvetlerin bir dengesizliği olmadıkça söz konusu olmadığı açıktır. Sistemde bir işleyiş için bir denge yoksunluğu ya da potansiyel bir fark olması gereklidir. Denge durumuyla ilgili bir terim de kararlı işleyiş durumudur. Aşağıdaki Liouville tipi denklemde  $\rho$  yoğunluk ve  $V$  de uygun referans hızların bir ortalamasıdır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2.2)$$

Bu denklemin açıklaması gözlemcinin uzayda sabit olduğu Eulerian bakışına göre mi, yoksa gözlemcinin akışla hareket ettiği Lagrange yaklaşımına göre mi uygulandığına bağlı olarak değişebilir.

Hemen hemen tam ya da yaklaşık toplam türev

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + V \cdot \nabla \quad (2.3)$$

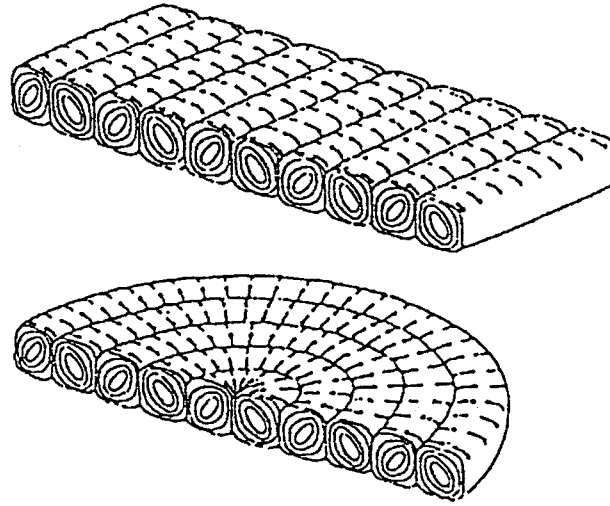
ile tanımlanmıştır. Burada  $\frac{\partial}{\partial t}$  terimi değişimin zamana bağlı lokal hızı,  $V \cdot \nabla$  terimi ise pozisyona bağlı değişimin uzaya ait hızıdır.  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  olsa, yani yoğunluk zamanla değişmese bile hareket kararlı ya da kararsız olabilir. Bununla birlikte bazı yayınlarda bu, statik

dengeden farkını ortaya koymak için 'sabit durum' ya da 'kararlı denge' olarak adlandırılır. Özet olarak  $V = V(x)$  ise hareket kararlı,  $V = V(x,t)$  ise kararsızdır.

### 2.3.1 Rayleigh-Benard Kararsızlığı

Bilindiği gibi katılar kesin bir şekle sahipken sıvılar içinde buldukları kabın şeklini alırlar ve gazlar da buldukları kapalı ortamı tamamen doldururlar. Rayleigh-Benard akış modeli 1900'de H. Benard tarafından deneysel olarak birbirine yakın iki yatay tabaka arasındaki uygun bir sıvının ısıtıldığında, yukarıdan bakınca bal petekleri gibi düzenli dizilmiş hücreler şeklinde gözükken hücresel bir yapı gözlenerek ortaya konmuştur.

Deneyde kullanılan yatay plakalar arasındaki mesafe sadece birkaç milimetredir. Altındaki plakanın ısı  $T_L$ , üstteki plakanınkinden ( $T_H$ ) daha yüksektir. Yani  $T_H < T_L$ 'dir. Orjinal olarak ısıtma, alttan iletim yoluyla; fakat ısı artarken yani denge durumundan ayrılma artarken sıcak sıvı yükselir, daha soğuk olan üst tabaka ile karşılaşır, soğur ve devrilir. Bunun sonucunda da yukarıdan bakılınca hegzagonal hücreler gibi gözükken akış ruloları ortaya çıkar. Bu rulolarda sıvının dönüş yönü hepsinde aynı da olmayabilir. Şekil 2.3'te Velarde ve Norman tarafından tekrarlanan deneyde yan kesitten akışkan rulolarının görünümü görülmektedir.



Şekil 2.3 Akış hücrelerinin görünümü.

Buna ek olarak Lord Rayleigh 1916'da bu kararlılık probleminin teorik açıklamasını ortaya koymuş ve kendi adını verdiği boyutsuz bir Rayleigh sayısına ( $R_a$ ) bağlı olduğunu göstermiştir. Bu sayı aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir:

$$R_a = \frac{g \cdot \alpha \cdot \beta \cdot d^4}{\kappa \cdot V} \quad (2.4)$$

Burada  $g$  ivme katsayısı,  $\alpha$ ,  $\kappa$ ,  $V$  sırasıyla genleşme, ısı iletim ve kinematik viskozite sabitleridir.  $\beta$  ısı artışını,  $d$  ise plakalar arası mesafeyi göstermektedir. Bu Rayleigh sayısı doğal ya da serbest akış davranışı için temel kriterlerden birisidir. Fiziksel olarak viskoz ya da dağıtıcı güçlere karşı olan güçlerin oranını ortaya koyar. Kritik bir değere geldiğinde, akış kolonları belirir. Bu sayının büyüklüğü, doğal akış esnasında akış davranışının kararlılığında rol oynar. Kritik Rayleigh sayısının ( $R_{a-cr}$ ) altında, kararlılığı olumsuz etkileyen değişiklikler önemsizdir. Fakat  $R_{a-cr}$  değeri aşıldığında, bu olumsuz etkiler büyüme eğilimindedir. Berge, Porneau ve Vidal, Rayleigh sayısının bu eşik değerinde çatallaşmanın meydana geldiğini göstermişlerdir. Bu çatallaşma, akış kolonlarının her yönde dönebilmesinin de nedenidir. Çatallaşma, kararsızlığın da bir göstergesidir. Rayleigh-Benard kararsızlığı meteoroloji ve endüstriyel alanlarda da uygulamalara sahiptir. Bu uygulamalarda elbette mm-cm boyutundan daha büyük durumlar söz konusudur.

## 2.4 Tersinmezlik

Bir sistem işlevi, oluş sırasına göre işlerken bir takım kayıpların gerçekleşeceği muhakkaktır. İşte böyle sistem işlevleri 'tersinmez' olarak adlandırılır, çünkü aynı yolu tersine takip ederek ilk duruma dönmesi imkansızdır.

Buna bir örnek vermek için firene basılarak aniden duran bir otomobil ele alınırsa; otomobilin kinetik enerjisi, lastiklerin yere değdiği yüzey boyunca termal enerjiye dönüşmüştür. Bu süreçte de yüksek kalitedeki kinetik enerji, düşük kalitede termal enerjiye indirgenmiştir. Bu ısı enerjisi zemin ve tekerleklerin temas ettiği kısımlarda yayılır ve absorbe edilir.

Tekerleklerin ve zeminin zerrecikleri hissedilmez derecede ısı artışına uğramıştır ve bozucu bir etkiyle karşı karşıyadırlar. Gerçekleşen bu işlevin tersine gerçekleşmesi, gaz pedalına basılmaksızın otomobilin eski hızına ulaşması imkansızdır. Bu olayda tersinebilirlik olması

için dağılan termal enerjinin toplanması ve her nasıl olacağına tekrar kinetik enerjiye dönüşmesi gerekir.

Tersinmezlik olayına bir örnek de; parfüm dolu bir şişenin kapağını açtıktan sonra koku moleküllerinin etrafa yayılması ile verilebilir. Tamamiyle sanal olarak hava ve koku moleküllerinin gözle görünür bir şekilde işaretlendiğini ve bu olayların bir 'recorder' ile kaydedildiği düşünülürse, böyle bir tasvirde parfüm ve hava moleküllerinin karıştığı gözlenecektir. Olayın sonunda kaydedilen görüntü tersine sarılarak izlenirse koku moleküllerinin hava moleküllerinden ayrılarak tekrar şişenin içine girecek şekilde toplanmasının gerçekte imkansız olduğunu görülür. Bir geriye döndüremezliğin sözkonusu olduğu işlemler tersinmezdir.

Bu örnekteki parfüm moleküllerinin dağılımı, genel olarak Fick'in difüzyon dekleminde ifade edilen bir kütle iletimi davranışı teşkil eder.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 \cdot c \quad (2.5)$$

Denkleminde c konsantrasyon, D de difüzyon katsayısıdır.

Tersinir ve tersinmez olayların matematiksel olarak farklılaşması, zaman dönüşü değişmezliği test edilerek ortaya konabilir. Aşağıda V'nin hız, t'nin zaman ve  $\nabla^2$ 'nin de Nabra operatörü olduğu klasik dalga denklemini ele alırsak;

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = \nabla^2 \cdot V \quad (2.6)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.7)$$

Denkleminde t yerine (-t) aldığımızda problemin açık bir şekilde değişmediği gözükür, çünkü paydadaki t'nin karesi alınmaktadır, yani  $t^2 = (-t)^2$  dir. Bununla birlikte Fick'in denkleminde aynı şey geçerli değildir, çünkü paydadaki t, birinci dereceden olduğu için problem tamamiyle değişir. Tersinir işlemler, zaman dönüşü değişmezdir. Bunun karşıtı yani zaman yönergeliği kompleks sistemlerin ilk karakteristiğidir.

Gerçek hayattaki sistemlerin işlevleri tersinmezdir, çünkü sürtünme, ısı iletimi, karışım ve serbest genişleme gibi kayıplara uğrarlar. Böyle sistemler için fonksiyona devam etmek,

enerjinin çeşitindeki devamlılığa bağlıdır. İlave enerji ile beslendiği sürece varolan yapıların dağılma eğiliminde olduğu söylenebilir. Böyle yapıların da fizik ve kimyada olduğu gibi biyoloji ve sosyal organizasyon alanlarında da uygulamaları bulunabilir. Bazı dağılım eğilimindeki sistemler de yüksek seviyede karmaşıklığa erişebileceğinden dolayı kendileri organize olmuş olabilir. Örneğin yaşam türleri kendinden organizedir. Bu durumda da orjinal sistemin zaman içinde değişmesi ve daha organize bir hale geçmesi sebebiyle 'yapı' kelimesinin kullanımı daha tercih edilirdir.



### 3. KAOS TEORİSİ

#### 3.1 Kaos Teorisi Nedir ?

Geride kalan 30 yıl içinde akışkanlar mekaniği, kimya ve populasyon biyolojisi gibi alanlarda çalışan bilim adamları, gözlenebilen bu doğal olaylar için pek çok matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu modellerden bazıları birbirine aykırı gözükken iki özelliğe sahiptir: Birkaç basit eşitlikten oluşurlar, fakat bu eşitliklerin çözüm yolları hayli karmaşıklık gösterir ve nasıl bir yol izleneceği bile tahmin edilemez. Aynı karmaşık örnekler, farklı dalda bilimsel araştırmalarda ya da mevcut sistemlerde de görülmektedir. Bu karmaşık modellerin analizi ve gerçek olaylardaki benzer davranışların araştırması 'Kaos Teorisi' olarak adlandırılır.

Kendinden önceki yöntemleri sorgulayarak yeni yaklaşımlar getiren Kaos Teorisi, kurulu pek çok sistem üzerinde süregelen bilimsel araştırmaların yeni bir alanıdır.

Kaos Teorisi, nonlinear dinamik sistemlerde aperiodyk kararsız davranışları inceleyen nitel bir çalışmadır. Araştırma konusunun öznesi etrafında oluşturduğu iskelet yapıyı 'sistem' olarak tanımlar. Bu 'sistem', güneş ve çevresinde dönen gezegenler olabileceği gibi bir adadaki canlı türünün populasyonu ya da insan vücudundaki bir doku da olabilir. Sistemin bazı yönleri matematiksel tanımlamalarla ifade edilebilecek türdendir. Sistemin bu açıdan ifade edilebilen tüm kısımları sayısal değerlerle açıkça ifade edilerek kesin bir zamanda sistemin sağlam bir tanımı elde edilebilir. Dolayısıyla sistemin o andaki durumu gözlemlenip analiz edilebilir. Dinamik bir sistem, işlemekte olan fiziksel bir sistemin matematiksel bir tanımının elde edilmesi için bir çözüm ve mevcut olan sistem görünümünün gelecek (ya da geçmiş) bir zaman için nasıl değişebileceğini düzenleyen bir kural içerir. Yani dinamik bir sistem gerçek bir sistemin zamanla değişimi için basitleştirilmiş bir modeldir.

Dinamik sistemlerin en sık rastlanılanları, değişkenlerin düzgün ya da ilerleyen bir şekilde değiştikleri sistemlerdir. Sistemin durumundaki bu değişiklikleri yöneten kurallar, değişkenlerin değişim hızını açıkça gösteren diferansiyel denklemler şeklindedir. Bazı durumlarda bu kurallar grafik olarak da ifade edilebilir. Bu diferansiyel denklemlerle çözüm yöntemleri uzun ve zor hesaplamalar gerektirdiğinden dezavantajlıdır. Bazı dinamik sistemler de kapalı form çözüm elde edecek şekilde basit matematiksel yöntemlerle elle çözülebilir. Böyle bir çözüm, diferansiyel denklemleri by-pass etmemize olanak tanıyan basit bir formül

şeklini alır. Sistemde ilk ve son zaman arasındaki her artış için sistemin durumunun yeniden hesaplanması yerine, formüle sadece son zaman konarak sistemin son durumu bulunabilir.

Kaos Teorisi için dinamik sistemlerin ayırt edici bir yanı da eşitliklerde nonlineer terimlerin oluşudur. Nonlineer terimler, sistem değişkenlerinin cebirsel ya da diğer başka karmaşık fonksiyonlarından ibarettir. Eşitliklerin nonlineer olması, genellikle kapalı form çözümünü imkansızlaştırır. Bu nedenle araştırmacılar, nonlineer dinamik sistemlerin davranışlarının sayısal olarak açıklanmasına çalışmışlardır. Fiziksel sistemi bir dizi eşitlikle modelledikten sonra sistemin gelecek bir zamandaki kesin ve açık bir tahminini sağlayacak bir formül bulmak yerine, uzun zaman periyotlu davranışlar hakkında fikir elde edilebilecek matematiksel teknikler kullanmışlardır.

Nitel bir inceleme olarak Kaos Teorisi, sistemi, gelecek bir zamandaki kesin durumuna ait sayısal tahminleri hedeflemekten çok, onun genel uzun süreli davranış karakterini amaçlayarak araştırır. Sistem davranışlarının nitel yanlarının araştırması Henri Poincare'in çalışmasıyla başlamıştır. Bu alanda şu anki çalışma 'Dinamik Sistemler Teorisi' adı altında devam etmektedir. 'Sistemin tüm çözümleri en sonunda nasıl karakteristikler gösterecektir?' ve 'sistem bir tür davranıştan diğer bir türe nasıl değişir?' gibi sorulara cevap arar. Kaos Teorisi, Dinamik Sistemler Teorisi'nin özelleşmiş bir uygulamasıdır (Kellert,1993).

Niteliğe ait sorular hemen hemen tüm dinamik sistemlerde sorulurken, Kaos Teorisi kararsız ve aperiodyk olan davranışların kesin formu üzerinde odaklanmıştır. Burada kararsız davranış derken, küçük karışıklıklara direnen davranış şekilleriyle asla bağdaşmayan bir sistem kastedilmektedir.

Aperiodyk davranış ise, değerlerin düzenli tekrarlamasının gerçekleştiği sistem durumunu ortaya koyan bir değişken bulunmadığında gerçekleşir. Kararsız aperiodyk davranış ise hayli komplekstir. Asla tekrarlamaz ve herhangi bir küçük karışıklığın etkilerini göstermeye devam eder. Böyle bir davranış da rastgele ortaya çıkan bir dizi ölçme üretir ve ileriye dönük bir tahmini imkansız kılar.

Kaos Teoremini, fiziksel sistemlerde kompleks davranışların diğer yöntemlerce açıklanmasından farklı kılan bir diğer nokta da, Kaos Teoremi tarafından incelenen aperiodyk kararsız davranışların tam olarak basit sistemlerde bulunabilmesidir. Kaos Teoremi böylelikle rastgele olduğu kadar, kompleks davranışları basit ve kesin tanımlanmış matematiksel modellerle inceler.

Nonlineer dinamik sistemlerde kararsız ve aperiyojik davranışların niteliksel bir çalışması olarak tanımlanan Kaos Teorisi, basit ve düzenli sistemlerde bile rastgele davranış ve kompleksliğin bulunmasının görünür çelişkisini ortaya koyar. Birçok çelişkili durumda Kaos Teorisi'nin neden iş gördüğünü araştırmak, 'düzenli şekilde bozulmanın' klasik fiziğin en eski problemlerinden biri olan 'karışıklığın başlaması' sorununa nasıl önemli bir ipucu sağladığının somut bir örneğini incelemekte yardım eder.

### 3.1.1 Kompleksliğin İki Farklı Yüzü

Türbülans (karışıklık) klasik fiziğin tam çözülmemiş bir problemi olarak durmaktadır. Halen şelale, çağlayan ve girdaplarda türbülans ve helezonik hareketlerin meydana gelmesinin kesin bir teorik açıklaması yoktur. Kaos Teorisinden önce bu probleme teorik yaklaşımlardan biri Lev Landau tarafından yapılmıştır. Landau modeli, türbülansı sarsıntısız bir sıvı akışının, örneğin hızının artmasıyla bir cismin yanından geçerken nasıl parçalanıp ayrıldığını tanımlayarak anlamaya çalışır. Türbülansın nasıl başladığını anlayarak tam karışık davranışın doğasına ait bazı ipuçları elde etmeyi amaçlar.

Örnek olarak, bir yerinde suyun geniş bir kayanın iki yanından aktığı, yavaş akan bir akarsu kolu ve kayanın etrafından akan suyun hızını hassas bir biçimde ölçen bir cihaz olduğu varsayalım. Bu durumda kararlı akış hali için cihaz sabit bir değer gösterecektir. Fakat suyun hızı artırılınca kaya çevresindeki sarsıntısız akış yolları, akıntı yönünde hareket eden küçük girdaplara ayrılan dalgalanmalara yol açarak kıvrılmaya başlar. Bu girdaplardan biri ölçü aletinden geçerken hızda önce bir artış sonra da bir azalış görülür ve bu her girdapta yinelenir. Hız ölçümlerinin ardarda gelişi zaman-değişim grafiğini sabitten periyodik davranışa değiştirmiş olur.

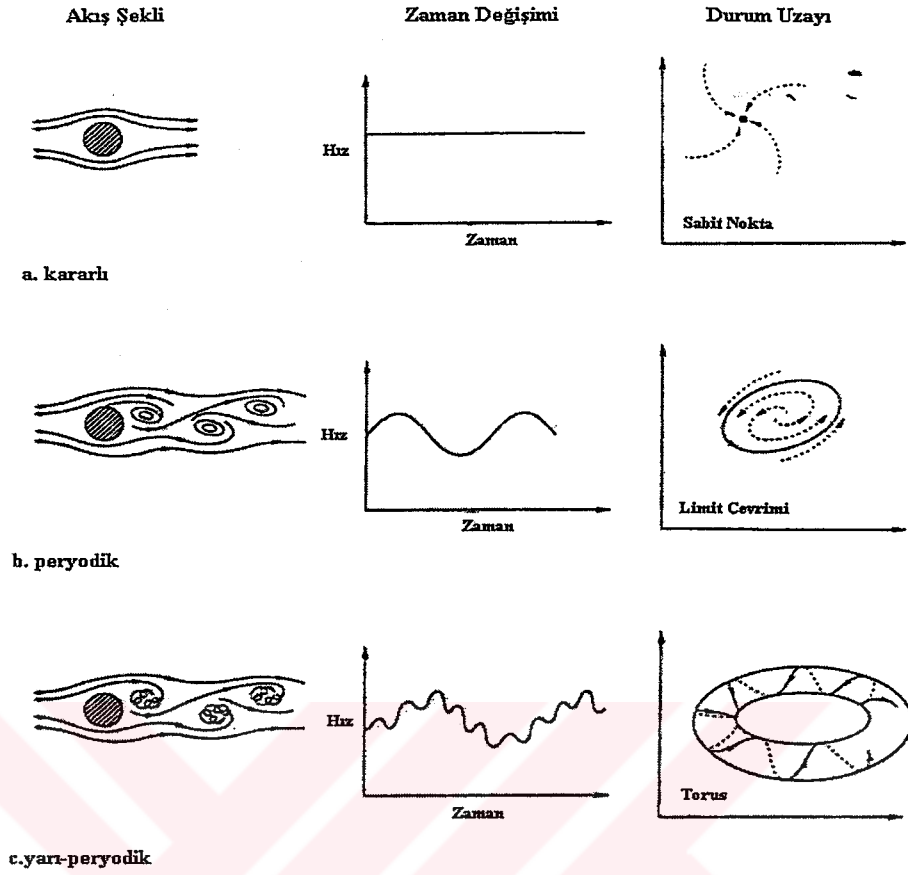
Dinamik sistemlerin anlaşılması için belki de en önemli arena, her boyutun sistemin bir değişkenine karşılık geldiği matematiksel olarak oluşturulmuş kavramsal 'durum uzayı'dır. Böylece durum uzayındaki her nokta, sistemin muhtemel durumlarından birinin tam halini ortaya koyar ve sistemin değişimi kendini bir yol ya da yörünge çizimi olarak belli eder. Bu metod hayli kullanışlıdır, çünkü çözümlerin gösterdiği açık bilgiler olmaksızın bu yörüngelerin (eğrilerin) geometrik taraflarını incelemek için çoğu zaman uygundur. Muhtemel

yörüngelerin durum uzayındaki karakterizasyonları, şekillerine de tekabül eder ve Kaos Teorisi'nin matematiksel tarafının da temel elementini teşkil eder.

Örnekteki akarsuyun tüm muhtemel durumlarını gösteren bir matematiksel model ele alınırsa, bu durum uzayındaki her nokta, sıvı akışının farklı birer konfigürasyonuna karşılık gelir. Kararlı akış durumunda sistemin davranışı, hareketsiz kalan tek bir çekici nokta ile karakterize edilir. Durum uzayında nerede başlandığının ve akışkanın akışına bu hızda başlarken nasıl karıştırıldığının önemi yoktur. Sistem en sonunda akarsu yatağının her noktasında sabit bir hızla sarsıntısız hareket eder duruma gelecektir. 'Küçük girdaplar' davranışına geçiş, durum uzayında bir çekici noktadan çekici periyodik bir çevrime değişimde matematiksel bir karşılığa sahiptir (Şekil 3.1.b).

Akarsuyun hızı artarken, akış davranışı daha karmaşık hale gelir ve akarsu yatağı ya da engelin şekline bağlı olabilir. Fakat daha hızlı akışların daha küçük girdaplar yaptığı bir türbülansa geçiş senaryosu izlenirse; hızın zamanla değişim ölçümleri iki frekansa ayrılacaktır.(Şekil 3.1.c) Sistem başka bir çatallaşmaya uğramıştır ve soyut bir durum uzayında sistemin durumunu ortaya koyan noktalar da iki boyutlu bir spiral şeklini çizer. Eğer iki frekans mantıklıca uygun değilse, sistem aynı konuma bir daha asla dönmeyecektir. Bu durum yarı periyodik davranış olarak adlandırılır.

Landau'nun türbülansın başlangıcını açıklama modelinin temeli, akış hızı artarken iki boyutlu torustaki yarı periyodik hareketin kararsız hale geçeceği ve bazı küçük karışıklıkların üç-dört boyutlu yarı periyodik davranışlara ve en sonunda sonsuzluğa götüreceği üzerinedir. Türbülansın başlangıcı, daha çok girdapla serbest davranışın daha büyük seviyelerinin uyarımını temsil eden çok sayıda sınırsız frekansın birikimini gösterir. Çok boyutlu bir torusta yarı periyodik bir davranış, kendini asla tekrarlamayacak ve de birbirleriyle rekabet eden çok sayıda etken sebebiyle tamamen tahmin edilemez olacaktır. Bu durumda Landau modeli, karakteristik aperiodyklik ve tahmin edilemezlik için açıklama yapar. Kompleks ve görünürde rastgele karışıklık davranışının, en iyi olarak bir saatçi dükkanında farklı ve irrasyonel bir ritimde tıklayan çok sayıda saat örneğiyle anlaşılabilirliğini belirtir.



Şekil 3.1 Akışkan bir sistemin türbülansa geçişi.

Kaos Teorisi'nin oluşumuna yol açan bir diğer yol da, kompleksliğin bu görünümünü çözmeyi amaçlayan karışıklığın başlangıcı için alternatif bir modeldir. Ruelle-Takens Newhouse (RTN) modeli olarak bilinen bu yol, karmaşık akıştaki kompleks davranışın ortak ölçüleri olmayan frekansların kabaca yığılmasıyla modellenmesi fikrini reddeder. Karmaşıklığa geçiş, karmaşık dinamik davranışları temsil eden bir yakınsak noktanın durum uzayında mevcut olması yerine, çok basit bir matematiksel eşitlikler takımı ile açıklanır. Böyle bir matematiksel nesne 'garip yakınsaklar' olarak adlandırılmıştır.

RTN modelinde bir engeli geçen sıvı akışının davranışı, sadece iki boyutlu torusun görünümüne kadar Landau tarafından ortaya konmuş prensibi takip eder. Bu noktadan sonra akış hızındaki ek bir artış, yakınsağın kararsız olmasına yol açabilir ve örneklerin geniş bir kısmında davranış, yakınsaktaki hareketle karakterize edilen zayıf karmaşaya değişecektir. 'Garip yakınsak', bazı önemli karakteristiklere de sahiptir.

- (1): Durum uzayında komşu yörüngelerin ona doğru yakınsayacağı bir nesne, bir yakınsaktır.
- (2): Tipik nitelikte kendine özgü yapı gösteren iki boyutlu tabakalar yığını olan bir fraktalın görünümüne sahiptir.
- (3): Üzerindeki hareket, ilk şartlara hassas bir biçimde bağlılık olarak bilinen kararsızlığın bir şeklini gösterir. Bu da yakınsaktaki herhangi bir nokta için, ilkinin yolundan üstel olarak iraksayan bir yol izleyecek başka bir yakın noktanın varolmasıdır.
- (4): Çok basit bir takım dinamik denklemlerin sayısal integrasyonu ile elde edilebilir.

Türbülans gibi kompleks ve tahmin edilemez davranışların basit dinamik sistemlerin araştırılarak anlaşılacağı fikri, Kaos Teorisinin temelinde yer alan bir düşüncedir. RTN modeli bu hipotezi görünürde makul kılar. Diğer matematikçi ve teorisyenlerin çalışmaları da 70'li yıllardan itibaren Kaos Teorisi'nin kazançlılığına katkı sağlamıştır. Edward Lorenz de akışkanların akışı için bir modelden çıkarılmış bir dizi basitleştirilmiş denklemde 'garip yakınsak' keşfiyle bu yaklaşım için temel çalışmayı ortaya koymuştur. Kendi adını taşıyan 'garip yakınsak', kaosun matematiksel teorisinin daha geniş bir tartışmasına başlamak için özel bir yer teşkil etmektedir.

### 3.1.2 Garip Yakınsaklar

'Garip Yakınsaklar'ın ilk ortaya çıkışı Edward Lorenz'in 'Deterministik Aperiodyk Akışkan' adlı çalışmasında görülmüştür (Lorenz, 1963). Lorenz bir meteorolojist olarak dünya atmosferinin davranışları için bir matematiksel model üzerinde çalışmaktaydı. Lorenz, sıkıştırılmaz akışkanların davranışı için güçlü fakat çözümü matematiksel tanımlama için zor olan Navier-Stokes denklemleriyle işe başlamıştır. 1962'deki çalışmasına ek olarak denklemleri 3 sıradan diferansiyel denklemden oluşan bir dinamik sisteme indirgeyerek basitleştirmiştir:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= -\sigma \cdot x + \sigma \cdot y \\
 \dot{y} &= -x \cdot z + \gamma \cdot x - y \\
 \dot{z} &= x \cdot y - \delta \cdot z
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Bu Lorenz sisteminde modelin 'atmosferinin' durumu  $x$ ,  $y$  ve  $z$  değişkenleriyle tamamen belirtilmiştir. Sistemin karakteristikleri, modelin durumunun kesin fiziksel özelliklerine tekabül eden  $\sigma$ ,  $\gamma$  ve  $\delta$  parametrelerinin değişimiyle değişiklik gösterebilir. Sistem deterministik ve matematiksel olarak açık ve doğru olmakla birlikte, kapalı form çözüme olanak sağlamaz. Sistemin davranışını anlamak için Lorenz, sistemin tipik çözümünü hedefleyen denklemlerin zahmetli adım adım integrasyonu görevini üstlenebilecek bir dijital bilgisayar kullanmıştır.

Parametrelerin kesin değerleri için Lorenz sisteminin çözümleri, özel bir tip kararsızlık gösterir. Sistemin ilk başlangıç değerleri  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  olarak saptanarak ilk şartlar belirtildiğinde önce bir süre için saat yönünde, sonra farklı bir süre için saat yönüne ters yönde ve sonra yine saat yönünde ve böyle devam eden ve sıvı akışına tekabül eden bir çözüm görülür. Davranış hayli karmaşıktır, fakat tamamen diferansiyel denklemler tarafından yönetilmektedir. Bununla birlikte başlangıç şartlarındaki küçük bir değişim, örneğin  $x_0+0.001$ ,  $y_0$  ve  $z_0$  halinde çözüm esasen kısa bir süre içinde farklı olacaktır. Davranış hala önce bir yönde sonra zıt yönde rotasyonel akış şeklinde olabilir, fakat ilk olarak bir hayli benzer olan iki sistemin durumu hızla birbirinden uzaklaşacaktır.

Kararsızlığın bu şekli 'ilk şartlara hassas bağımlılık' adını taşır ve kaotik davranışın ayırt edici bir karakteristiğidir. İlk şartlara hassas bir bağımlılık gösteren bir dinamik sistem birbirine hayli yakın başlangıç koşulları için bariz şekilde birbirinden farklı çözümler oluşturacaktır. Gerçekte, verilen herhangi bir ilk şartlar takımı için  $(x_0, y_0, z_0)$  kendisine yakın, yeterli süre içerisinde kendisinden gerekli bir mesafe iraksayacak başka bir ilk şartlar takımı vardır.

Lorenz, kendi keşfinin sonuçlarını şöyle ifade etmiştir: 'Birbirinden çok az miktarlarda farklılık gösteren iki sistem, neticede birbirinden epey farklı iki duruma gelişebilir. O zaman, eğer o anki gözlenen sistemde herhangi bir hata varsa ve herhangi bir gerçek sistemde böyle bir hata kaçınılmaz gözüküyorsa uzak gelecekte sistemin anlık bir durumu için kabul edilebilir bir tahmin yapmak imkansız olabilir' (1963). İlk şartlara hassas bağımlılık gösteren sistemler Lorenz'in 'kelebek etkisi' olarak adlandırdığı durumu gösterirler. Eğer dünyanın hava durumunu bir kaotik sistem olarak öngörürsek, o zaman bugün Brezilya'daki iyi hava ile gelecek ay Teksas'taki bir fırtınanın 'kelebek kanatları' birbirinden farklılık gösterecektir. Uzun dönem kesinliğiyle herhangi bir hava tahmini girişimi, bütün kelebekleri tam doğrulukla içeren tüm bilgiler hesaba katılmadıkça başarısız olur. Örneğin, bilgisayarlarda modellenmiş

kaotik dinamik sistemler, makinanın kesinlik sınırında bir tamamlama hatasını sistemin durumunda şiddetli bir ıraksamaya dönüştürebilir. Böyle bir uç hassasiyet tam yörüngelerin hesaplanmasını imkansız kılar.

Bu imkansızlık karşısında Lorenz, sistemi incelemek için nitel bir yaklaşım kullanmıştır. Böyle bir yaklaşımda ilk adım, sistemin sürtünmenin geçerli enerji kaybına neden olacağı anlamına gelen 'dağılma eğiliminde' olduğunu belirtmektir. Sistem eğer dış enerji kaynağı - bu örnekte ısı- ortadan kaldırılırsa hareketsizlik durumuna geçebilir. Dağılma eğilimindeki bir sistemin davranışının durum uzayı gösterimi, bölgelerin daralmasını gösterir. En son sonuç, tüm yakın yörüngelerin kendisine doğru yakınsadığı bir noktalar takımı, yani 'yakınsak'tır. Kaos Teorisi'nin gelişine dek sabit nokta, limit çevrimi ve torus olarak sadece 3 çeşit yakınsak, genel olarak kabul edilmekteydi. Fakat bu yakınsakların hiçbiri Lorenz'in bulduğu kararsız aperiodyk hareketi tanımlayamıyordu. Lorenz, sisteminin grafiğini elde etmek için bilgisayar kullanarak Garip Yakınsak adlı yeni bir geometrik nesnenin ilk görünümünü Şekil 3.2' de görüldüğü gibi ortaya koymuştur.



**Şekil 3.2 Lorenz yakınsağı.**

Bu nesnelere garip olarak adlandırılmalarının bir nedeni, bunların görünüşte karşıt iki etkiyi bağdaştırmalarıdır: İlk olarak yakındaki yörüngelerin üzerlerine yakınsadığı anlamına gelen 'yakınsak'tırlar ve bununla beraber, yakınsakta yakın yörüngelerin birlikte hızla ıraksadığı anlamına gelen ilk şartlara hassas bağımlılık gösterirler. Bu görünür zıtlık, garip yakınsakların

ana geometrik özelliklerinden biri, yayılma ve daralmanın bir kombinasyonu tarafından bağdaştırılır. Kaotik sistemin hareketi, yakın noktaları alacak ve onları kesin bir yönde yayacaktır. Böylece yerel ıraksamanın yaratılışı, tahmin edilemezlikten sorumlu olur. Fakat sistem ayrıca farklı yönlerdeki yörüngelerin yakınsamasına yol açan bazı uzaklıklardaki noktaların birlikte katlanması şeklinde de davranır.

Lorenz yakınsağında biri saat, biri buna ters yönde rotasyonel bir hareket izleyen iki tane disk benzeri yapı görülür. Soldaki diskteki iki komşu nokta zaman içinde gelişirken yörüngeleri şeklin merkezine doğru yol alır ve farklı yönlere uzarlar. Sol disk etrafında birkaç dönüşten sonra yörüngelerin biri yeterince uzağa ayrılmış olabilir. Böylece merkezden bir dahaki geçişinde eski komşusundan ayrılacak ve sağ disk içinde dönmeye başlayacaktır ve her zaman için sağ diskteki yörüngeler keza sol taraftakiler gibi birbirleri arasında katlanıyor olacaklardır. Böylece garip yakınsağın iki sonucunu görülür: Komşu noktalar çabuk bir şekilde yakınsağın zıt tarafına gelişebilir ve yörüngeler de kendilerine özgü bir şekilde durum uzayının bu bölümüne kapatılır.

Bu şekil bir 'fraktal'dır. Kaotik sistemlerin yayılması ve daralması 'garip yakınsak'lara nonintegral ya da fraktal boyutunun ayırt edici karakteristiğini verir. Lorenz'in gösterdiği gibi üç değişkenli dağılma eğilimindeki bir sistem kaotik davranabilir. Dağılma eğilimindeki bir sistem gibi ilk şartların herhangi bir belirtilmiş bölgesi zamanla daralacaktır (Yakınsak, herhangi bir takım başlangıç noktalarının asimptotik olarak yaklaşacağı bir şekil ortaya koyar, böylece üç boyutlu durum uzayında fazla yer kaplamamalıdır). Bu nedenle yakınsağın boyutu üçten az olmalıdır. Fakat yuvar ya da torus gibi iki boyutlu bir yüzey de yakınsak olamaz, çünkü yakın yörüngeler böyle bir yüzeyde kesişmeden ıraksayamaz.

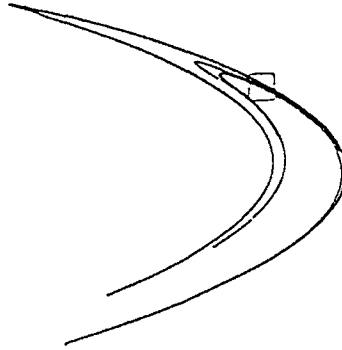
İlk şartlara hassas bağımlılık, yüzeydeki tüm noktaların üstel olarak ıraksayan komşu noktalara sahip olmasını gerektirir. Fakat iki boyutlu yüzeyin topolojik gerçekleri, bunun kesişen yörüngelere yol açacağını dikte eder. Yörüngeler kesişmemelidir, çünkü bu diferansiyel denklemler sisteminin deterministik doğasıyla çelişebilir. Kesişen yörüngeler, sistemin kesişime ulaştığında yollardan bir tercihe sahip olacağı anlamına gelir. Böylece yakınsak ikiden fazla bir boyuta sahip olmalıdır. Bu nedenle Lorenz Yakınsağı iki ve üç arasında bir boyuta sahip olmak zorundadır. Nonintegral boyutla geometrik bir nesne de 'fraktal' olarak adlandırılır.

Fraktal benzeri bir nesneye en iyi örnek girintili-çıkıntılı bir sahil şerididir. Bir uzaklıktan gözlenince kıyı şeridi bazı yarımada ve körfezler olarak görülür. Daha yakından bakınca daha küçük çıkıntı ve koylar farkedilir ve eğer daha da yakından incelersek başka ayrıntılar da ortaya çıkar. Eğer kıyı şeridini, her farklı uzaklık seviyesinden baktıkça yeni ayrıntıların ortaya çıkacağı kadar girintili-çıkıntılı düşünürsek, kıyıyı tarif eden hat uzayda daha çok yer kaplamaya başlar. Fraktal da budur. Garip yakınsağın bir örneğinde, kaotik dinamik sistemlerin yayılan ve tekrar daralan hareketi, sık sık kendini iki boyutta olan ama her an üç boyutlu uzaya geçecek gibi görünen hiç bitmeyen, kendine benzer bir yapıda birikmiş sınırsız tabaka yığınının ortaya çıkışıyla nesnelere üretir. Araya girmesinin bir ölçüsü olarak tasarlanmış bunun gibi bir yakınsağın boyutu ikiden çok, fakat üçten az olacaktır.

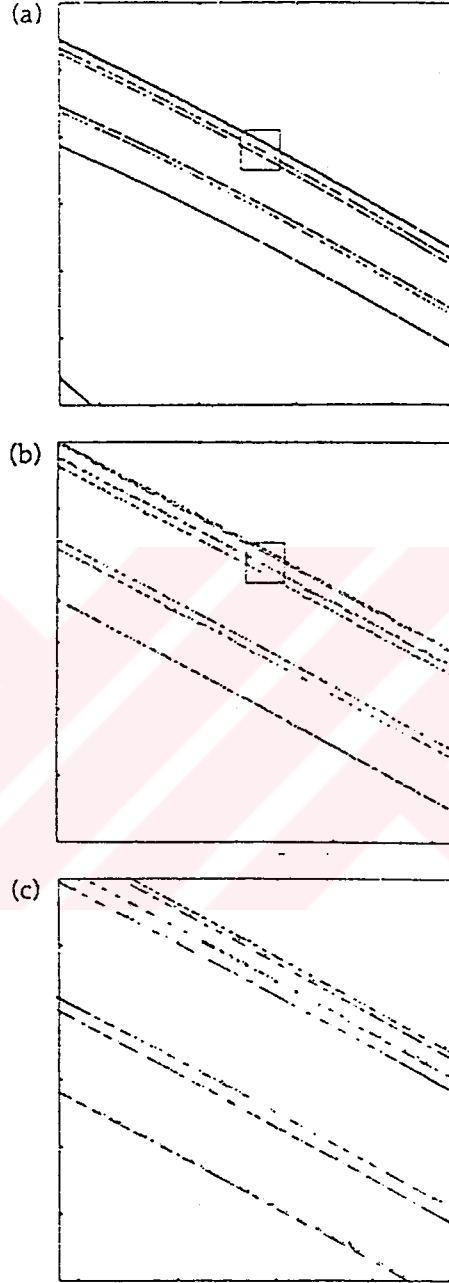
Başka bir örnek gösterilen yakınsak, sıfırı olmayan bir bölge sahibi olmaya başlayan, yayılan ve daralan bir hat olarak gözüken Henon Yakınsağı'dır. Bu yakınsak, sabit bir çekim hızıyla en basit nonlineer iki boyutlu bir sistemi ortaya koyan dinamik bir sistem olan Henon'un tasarlamasıyla elde edilmiştir (1976).

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= y_n + 1 + a \cdot x_n^2 \\ y_{n+1} &= b \cdot x_n \end{aligned} \quad (3.2)$$

$a=1.4$  ve  $b=0.3$  olduğunda bu sistem yakınsak için Şekil 3.3' teki gibidir.



Şekil 3.3 Henon yakınsağı.



**Şekil .3.4 Henon yakınsağının yapısı. (a) Şekil 3.3'teki kutu içindeki bölgenin genişlemesi. (b) a'daki kutu içindeki bölgenin genişlemesi . (c) b'deki kutu içindeki bölgenin genişlemesi.**

Bu tasarlama Lorenz sisteminden daha küçük bir daralma hızına sahiptir. Bunun anlamı tabakalarının farkedilmek için birlikte fazla yakınca daralmadığıdır. Şekil 3.4'ün gösterdiği

gibi Henon yakınsaklarının peşpeşe genişlemeleri, onun kendine özgü fraktal yapısını ortaya koyar. Henon yakınsağı da bir ve iki arasında bir boyuta sahiptir.

Garip yakınsakların nonintegral boyutu, geometrik bir az rastlanır özellikten daha fazladır. Bununla birlikte bu boyut için ölçülebilir ve böylece sistemin davranışının kullanışlı bir topolojik karakterini sağlayabilir. Böyle bir ölçümün muhtemel olması, boyutun genel Euclidian tanımından farklı bir tarifine bağlıdır. Eğer n boyutlu uzayda bir yakınsağın fraktal boyutu ölçmeye çalışılırsa, onu nispeten daha büyük bir büyüklükte n boyutlu küplerle (ya da hiperküplerle) kaplayarak başlanabilir. Objeyi kaplayacak kaç tane küp olduğunu saydıktan sonra küplerin kenar uzunluğu (e) küçültülür ve bu ufak küplerden kaç tane gerektiği sayılır. Hausdorff-Besicovitch boyutu D olarak da bilinen fraktal boyutun bu ölçümü  $N(e)$ 'nin yakınsağı kaplamak için gerekli (e) kenar uzunluklu küplerin sayısı olduğu

$$D = \frac{\lim_{e \rightarrow 0} (\log N(e))}{\log(1/e)} \quad (3.3)$$

formülü ile tanımlanır.

Kabaca fraktal boyut, geometrik bir nesnenin, büyüklüğün değişik derecelerinde ortaya çıkan obje yapısının yolunu karakterize eden değişken özelliklerini tarif eder. Yakınsağın sadece topolojik tarafı, yakınsaktaki katmanların ne kadar sıkıca daraldığını karakterize ederek, dinamik sistemde yayılma ve daralmanın nicel işaretlerini verir. Araştırmacıların farklı amaçlar için kullanışlı bulduğu fraktal boyutun birkaç tanımı vardır. Fakat tüm bu nicel ölçümler araştırmacılara, sistemi ve çevresini tanımlayan parametrelerdeki bir değişime cevap olarak davranışını değiştiren bir sistemi araştırma olanağı sağlar.

Kaotik sistemlerin başka bir nicel karakterizasyonu, ilk şartlara hassas bağımlılığın derecesini ve böylece de tahmin edilemezliğin derecesini ölçen Lyapunov üstelleri ile verilmiştir. Bir sistem için Lyapunov üstellerinin belirlenmesi, durum uzayında kesin bir nokta etrafında, üstündeki her noktanın merkez noktadan küçük bir yer değiştirmeyi ifade ettiği bir küçük 'ilk şartlar topu' oluşturarak ilerler. Değişim denklemleri, bu top üzerinde onun şeklini değiştirecek şekilde etkir. Top, dinamik sistemin küçük sapmalarla artacak ya da azalacak şekilde davranmasına göre ya her yönde genişler ya da daralır. Üç boyutlu bir sistem için topun deformasyonu, merkez noktanın yörüngesi boyuncaki deformasyon ve ona dik iki yön

boyuncaki deformasyonlara tekabül eden 3 sayıyla yaklaşık olarak tarif edilebilir. Bu üç sayı sistemin Lyapunov üstelleridir.

Eğer kesin bir yöndeki Lyapunov üsteli negatifse, bu yöndeki küçük bir değişim, sistem gelişirken üstel olarak daralacaktır. Eğer üstel 0 ise, yer değişimi kabaca aynı büyüklükte kalır, fakat Lyapunov bileşeni eğer pozitif bir değerse, herhangi bir küçük yer değişimi zamanla üstel olarak büyüyecektir (en azından yakınsağın büyük ölçüde katlanma hareketi hakim olana kadar). Pozitif Lyapunov üstelinin olması, ilk şartlara hassas bağlı olma durumuna işaret eder ve büyüklüğü de ilk şartların belirsizliğinin tahmin yapmayı ne kadar çabuk imkansız kılacağını bir ölçüsünü sağlar. Bir sistemin en büyük Lyapunov üstelinin ölçümü, kaosun ve onun büyüklüğünü nicel hale getirmenin bir yolunun varolma işaretini destekler.

Lyapunov üstelinin ölçümü, dinamik sistem yörüngelerinin bir yakınsağa bağlı olmadığı zamanlarda bile kullanılabilir. Bir yörünge standart olarak seçilir ve küçük yer değişimlerinin daraltması ya da büyüklüğü ölçülür. Garip yakınsak, sadece kaotik dağılma eğilimindeki sistemlerde görülür. Hamiltonian sistemleri için, enerjinin depo edildiği yerde bir yakınsak üzerinde bir yakınsama yoktur. Bunun yerine yörüngeler sabit bir enerji yüzeyiyle sınırlandırılmıştır. Kaotik davranış bu tip sistemlerde görülebilir, fakat garip yakınsak yerine fraktal boyutla yörüngeler, mücade edilen enerji yüzeyini dolduracaktır.

### 3.1.3 Kaos Durumuna Geçiş

Tutucu sistemlerde tüm dikkatler, sistemin normal davranıştan kaosa nasıl bir yol izleyerek geçtiği üzerinde toplanmıştır. Kompleks ve tahmin edilemeyen davranışlar için alternatif bir model teşkil eden 'garip yakınsaklar', karışıklığın başlangıcı konusuna yeni bir yaklaşımdır. Kaos durumuna geçiş modelinde başka bir basit dinamik sistem olan 'lojistik harita' kullanılır.

Bu modelde 'lojistik harita'  $\alpha$ 'nın bir parametre olduğu

$$x_{n+1} = \alpha \cdot x_n (1 - x_n) \quad (3.4)$$

değişim denklemi şeklini almıştır. Bu eşitliğin devamlı uygulanması sonucunda örneğin bir böcek popülasyonu için seçtiğimiz  $\alpha$  değerine bağlı olarak hayli farklı davranan yıllık  $x$  değerlerine ulaşabiliriz.

$\alpha$ 'nın bazı değerleri için, dinamik sistem kararlı duruma ulaşır. Böcek popülasyonu örneği için, ilk popülasyon ne olursa olsun bir sonraki yıldaki böcek popülasyonu kesin olarak kendini yineler.  $\alpha$  artarken devam eden  $x$  değerlerinin iki yıllık bir çevrime girdiği görülür. Çok sayıdaki böcek popülasyonu, bir sonraki yıl küçük bir nesil oluşturur ve sonraki yıl tekrar ilk değere erişir.  $\alpha$ 'yı daha da artırdıkça 2 yıllık bu periyot 4, 8, 16, 32 diye devam eder. Son olarak  $\alpha$  öyle bir büyüklüğe gelir ki bu noktadan sonra 'dinamik sistem' olan böcek popülasyonu, aperiyojik ve gerçekten kaotik bir davranışa geçer. Bu noktadan sonra ilk popülasyon nüfusunun kaç olduğu önemsizdir. Formülden takip eden numaraların sırası da artık tekrarlamaz.

Nonlineer dinamik sistemlerin çok basit bu deneyi, periyodu iki kata çıkaran davranış başta olmak üzere pek çok zengin davranış çeşidini göz önüne serer. Bazı durumlarda tek değişkenli diferansiyel denklemle ifade edilebilen böyle basit bir sistem, bütün Kaos Teorisi'nin bir paradigması haline gelmiştir.

Herhangi bir devamlı diferansiyel fonksiyon için  $0$ ' la  $1$  arasında bir ekstremum noktası vardır. Bu gibi bir fonksiyon, ekstremum yakınlarında ana hatlarıyla şekil olarak 2. derecedendir. Periyodu iki katına çıkaran davranış gözlenir ve lojistik harita gibi aynı sabitlerle aynı değerleri gösterir.

Bu sonuç, bir sistemin periyodu iki katına çıkarma davranışı hakkında incelenip bulunan kesin nitel durumlar kadar yakın nicel tahminler yapılmasını sağlar. Örneğin bir sistemi yöneten açık denklemi bilmeksizin bile, bir sonraki çatallaşmanın değişken parametrenin hangi değerinde olacağı ya da kaosa geçiş eşiğinin ne zaman aşılacağı söylenebilir. Bu durumda bir sistemde 'periyodu iki katına çıkaran davranış' gözlenebildiğine göre, daha güçlü matematiksel modellerle sistemin kaosa nasıl geçtiğini anlamak mümkün olabilecektir.

Lojistik haritada tam kaos, yaklaşık olarak  $\alpha=3.57$  değerinde görülmekte ve  $\alpha=4$  değeri için de kaotik davranış, ilk başlangıç şartlarına en büyük hassasiyette bağlılık göstermektedir. Burada bile dinamik sistemler tarafından üretilen serideki her numara katı bir kurala uyarak kendinden öncekini takip etmektedir.  $\alpha=4$  iken ilk başlangıç şartlarındaki bir belirtmeden

itibaren kesinlik sınırlı ölçüde olacaktır. Belli bir zamandan sonra ise artakalan kesinsizlik, ilk şartlara dair tüm taşınan bilgiyi yok edecek kadar büyük olacaktır. Böyle bir durumda değişim denklemleri tarafından üretilen sayı dizileri, artık ilk şartlardan bağıntısını koparmış olacaktır. Artık tüm tahmin edilebilirlik sıfırdır ve 'dinamik sistem rastgele davranıyor' diye nitelenebilir.

Kaosa ileten bu 'periyodu iki katına çıkaran davranış' dışında bazı teorik ilgili konuları içeren iki senaryo daha vardır: Yarı periyodiklik ve aralıklılık. Yarı periyodiklik RTN modelinde tanımlanan yoldur. Aralıklılık ise, periyodik bir sinyal, tahmin edilemeyen fakat artan bir parametre olarak gittikçe sıklaşan bir şekilde rastgele patlamalarla kesildiğinde meydana gelir.

Şu hatırlatılmalıdır ki Kaos Teoremi, nitel olarak sistemi anlamaya bu üç yolu göz önünde bulundurarak nicel tahminler yapmaya olanak sağlarken henüz hiçkimse verilen bir sistemde bu üç tür geçiş için gerekli ya da yeterli şartları belirleyememiştir. Fakat bir sistem kaosa geçişin emarelerini gösteriyorsa, bu genel tipe uygun olan matematiksel model uygulanabilir.

### 3.1.4 Deneysel Sistemlerde Kaosun Bulunması

Fiziksel sistemin davranışını yöneten denklemler bilinmediği zaman, garip yakınsakları ayırt etmeye ve Lyapunov bileşenlerini bulmaya yarayan birkaç deneysel teknik, araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir.

Genelde, muhtemel bir kaotik sistemin deneysel çalışmasında ilk adım, sistemin bir değişkeninin ayrıntılı bir değişim kaydını elde etmektir. Bu değişime göre davranışın periyodik, aralıklı ya da düzensiz olduğu açıkça görülebilir. Zamana göre değişimin gözlenmesi esasına dayanan tekniklerden biri, Fourier güç spektrumudur. Bu spektrum, bilgi akışında her periyodik bileşenin frekansında keskin bir tepe gösterir. Böylece kararlı bir limit çevrimi izleyen bir sistem için spektrum, kaotik rejimler geniş bir bant üretip yarı periyodik davranış birkaç tepe noktası ve bunların harmoniklerini gösterirken güçlü bir tepe noktasına sahip olacaktır. Yüksek sayıda mevcut frekanslı yarı periyodik bir rejim, geniş bantlı bir güç spektrumuna sahip olacak gibi görünmekle birlikte bu metot, kesin bir kaosu irdeleyecek kadar güvenli değildir. Fakat örneğin periyodu iki kata çıkarma sırasında yarıya inmiş frekansların peşpeşe ortaya çıkışını göstermekte faydalı olabilir.

Dağılan sistemlerde kaosu analiz etmek ve keşfetmek için en önemli metotlardan biri, sistem davranışının geometrik taraflarını zamana göre değişim kayıtlarından elde eden bir prosedür, yakınsakların tekrar kurulmasıdır. Bu metot fizikçi N. Packard, J. Crutchfield, J. Farmer ve R. Shaw tarafından birlikte geliştirilmiştir (Kellert, 1993). Bir sistemi yöneten denklemlerin çözülmesine (hatta bilinmesine) bile gerek kalmadan nitel kısımların incelenmesine olanak verir. Temel fikir zamanla değişimden çok boyutlu bir yakınsak oluşturmaktır. Örneğin  $\gamma$ 'nın uygun bir zaman gecikmesi olduğu  $x(t)$ ,  $x(t+\gamma)$  ve  $x(t+2\gamma)$ ' yi ele alırsak, aynı değişkenin üç ölçüsü, üç boyutlu bir durum için sistem durumunu açıkça belirten üç bağımsız değişken olarak iş görür. Sistemin herhangi bir tek bileşenin değişimi, onunla etkileşime giren bir diğeri tarafından tayin edilir. Böylece ilgili bileşenler hakkındaki bilgi, herhangi bir bileşenin geçmişinde dolaylı yoldan taşınır.

Yakınsakların yeniden oluşturulması, tek boyutlu zaman-değişim kaydı dışında gerçek gibi bir durum uzayı yaratır. Çünkü garip yakınsakların en önemli özelliği topolojik olmalarıdır. Neredeyse tüm koordinat sistemleri, bu özellikleri ayırt etmeye alışık olabilir. Bu durumda bu metod, sistemin dinamik davranışlarına rehberlik etmede genellikle güvenlidir. Sayısal gerçekleştirmeler  $x(t)$ ,  $x(t+\gamma)$  ve  $x(t+2\gamma)$ 'den üç boyutlu bir yakınsak oluşturmanın orjinal  $x$ ,  $y$ ,  $z$  uzayının dinamiklerine uyan, oluşturulmuş yeni bir durum uzayını sağladığını onaylamaktadır.

Sistem dinamiklerinin bir görünüşünün oluşturulması geçerli olduktan sonra fraktal boyut, topolojik boyutun artan ölçü alanlarıyla yakınsaktaki noktaların yoğunluk analizlerini de içeren Hausdorff-Besicovitch tanımlarından çıkarılmış çeşitli tekniklerle hesaplanabilir. Yakınsakların boyutunun hesaplanması için geliştirilen daha etkili yollar, yeni keşfedilenler ve hatta topolojik kısımları için daha bilgi verici nicel ölçüler, Kaos Teorisi üzerinde çalışan geniş miktarda araştırmacının ilgisini çekmiştir.

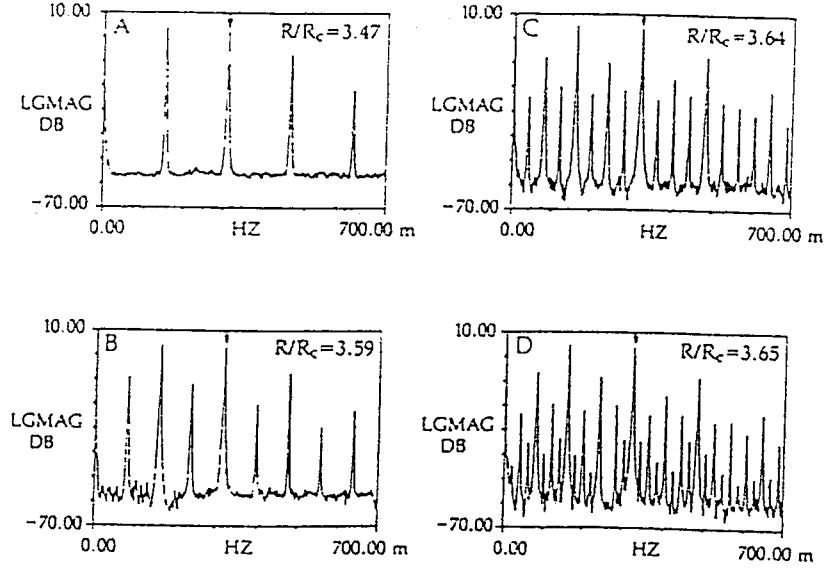
Yeniden oluşturulan yakınsaklarla çalışmanın bir diğeri kullanışlı yanı, daha çok kısıtlamalarla olmakla birlikte Poincare 'Bölüm Yüzeyi' metodudur. Bu yöntem, sistemin oluşturulmuş yörüngelerini durum uzayı üzerinde bir hatta ilerlerken incelemekten ibarettir. 'Bölüm yüzeyi' yöntemi yakınsağı kesen ince bir ekranda, sadece yörüngelerin ekranda kesiştiği yerlerde parlayan noktaların modeline dikkat sarfetmemizi mümkün kılar. İki boyutlu görüntü, incelemek için daha kolay olmasından ötürü bu 'bölüm yüzeyleri' yöntemi kaosa yol açan periyodun iki kata çıkması olayındaki izlerin karakterinin ya da kaotik bir sisteme işaret eden karmaşık yapının aranmasında kullanılır.

Eğer sistem hayli dağınıksa, bu yöntem hayli ince bir düz parça şeklinde görülür. Bu durumda, sistem kaotik ya da sırf stokastik olsa bile keşfetmek için başka bir analitik sistem kullanılır. Eğer böyle bir sistem stokastik ise (az sayıda deterministik denklemlerle yönetilmiyorsa) yörüngelerin düzlemde ince segment boyunca geçtiği her zaman rastlantısal olduğu düşünülebilir. Bu durumda bir sonraki geçiş pozisyonuna karşı segment boyunca pozisyonu noktalarla işaretlenir ve bu tekrarlanır. Eğer yörünge pozisyonu yakınsak çevresinde tamamen rastgeleylese böyle bir noktada rastgele dağılma umulabilir. İyi belirlenmiş bir eğri boyunca oturmuş böyle bir yerdeki noktalar gerçeği, irregular davranışın deterministik bir kaos olduğunu gösterir.

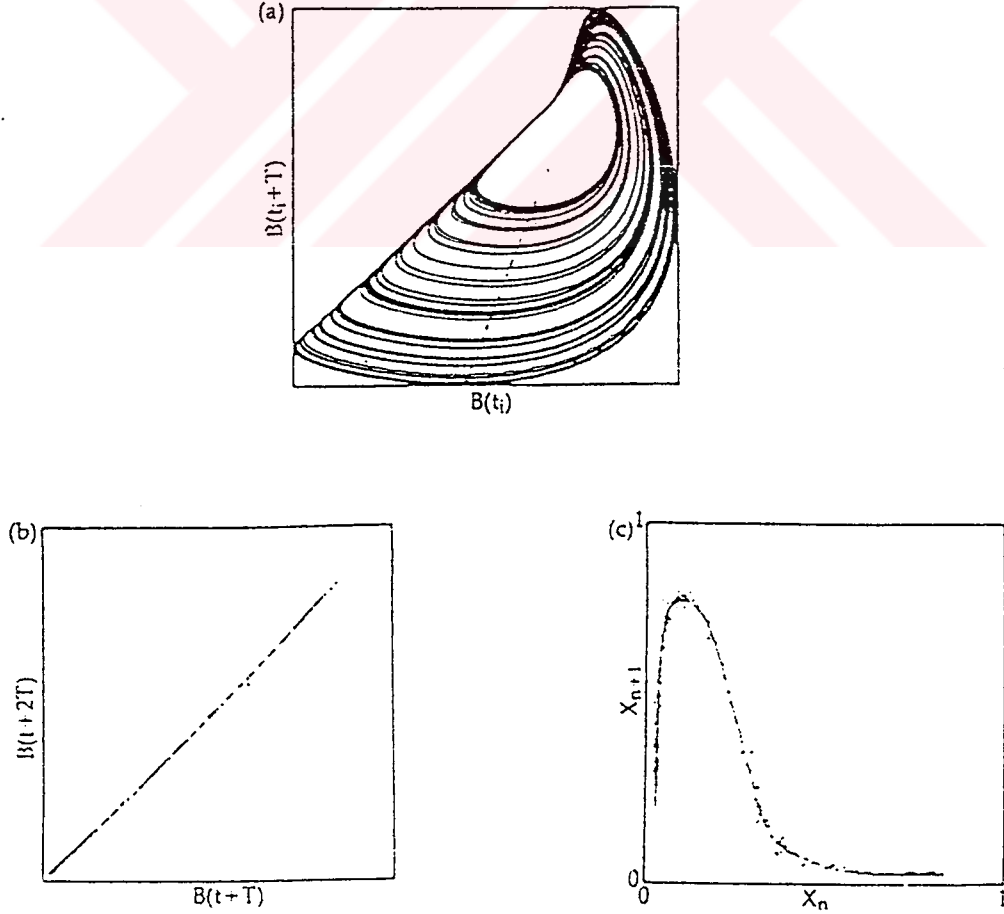
'İlk dönüş haritası' olarak bilinen yöntemi üreten bu yöntem, sistemin iterasyon edilmiş tek boyutlu haritalama analiz çalışmalarını hayli azaltmıştır. İlk dönüş haritası 2. derece bir ekstremuma sahipse, örneğin tüm periyodu iki kata artırma analizi uygulanabilir. Bundan başka ilk dönüş haritası, Lyapunov üstelinin bir ölçüsünü sağlayabilir. Haritadaki noktalar bir eğri şekline uyarak ve eğriden ortalama taşarak ilk koşullara bağımlılık derecesinin yaklaşık bir değeri elde edilebilir.

Şekil 3.5 ve 3.6, fiziksel sistemlerden elde edilen datanın analizi için deneysel tekniklerin birkaçını göstermektedir. Şekil 3.5'te Rayleigh-Benard akışına maruz kalan akışkan hücredeki anlık hız ölçümlerinin Fourier güç spektrası görülmektedir.  $R/R_c$  parametresiyle gösterilen ısı eğimi artarken, hücredeki periyodu iki kat artış gösteren akışkan akışına maruz kalır. Güç spektrumundaki gitgide sivrilen uçların ortaya çıkışı  $f/2$ ,  $f/4$ ,  $f/8$  gibi frekanslı sinyallerin başladığını kanıtlar.

Şekil 3.6 ise kararsız bir kimyasal reaksiyondaki iyon konsantrasyonlarının ölçümüyle elde edilerek zamana göre değişen bilgilerden oluşturulmuş bir yakınsağı göstermektedir. Yakınsağın düz bir çizgi şeklinde gözüken 'bölüm yüzeyi' görünümü ve bir ekstremum noktası içeren 'ilk dönüş haritası' da iki boyutlu izdüşümleri olarak görülmektedir.



Şekil 3.5 Akışkan akışında periyodun iki kata çıkması.



Şekil 3.6 Kimyasal bir sistemde kaos. (a) Sistem için yeniden oluşturulmuş bir yakınsak. (b) a'daki çizgili hat boyunca Poincare 'bölüm yüzeyi'. (c) Bir ilk dönüş haritası.

Kaosa giden üç yol, başlangıç şartlarına hassas bağımlılık, itina ile daralmış fraktal yapıyla 'garip yakınsaklar' ve Kaos Teorisi'nin diğer elementleri çeşitli deneysel sistemlerde rapor edilmiştir. Bu sistemler, beyin dalgaları ölçümlerinden kızamık salgınlarının yıllık görülme değişimlerine, kristallerin elektriksel iletkenlik kararsızlıklarına kadar çeşitlilik gösterir. Laboratuvar dışı düşük boyutlu bazı kaos örnekleri, halen tartışma konusu iken kaotik davranışın bu örneklerinden bazıları laboratuvar şartlarında ikna edecek biçimde belgelenmiştir. Fakat teori ve pratiğin karşılıklı etkileşimi, bilgisayar simülasyonlarının da yardımıyla model ve tekniklerin genişlemesini devam ettirmiştir. Tüm bunların sonucunda 'kaos' gerçekten bilimsel araştırmalarda çok geniş bir çeşitlilikte kullanışlı bir terim olarak ortaya çıkar.



#### 4. GERİLİM KARARLILIĞI

Bilindiği gibi bir elektrik güç şebekesi pek çok farklı bileşenden meydana gelmektedir. Bunlar üretim, iletim ve dağıtım şeklinde ayrı sınıflarda kategorize edilebilirler. Çok büyük boyutlarda olması sebebiyle bütün bir güç sistemini analiz etmek gelişmiş bilgisayarlarla bile mümkün değildir. Bu sebeplerle enerji sistemleri analiz edilirken bazıları daha ayrıntılı, bazıları daha yüzeysel şekillerde modellenmiş alt bileşenler şekline getirilir. Elbetteki sistemi tasvir eden model, analiz edilen problemi ortaya koyacak şekilde olmalıdır.

İşte böyle bir enerji güç sisteminde gerilim, her zaman için enerji güç sistemlerinin tamamlayıcı bir parçası ve sistem kararlılığı ile güvenliğinin önemli bir bileşeni olarak görülmüştür. Böylece gerilim kararsızlığı ve çökmesi genel sistem kararlılığı probleminden ayrı tutulamaz. En genel tanıma göre kararlılık bozucu bir etkiye maruz kalan sistemin bozucu etki sonrası tekrar bozucu etki öncesi çalışma şartlarına dönme yeteneğidir. Bir güç sistemi ancak sisteme ait mekaniksel giriş ve elektriksel çıkış enerjileri arasında sürekli bir uyum bulunması halinde kararlı çalışabilir. Enerji güç sistemlerinde kararlılığın genel sınıflandırılması Tablo 4.1’de görüldüğü gibidir.

Zaman Birimi	Generatöre Göre	Yüke Göre
Kısa dönem	Rotor Açısı Kararlılığı A)Geçici B)Sürekli Hal	Geçici Gerilim Kararlılığı
Uzun dönem	Frekans Kararlılığı	Uzun Dönem Gerilim Kararlılığı

**Tablo 4.1 Güç sistem kararlılığı sınıflandırması.**

Daha fazla ayrıntıya girmeden önce sıkça kullanılacak konuyla ilgili bazı terimler şu şekilde tanımlanabilir:

**Kararsızlık:** Maksimum iletilebilir güç sınırının geçilmesi. Yük gücünün mekanizması kararsız hale geçer ve güç isteğinde olan sistem, mevcut yükü de kaldıramaz hale gelir. Bu davranış gerilim kararsızlığı sorununun da temelini oluşturmaktadır.

**Dinamikler:** Sistem dinamikleri ile ilgili herhangi bir kararlılık problemi. Bu dinamikler diferansiyel denklemler ya da 'fark' denklemleri ile ifade edilebilirler.

**Yükler:** Gerilim kararsızlığı olayını yöneten ana etkenlerdir. Bu yüzden gerilim kararsızlığı 'yük kararsızlığı' olarak da adlandırılır. Fakat şu eklenmelidir ki gerilim kararsızlığı olayında başka etkileyici faktörler de mevcuttur.

**İletim:** Sınırlı bir güç transfer yeteneği olan sistemlerdir. Bu sınır (aynı zamanda üretim sistemi tarafından da etkilenir) gerilim kararsızlığının başlangıç sınırlarını da belirtir.

**Üretim:** İdeal gerilim kaynağı olmayan generatörler sayesinde güç sisteminin enerjisini üreten sistemlerdir. Kontrollerini içerir şekilde kesin modellenmeleri, gerilim kararlılığının doğru şekilde değerlendirilmesi için önemlidir.

#### 4.1 Gerilim Kararlılığı, Gerilim Çökmesi ve Gerilim Güvenilirliği

Gerilim kararlılığı uygulamada geniş bir alan boyunca çeşitli işlemlerle ilgili olan bir konudur. İndüksiyon motorlarının yük olduğu şebekeler, yüksek gerilim doğru akım hatları, transformatörlerde kademe değişimi bunlara bazı örneklerdir.

Bir dağıtım şebekesi, iletim ağına, gerilimdeki bir değişimin dağıtım şebekesi içinde karmaşık dinamik etkileşimlere sebep olabileceği şebeke besleme noktasında bağlıdır. Gerilimdeki bu değişim:

- 1) Transformatörlerin kademe değiştirmesi sebebiyle gerçekleşen gerilim kontrol hareketleri,
- 2) Reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili kontrol hareketleri,
- 3) İndüksiyon motoru gibi yükler nedeniyle güç isteğinde meydana gelen değişimler,
- 4) Aşırı akım ya da düşük gerilim röleleri ve elektromekanik kontaktörler gibi koruma elemanlarının manevraları,
- 5) Besleme gerilimi yeniden elde edilirken deşarj lambalarının ateşlenmesi, indüksiyon motorlarının kendiliğinden start olması gibi olaylar

sebebiyle gerçekleşir.

Gerilim kararlılığına karşı olarak, kontrol edilmeyen generatör rotor salınımları sebebiyle senkronizasyon kaybı problemi, 'Rotor Açısı Kararlılığı' olarak adlandırılır. Senkronizmanın kaybı gerilim kararlılığı ile de ilgili olabilir. Bu ihtimale karşın gerilim kararsızlığı, gerilimi çökmüşe götürecektir şekilde azalan kontrolsüz gerilim düşmesi anlamındadır. Buna neden olacak öncül sebep, bir bozucu etki ardından yük ile ilgili dinamiklerdir.

Gerilim kararsızlığı araştırmalarının geleneksel metotları, güç akış modelleri kullanarak statik analizlere dayanır. Gerilim kararsızlığı için temel tanımlama ve testler buna uygun olarak yapılmıştır. Bununla birlikte bu tür analizler gerilim kararlılığı sınırını gösteren -ya da göstermeyen- güç limitlerini de ortaya koyar. Gerilim kararsızlığı, yük tarafından idare edilen bir olaydır. Bu nedenle bir gerilim kararsızlığı analizinde uygun yük dinamiklerini içeren bir dinamik sistem formülasyonunun kullanılması zorunludur. Basit olarak kararlılık koşulları şu şekilde belirtilebilir: Çalışma anı zorunluluklarını karşılayan bir dengenin yani uygulanabilen bir güç akışı çözümünün var olduğu kabul edilerek; denge durumu, eğer sistemin tüm değerleri çalışma noktası çevresinde negatif gerçek kısımlara sahipse sürekli hal durumundadır. Büyük bozucu etki kararlılığı ise, eğer bozucu etki sonundaki sistem durumu, bozucu etki sonrası sistemin kararlı denge noktasının çekim bölgesi içindeyse temin edilir.

Gerilim kararsızlığı ve gerilim çökmesi birbirleriyle ilişkili olduğundan bir arada adı sık geçen terimlerdir. Gerilim kararsızlığı ve gerilim çökmesi statik analizlere (güç akışı) uygun bir kararlı hal problemi olarak pek çok kez gözlenmiştir. Kararlı hal durumunda üretim kaynaklarından tüketim merkezlerine reaktif güç iletimi yeteneği gerilim kararlılığının temel bir kısmıdır.

Gerilim kararsızlığı ya da çökmesinin direkt iletilen maksimum güç sınırı ile ilişkilendirilmesi de yanlıştır. Gerilim kararsızlığı ya da çökmesi dinamik bir işlemdir. Yine dinamik bir sistem olan enerji sisteminde böyle olayların olması olasıdır. Gerilim kararlılığında rotor açısı kararlılığının aksine dinamikler yüklerle temel olarak bağlantılıdır ve gerilim kontrolü ile ilgilidir. Zaten gerilim kararlılığı yerine 'yük kararlılığı' terimi de kullanılır.

Konuya ayrıntılı olarak girmeden önce aşağıdaki tanımlar yapılabilir:

1) Çalışma konumu belirli bir enerji sistemi, küçük bir bozucu etkiyi takiben yük yakınındaki gerilimi bozucu etki öncesindekiyle aynı ya da ona yakın ise 'küçük bozucu etki gerilimi kararlı' olarak adlandırılır.

2) Çalışma konumu belirli bir enerji sistemi, belirli bir bozucu etkiye göre yük yakınındaki gerilimi bozucu etki sonrası denge değerlerine yaklaşıyorsa `gerilim kararlı` olarak adlandırılır. Bozucu etkinin hakim olduğu durum, etki sonrasındaki kararlı dengenin çekim bölgesi içindedir.

3) Çalışma konumu belirli bir enerji sistemi, bir bozucu etki ardından denge gerilimleri kabul edilebilir sınırların altında ise `gerilim çökmesi`ne maruz kalıyor olarak nitelendirilir. Gerilim çökmesi kısmi ya da tümüyle olabilir.

Gerilim kararsızlığı, gerilim kararlılığının olmadığı durumdur ve ilerleyen bir gerilim düşmesiyle (ya da artması) sonuçlanır. Bununla birlikte örneğin yük atımı gibi bazı kontrol hareketleri, global kararlılığı kurabilir.

Gerilim kararlılığı, normalde hızlı yük ya da güç transferi artışlarını içeren büyük bozucu etki etkileriyle ilgilidir. Bununla birlikte kararsızlığı ise neredeyse her zaman gerilimdeki monoton bir azalma ile kendini belli eder.

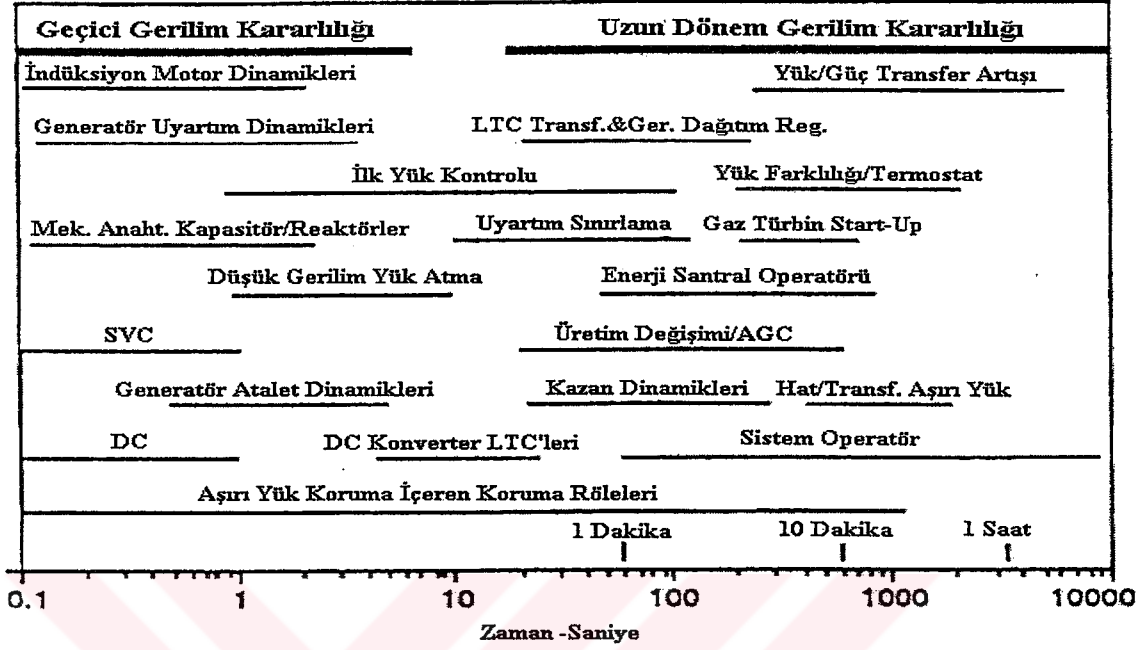
`Gerilim güvenilirliği` terimi sistemin sadece kararlı bir şekilde işlemlerini değil, buna ek bir kabiliyetini de ifade eder. Bu kabiliyet olası ihtimallere ya da yük artışlarına karşı kararlı durumda kalabilme yeteneğidir.

Gerilim kararlılığı, dinamiklerle ilgili olmasına karşın, güç akışı temelli statik analiz metotları ve yaklaşık analizler için hayli kullanışlıdır.

#### 4.2 Gerilim Kararsızlığı ve İşleyiş Biçimi için Zaman Aralıkları

Gerilim kararsızlıkları ve çökme dinamiklerinin meydana gelme zamanı bir saniye ile bir saat arasındaki çeşitli süreler içinde değişir. Bu dinamik davranışlar ve meydana gelme süreleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil pek çok güç sistem bileşeni ve kontrollerinin gerilim kararlılığında rol oynadığını göstermektedir. Bununla birlikte bir olay ya da senaryoda bunlardan sadece biri belirleyici şekilde etkili olacaktır. Sistem karakteristikleri ve bozucu etki, hangi olayın önemli olduğunu belirler (Taylor, 1993).

Şekil 4.1'de ayrıca gerilim kararlılığı, geçici ve uzun dönem zaman birimleriyle sınıflandırılmaktadır. Bu iki ayrı zaman periyotları birbirinden neredeyse tamamen ayrıdır.



Şekil 4.1 Gerilim kararlılığı olayları ve tepki süreleri.

#### 4.2.1 Gerilim Kararsızlığı İşleyiş Biçimleri ve Senaryolar

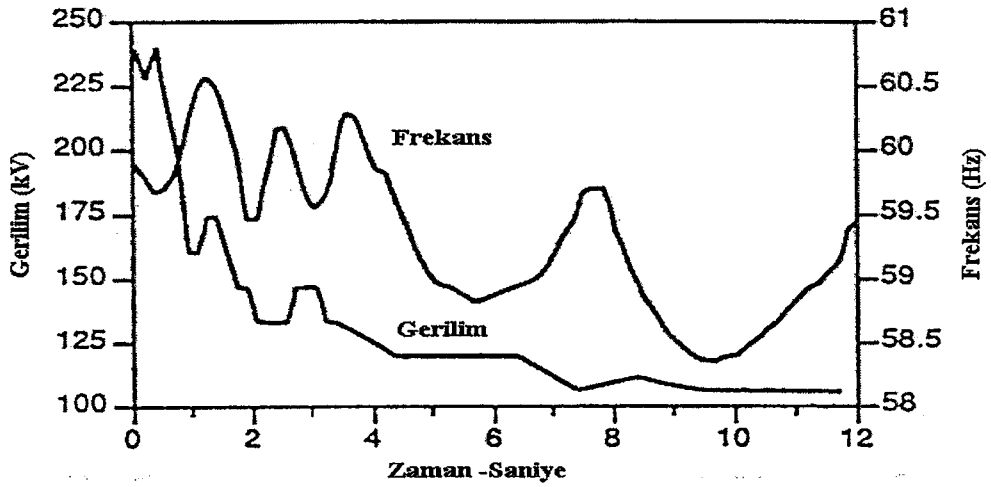
Gerilim kararlılığını geçici ve uzun dönem olarak iki zaman diliminde sınıflandırdıktan sonra şimdi bu zaman dilimlerinde meydana gelebilecek olaylar incelenecektir. İlk olarak geçici gerilim kararlılığı ele alınırsa:

**1. Geçici Gerilim Kararlılığı:** 0-10 saniye arasındaki süre, aynı zamanda geçici rotor açısı kararlılığı olaylarının da dahil olduğu zaman aralığıdır. Bu aralıkta gerilim kararsızlığı ile rotor açısı kararsızlığının ayrımı hayli zordur ve iki olayın da belirtileri varolabilir. Senkronizma kaybının mı gerilim çökmesinden meydana geldiği, gerilim çökmesinin mi senkronizma kaybindan dolayı gerçekleştiği bu durumu ortaya koymaktadır. İndüksiyon motorları ve dc konverterler gibi sorun çıkarıcı yük bileşenleri gerilim çökmesinin nedeni olabilir.

Ciddi gerilim düşmeleri için indüksiyon motorlarının reaktif güç isteği herhangi bir koruma sisteminin olmaması halinde gerilim çökmesine neden olacak şekilde artar. Bu durumun 'indüksiyon motor kararsızlığı' olarak literatürde yeri de vardır. Bu hataları takiben motorlar da zorlanarak yeniden hızlanırlar. Zaten stop etmeye meyilli motorlar da yakındaki diğer motorların durmasına neden olabilir. Kompanzasyon civarında şönt kapasitörün karakteristiği de reaktif gücün gerilimin karesiyle orantılı olmasından dolayı probleme dahil olabilir.

Gerilim çökmeleri frekans kaybından daha hızlıdır. Gerilim kaybı frekans kaybını yavaşlatarak ve düşük frekanslı yük atımını geciktirerek gerilime bağlı yükleri etkiler. Ayrıca düşük frekanslı bu gecikmeler, düşük gerilim nedeniyle işlemeyebilir. Düşük gerilimdeki yüklerin atımı da gerekli olabilir. Şekil 4.2' de Florida'da meydana gelen gerçek bir örnekte frekansın yük atma sınırlarına erişmeden önce gerilimin çöktüğü görülmektedir. Bu olayda güç santralının yardımcı motorlarını içeren indüksiyon motor yüklerinin önemli rol oynadığı açıktır.

Son yıllarda yüksek gerilimle DC güç hatlarının gelişmesiyle birlikte, bu alanda da geçici gerilim kararlılığı problemleri görülmüştür. Örnek olarak da Los Angeles'taki iki büyük inverter istasyonunun etkisiyle Güney Kaliforniya'da gerilim çökmesi eğilimleri meydana gelmiştir. Bazı durumlarda gerilimi desteklemek için dc gücü (böylelikle konverter reaktif güç isteğini) azaltmak gereklidir.



Şekil 4.2 17 Mayıs 1985' teki Güney Florida gerilim çökmesi için gerilim ve frekans değişimi.

**2. Uzun Dönem Gerilim Kararlılığı:** Genel olarak 2-3 dakika gibi birkaç dakikalık zaman dilimini içeren gerilim kararlılığıdır. Orta dönem kararlılığı ya da geçici dönem sonrası kararlılık gibi terimlerle de adlandırılır.

Bu tarz gerilim kararlılığı senaryosunda uzaktaki üretim kaynağından transfer edilen büyük güçler, beslenen büyük güçlü yükler ve ani ve büyük bir bozucu etki söz konusudur. Sistem gerilime duyarlı yükler sebebiyle geçici olarak kararlıdır. Bozucu etki (yük bölgesindeki bir generatörün kaybı ya da temel bir iletim hattının kaybı gibi) yük bölgelerinde gerilim düşmelerine ve büyük reaktif güç kayıplarına neden olur. Enerji dağıtımındaki LTC (load tap changing) transformatörlerin kademe değiştiricileri ve dağıtım gerilim regülatörleri bu düşük gerilimlere karşı hassasiyet gösterir ve dağıtım gerilimlerini –dolayısıyla da yüklerin güç seviyelerini- takviye edip düzeltecek şekilde davranırlar.

Yüklerin bu şekilde restorasyonu, iletim gerilimlerinde yeni bir takım düşmelere neden olur. Yakın generatörler aşırı yüklenmiş ve aşırı uyarıtıma uğramışlardır. Fakat aşırı uyarıtım sınırlayıcıları (ya da operatörler) aşırı yükte kalabilme zamanları (2-3 dakika) dolarken uyarıtım akımlarını normal değerlerine çekerler. Bu durumda reaktif gücü daha uzaktaki generatörler sağlamalıdır. Tüm bu çabalara rağmen enerji sistemi (üretim ve iletim) yükleri daha fazla besleyemez ve reaktif kayıpları karşılayamaz. Sonuçta da hızlı bir gerilim düşmesi görülür. Bunu takiben kısmi ya da tümüyle gerilim çökmesi meydana gelir. Son aşamalarda ise indüksiyon motorları stop edebilir ve koruma röleleri operasyonları işe dahil olabilir. Yükün çeşidine bağlı olarak çökme kısmi ya da tümünden görülebilir.

**3. Uzun Dönem Gerilim Kararsızlığı:** Bu tip bir senaryoda kararsızlık, halen uzun bir zaman periyodundadır ve çok büyük bir yük artımı (örneğin sabah ya da öğlen devreye giren yükler) ya da hızlı bir güç transferi artışı tarafından yönlendirilir. MW/dk birimindeki yük artışı hayli hızlı olabilir. Kararsızlığı önlemek için reaktif güç ayarı ya da yük atımı gibi operatör işlemlerine de gerek duyulabilir. İletim hatlarının aşırı yüke dayanabilme zamanı (onlarca dk.) ve düşük gerilim sebebiyle yük çeşitliliğinin kaybı gibi faktörler etkili ve önemli olabilir. Kararsızlığın son aşamalarında 1 ve 2. senaryodaki gibi hızlı sistem bileşenlerinin manevraları gerçekleşir (koruma röleleri vs.).

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi pek çok zaman diliminde pek çok sistem bileşeninin karşılıklı etkileşimi söz konusudur. Örneğin gerilim kademe değiştiricisinin regülasyonu sabit enerji

yüklerinin termostatik regülasyonu ile yük çeşitliliğinin kaybını önler. Başka bir örnek de aşırı uyartım sınırlayıcı işlemin normal generatör gerilim regülasyonunu önlemesidir.

#### 4.2.2 Motor Yükleri ve Gerilim Kararlılığı

Motor yükleri gerilim kararlılığı analizlerinde özel bir öneme sahiptir. Bu yüklerin cevap verme hızı, gerilim kontrol ekipmanlarının cevap hızlarıyla karşılaştırılabilir. Buna ek olarak bu tarz yüklerin kararsızlıkları sınırlama şartları haline de gelebilir.

Motorlar eriştiklerinde stop etmeye başlayacakları bir limit değerine erişene dek az ya da çok sabit güç çekme eğilimindedirler. İndüksiyon motorları, nispeten daha yüksek bir gerilim seviyesinde yani gerilim kararsızlığının normal olarak gerçekleşmeyeceği gerilim seviyelerinde duruşa geçebilir. Senkron bir motorun stop edeceği gerilim uyartım seviyesine bağlı olabilir.

Motorların, özellikle de indüksiyon motorlarının kararsızlığı genellikle gerilim kararsızlığı olarak algılanır. Gerçekte ise motor kararsızlığı, gerilim kararsızlığından farklıdır. Örneğin sabit bir gerilim kaynağının bir iletim hattı üzerinden bir indüksiyon motorunu beslediği bir sistemi ele alırsak, motor kararlılık sınırının (motor tarafından erişilen maksimum tork) sistemin maksimum güç iletim kapasitesi tarafından belirtildiği gibi, gerilim kararlılık sınırından daha önce erişileceği gösterilebilir (Pal, 1992).

Belirli bir sistem gerilimi için, indüksiyon motorunun erişebileceği bir maksimum tork değeri mevcuttur. Eğer yük torku bunu geçerse, hem yükteki artış hem de düşük sistem gerilimi nedeniyle motor duruşa geçebilir ve sistem gerilimini azaltabilir. Bu da sistemin başka yerlerindeki motorları da duruşa iletebilir ve yayılan bir sistem çöküşü meydana gelebilir. Senkron motorlar için, diğer sabit MVA karakteristikli yüklerin kaynak ve motor baraları arasında bir noktada bağlantısı olmaksızın sert bir duyarlılıkta gerilim kararsızlığı olmayacağı açıktır. Belirli bir sistem gerilimi ve motor uyartımı için motorun edinebileceği tek bir maksimum tork değeri vardır. Bu değerini ötesinde motor senkronizma kaybeder ve duruşa geçmeye başlar, motor terminal gerilimi gerilim kararsızlığı gibi gözükken bir davranışla çökebilir.

Motor kararsızlığı sorununun tam olarak anlaşılması, tork-kayma eğrilerinin (indüksiyon motorları için) ya da güç-açı eğrilerinin (senkron motorlar için) kullanımı ve iki baralı basit bir sistem göz önüne alınarak sağlanabilir. Bunun sonucunda indüksiyon motorları için küçük ve büyük bozucu etki kararsızlıklarının ikisinin de bozucu etki sonrası sistemde kararlı denge durumunun varlığı tarafından az ya da çok sağlandığı gösterilebilir. Senkron motorlar için ise bilinen eşit alan kriteri büyük bozucu etkiler için uygulanabilir. Küçük bozucu etki kararlılığı motorun uyartım kontrol tipi tarafından da etkilenebilir.

Sistem yükü ağırlıklı olarak motor yüklerinden oluştuğunda, büyük ve küçük bozucu etkileri içeren ayrıntılı dinamik analizler gerekli olabilir. Bu durum, muhtemelen kendi gücünü üreten ve neredeyse sadece motor yüklerini besleyen büyük endüstriyel güç sistemlerinde uygulanır. Ayrıntılı generatör modellemeye ilave olarak analizler motorların rotor dinamikleri ve mekanik ataletlerini içeren ayrıntılı modellemeler de gerektirebilir.

#### **4.3 Mekanizmalar- Yük dinamikleri, Denge Noktaları ve Çekim Bölgesi**

Bozucu etkiyi takip eden kısa bir periyot içinde pek çok yük, statik yük gibi davranır (örneğin sabit empedans gibi ya da en kötüsü sabit akım yükü gibi). Yük dinamikleri sistem cevabı üzerinde bir etki kazanmaya başladığında bozucu etki sürekli hal durumuna erişebilir. Senkronizasyonun kaybolmadığı bir durumda da gerilim kararsızlığı oluşabilir. Büyük enerji sistemlerinde karma yüklerin olması halinde özellikle gerçekleşme ihtimali vardır.

Gerilim kararsızlığı büyük ölçüde yük karakteristikleri tarafından belirlenir ve geçerli olarak gerilim kontrolü anlamına gelir. Gerçek gerilim kararsızlığı için toplam yükün en az bir kısmı kendini restore eden tipte (sabit MVA) olmalıdır. Aynı şekilde statik ya da gerilime duyarlı yükler, toplam yükün bir parçasını oluştururken gerilim kararlılığı problemleri daha az ciddi hale gelir. Böyle yükler için kararlılık sınırının kesin belirlenmesi de mümkündür.

Gerilim kararlılığının yük kararlılığı olarak da adlandırıldığından daha önce söz edilmişti. 'Yük', iletim sisteminin yüksek gerilim baralarında görülen yüküdür ve dağıtım sistemlerinin etkilerini de içerir. Düşük gerilim sebebiyle geçici olarak azalan yüklerin yeniden toparlanması, gerilim kararlılığının anahtar bir konusudur.

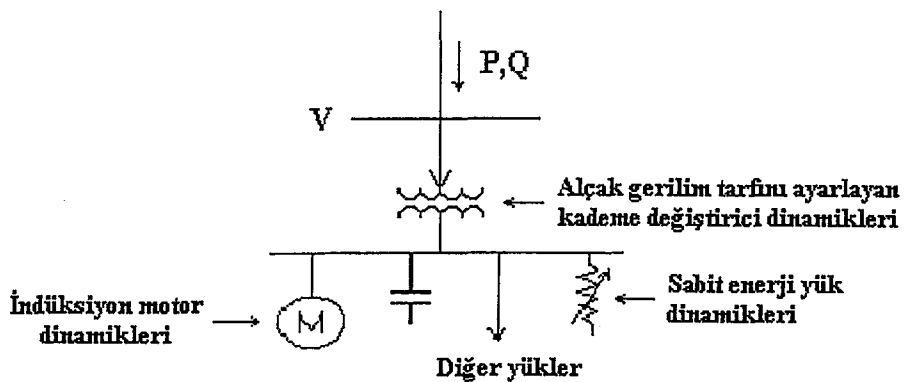
Aktif (gerçek) yük, üç mekanizma tarafından restore edilir:

1) İndüksiyon motorları, gerilimdeki ani değişiklikten sonra birkaç saniye içerisinde mekanik yüklerini karşılamak için hızlı bir şekilde cevap verirler. Kaynak sistemdeki ani değişiklikten sonra, indüksiyon motorları hemen empedans yükler gibi davranırlar. Yavaş bir gerilim düşmesi için hızlı cevap veren motorlar, sabit aktif güç yükleri gibi davranarak diğer ekipmanların yavaş dinamiklerini takip ederler.

2) Yük altında otomatik kademe değiştiren dağıtım transformatörleri ve dağıtım gerilim regülatörleri yük tarafı gerilimini ve böylece gerilime duyarlı yükleri takviye etmek için 20-30 saniye ile birkaç dakika arasında işlem yapar. Reaktif güç yükü ve şönt kompanzasyonun reaktif güç çıkışı da böylece takviye edilmiş olur.

3) Sabit enerjili rezistif yükler, termostatik ya da elle kontrolle restore edilir. Bu, ağırlaşan yükler için gerilim düşmesini takip eden bir zaman periyodu içinde yük çeşitliliğinin kaybıyla sonuçlanır.

Bir tahmin olarak tüm üç yükün toparlanma mekanizmalarının dinamikleri birinci derecedendir ve tek bir zaman sabiti kullanılarak modellenilebilir. Zaman sabitlerinin farklı olmasına karşın, denklemler benzer formdadır ve yük toparlanması mekanizmaları kavramsal analizler için birleştirilebilir. Üç tip yük de Şekil 4.3' te görüldüğü gibi aynı anda tek güç dağıtım barasında bulunabilir.



**Şekil 4.3 Gerilime duyarlı yüklerin toparlanması için üç mekanizma.**

Üç tip yükün restorasyon mekanizmalarının birinci dereceden modelleri için durum değişkenleri sıra ile; motor kayması ( $s$ ), kademe değiştiricinin sarım sayısı ( $n$ ) ve yük kondüktansı  $G$  olarak alınırsa; her durum değişkeni sıfırdan itibaren artarken yük gücü artar,

bir maksimuma ulaşır ve sonra tekrar azalır (Şekil 4.4). Durum değişkenleri artarken gerilim monoton bir şekilde azalır.

İndüksiyon motorları için Şekil 4.4 tork-hız eğrilerine benzerdir. Uygulanabilir birinci derece diferansiyel denklem,  $P_0$ ' ın sabit olarak kabul edilmiş başlangıç mekanik gücü olduğu

$$2.H.\omega.\frac{\partial z}{\partial t}=P_0-P_e \quad (4.1)$$

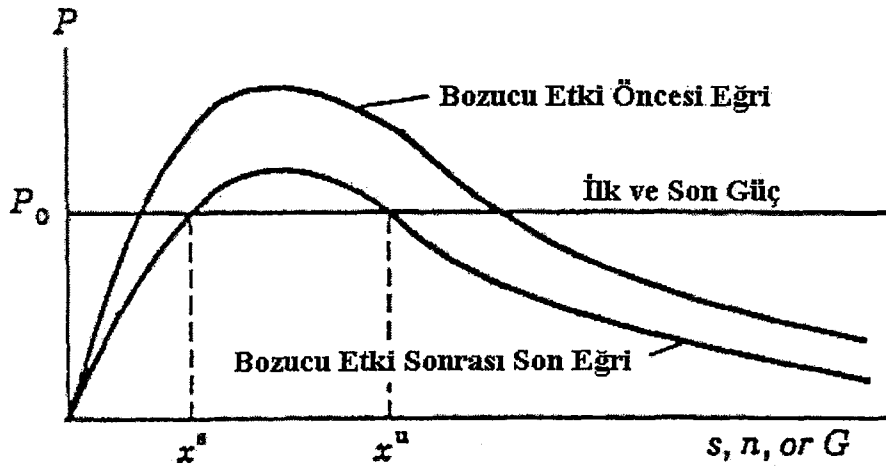
ifadesidir.

Büyük bir bozucu etki ardından kararlılık için son kaynak sistem konfigürasyonu anındaki kayma, kararlı denge noktası  $x^s$ ' in çekim bölgesi boyunca olmalıdır. Çekim bölgesi  $x^u$  kararsız denge noktasına doğru ilerler. Eşitlik 4.1'e göre,  $x^s$  ve  $x^u$  arasındaki bölge  $P_0$ 'dan daha büyüktür ve motor  $x^s$ ' e hızlanacaktır.

Çok sayıda termostatik kontrollü yükte uygulanabilir denklem

$$T\frac{\partial G}{\partial t}=P_0-V_L^2.G \quad (4.2)$$

olarak verilir.



Şekil 4.4 Gücün yük dinamiklerinin durum değişkenlerine göre değişimi.

Bu durum indüksiyon motorundaki ile benzerdir. Bozucu etkiyi takip eden kararlılık için son kaynak sistem konfigürasyonu anındaki kondüktans,  $x^s$  kararlı denge noktasının çekim bölgesi

boyunca olmalıdır. Çekim bölgesi  $x^u$ , kararsız denge noktasına doğru ilerler. Denklem 4.2' ye göre  $x^s$  ve  $x^u$  arasındaki bölge için  $V_L^2 \cdot G$ 'nin  $P_0$ 'dan büyük olması nedeniyle  $x^s$  noktasına ulaşılan dek termostatlar kondüktansı azaltacaktır (gerilimi de artıracaktır).

Kademe değiştiricilerle ilgili durum da benzerdir. Gerçekte,  $G$ 'nin yüksek gerilim tarafı kondüktansı olduğu 4.2 numaralı denklemin uygulanabilmesi için, formülasyon kademe değiştirme tarafından değişebilir.

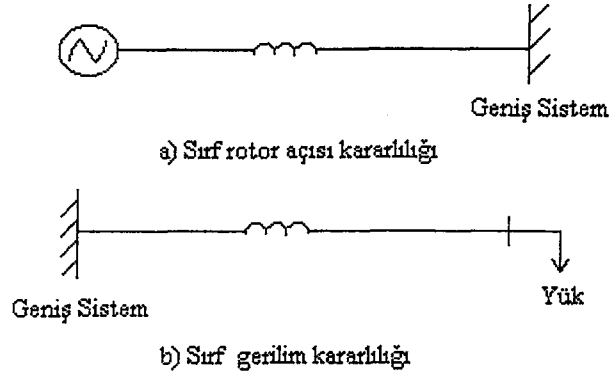
### 4.3.1 Gerilim Kararlılığı ile Rotor Açısı Kararlılığının İlişkisi

Gerilim kararlılığı ile rotor açısı kararlılığı birbiriyle az ya da çok karşılıklı bağlantı içindedir. Geçici gerilim kararlılığı sıkça geçici rotor açısı kararlılığı ile, gerilim kararlılığının daha yavaş formları da, sürekli hal rotor açısı kararlılığı ile ilişkilidir. Daha önceden de belirtildiği gibi geçici dönem olaylardaki işleyişlerin ayrımı hayli zordur.

Uzaktaki senkron bir generatörün iletim hattıyla büyük sisteme bağlandığı durum (sırf açı kararlılığı-tek makine ve sonsuz bara problemi) ile senkron bir generatör ya da büyük sistemin bir iletim hattı ile yüke bağlandığı durum (sırf gerilim kararlılığı) Şekil 4.5'te görülmektedir.

Rotor açısı kararlılığı da gerilim kararlılığı kadar reaktif güç kontrolü tarafından etkilenir. Özellikle monoton olarak artan açıların görüldüğü sürekli hal kararsızlığı, otomatik generatör gerilim regülatörleri gelişmeden önceki temel bir problemdir. Şimdi ise sürekli hal rotor açısı kararlılığı ile uzun dönem gerilim kararlılığı arasında şu bağlantı görülmektedir: Buna göre generatör akımını sınırlama, normal otomatik gerilim regülasyonunu önlemektedir. Dolayısıyla generatör akımını sınırlama her iki çeşit kararlılık için de zararlıdır.

Gerilim kararlılığı, yük bölgeleri ve yük karakteristikleri ile ilgilidir. Rotor açısı kararlılığı için ise, temel olan uzaktaki enerji santrallerinin iletim hatlarıyla geniş sisteme bağlanmasıdır. Basitçe, gerilim kararlılığı yük kararlılığıdır, rotor açısı kararlılığı ise generatör kararlılığıdır.



**Şekil 4.5 Farklı kararlılık tipleri.**

Büyük enterkonnekte sistemlerde bir yük bölgesinin gerilim çökmesi, herhangi bir generatörün senkronizma kaybı olmaksızın mümkündür.

Geçici gerilim kararlılığı ise, genellikle geçici rotor açısı kararlılığı ile birlikte tutulur. Uzun dönem gerilim kararlılığı, rotor açısı kararlılığı ile daha az bağlantılıdır.

Eğer iletim sisteminde yükten uzak bir noktada gerilim çöktüyse, bunun bir rotor açısı kararsızlığı problemi olduğu söylenebilir. Gerilim eğer bir yük bölgesinde düşüyorsa, bu temel olarak bir gerilim kararsızlığı problemidir.

#### 4.3.2 Eski Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı

Gerilim problemlerinin gelişen güç sistemlerinde meydana gelmesi, beklenen bir durumdur. Aynı şekilde büyük sistem arızalarından sonra görülmesi de yüksek ihtimaldir. Fakat kullanım açısından eski güç sistemlerinde de gerilim problemlerinin görülmesi gitgide daha sık meydana gelmektedir.

Bunun bir nedeni mevcut üretim ve iletim sistemlerinin yoğun kullanımınıdır. Bu yoğun kullanım da yeni üretim ve yük bölgeleri inşa etmenin ve uzaktaki üretim kaynaklarını uzun iletim hatları kurarak bağlamanın zorlukları sebebiyledir.

Bir başka neden de reaktif güç kompanzasyonu için şönt kapasitör setlerinin artan kullanımınıdır. Güç transfer limitleri artırılırken şönt kapasitör setlerinin aşırı kullanımı bir

gerilim düşmesi silsilesi ile sonuçlanır. Şönt kapasitör setinin reaktif güç çıkışı gerilimin karesiyle azalır ve bundan sonra da gerisi kolayca gelir.

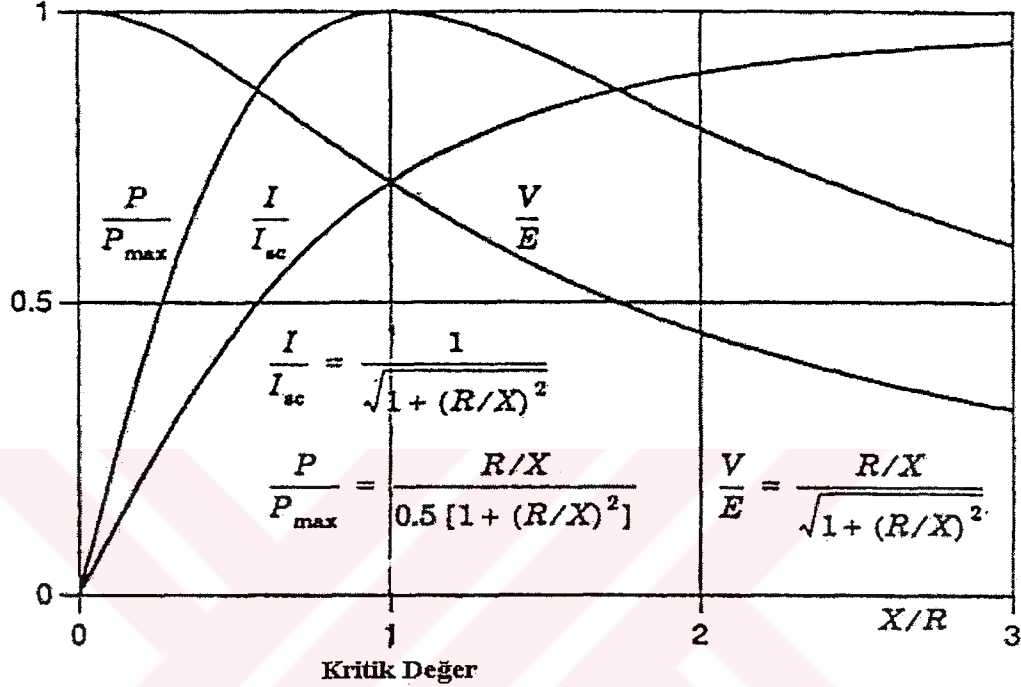
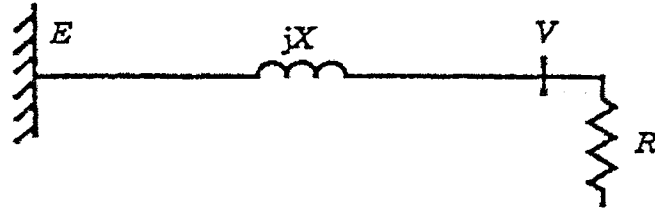
Hızlı hata temizleme, yüksek performanslı uyartım sistemleri, güç sistem stabilizörleri ve diğer kontroller, geçici kararlılık tarafından empoze edilen transfer limitlerini ortadan kaldırmada etkilidir. Geçici kararlılık tarafından zorlanan limitlerin kalkmasıyla birlikte hem termal kapasite hem de gerilim kararlılığı, iletim limitlerini sınırlandırabilir.

### 4.3.3 Gerilim Kararlılığı Analizleri: P-V Eğrileri

Gerilim kararsızlığının yavaş şekilleri sıkça sürekli hal problemleri olarak analiz edilirler ve güç akışı simülasyonları ilk araştırma metodudur. Bu sistemde herhangi bir yük artışı ya da başka bir olay için o anki sistemin durumu bulunur. Bu bozucu etki sonrası güç akışlarının yanında P-V eğrileri ve Q-V eğrileri gibi ilk başka güç akışı temelli metot, geniş şekilde kullanılır. Bu iki metot, gerilim kararlılığıyla bağlantılı olabilecek sürekli hal yüklenebilirlik sınırlarını belirler. Özel bir yazılım gerekli değildir. Sıradan güç akışı simülasyonlarıyla elde edilebilirler.

P-V eğrileri, gerilim kararlılığının kavramsal analizleri için ve radyal sistemler hakkındaki araştırmalar için hayli kullanışlıdır. Metot ayrıca P'nin bir bölgedeki toplam yük, V'nin de kritik ya da karakteristik bara gerilimi olduğu büyük iç içe geçmiş şebekeler için de kullanılır. P, ayrıca bir iletim bağlantısı boyunca güç transferi de olabilir. Yöntemin dezavantajı, güç akışı simülasyonunun eğrideki maksimum güç noktasının yakınında uzaklaşmasıdır. Diğer bir dezavantaj da bölge yükü artarken üretimin gerçekçi şekilde yeniden programlanması gerekliliğidir.

Kavramsal analizler için P-V eğrileri, yük karakteristikleri gerilimin bir fonksiyonu olarak analiz edildiğinde uygun ve kullanışlıdır. Örneğin rezistif bir yükün eğrisi  $P_{yük} = \frac{V^2}{R}$  formülü ile belirlenmiş olabilir. Sabit bir güç yükünün zıt uç noktası bile daha basittir ve P-V eğrisinde dikey bir hattır. Şekil 4.6'da gerilim, güç ve akım arasındaki değişimler, rezistif bir yük için görülmektedir.

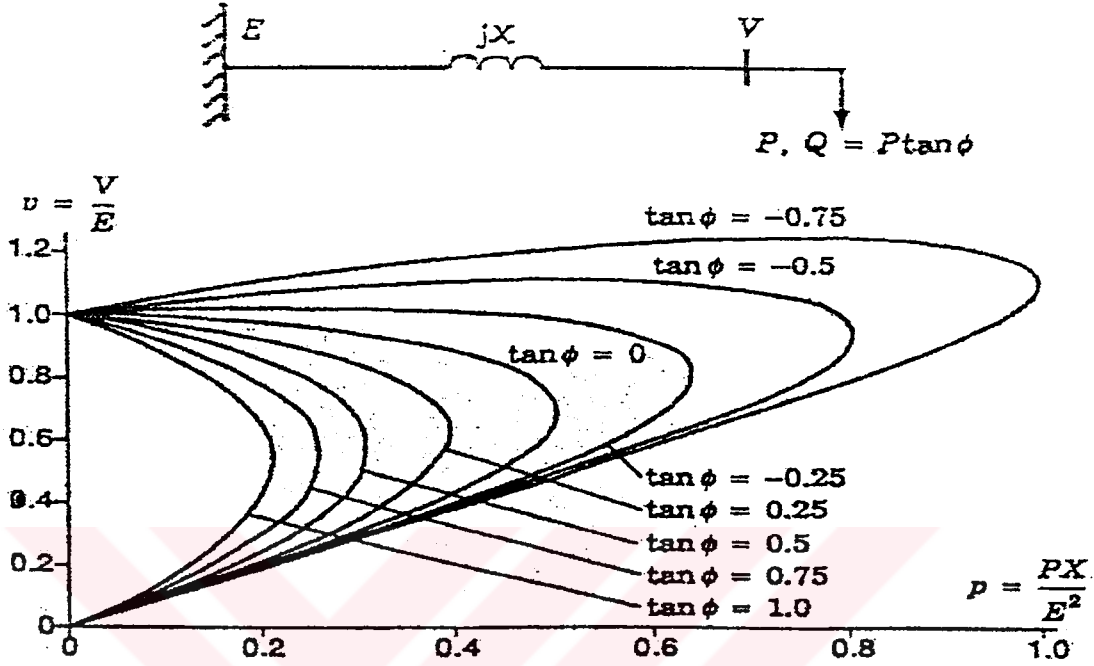


Şekil 4.6 Rezistans yük ve reaktans iletim hattı için gerilim, akım ve güç ilişkileri.  
 $I_{sc}=E/X$  kısadevre akımıdır.

Empedans yükler için duruma bakıldığında, temel bir şebeke teoremi maksimum güç transferinin yük empedansı büyüklüğünün, kaynak empedans büyüklüğüne eşit olduğunda gerçekleştiğini göstermektedir. Daha büyük yük empedansları için (yani daha küçük admitanslar için) yüksek gerilim, düşük akımlı çalışma noktaları söz konusudur. Yüksek admitanslar içinse durum tersine düşük gerilim, büyük akım değerleriyle olur. Rezistif bir yük ve reaktans bir şebeke için en basit bir örneğe ait gerilim, akım ve güç ilişkileri Şekil 4.6'da olduğu gibidir. Belirtildiği gibi maksimum güç transferi, kaynak ve yük empedansları eşit olduğunda meydana gelir. Bu maksimum güç değerindeki gerilim ise, kritik gerilim olarak adlandırılır.

Temel model için Şekil 4.7'de farklı güç faktörleri için normalleştirilmiş P-V eğrileri görülmektedir. Daha ileri güç faktörlerinde maksimum güç daha büyüktür (Artan güç faktörü

şönt kompanzasyonla elde edilmektedir). Ayrıca gerilim kararlılığı için büyük önem teşkil eden kritik gerilim de daha yüksektir.



Şekil 4.7 Sonsuz kaynak ve reaktans şebeke için P-V eğrileri.  $\tan\phi=1.0, 0.75, 0.5, 0.25$  ve  $0$  için güç faktörleri  $0.707, 0.8, 0.894, 0.97$  ve  $1.0$ 'dir.

#### 4.3.4 Gerilim Kararlılığı Analizleri: Q-V Eğrileri

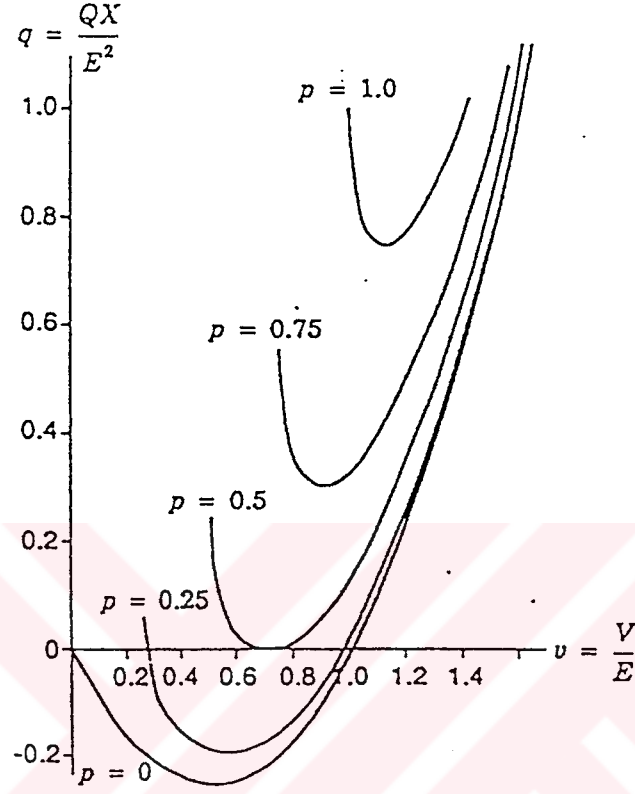
Şekil 4.7'de görülen P-V eğrilerini Q-V eğrilerine dönüştürmek, gerilim kararlılığı analizlerinde kullanılabilecek yeni bir kaynak sağlar. Bunun için P'nin sabit değerleri için Q ve V değerlerini belirleyip (her güç faktörü için iki çift) grafikleri çizilirse, Şekil 4.8'de görülen sonuçlar elde edilir. Burada yüksek yüklenmeler için kritik gerilim değerinin çok yüksek olduğu tekrar görülür ( $p=1$  pu için  $v=1$  pu'dan daha yüksek). Sağ kısım uygulanan bir kapasitör setinin gerilimi yükselttiği normal şartları ortaya koymaktadır.

Büyük sistemler için eğriler, bir dizi güç akışı simülasyonları tarafından elde edilir. Q-V eğrileri, bir test ya da kritik baradaki gerilimin aynı baradaki reaktif güce karşı değişimini ortaya koyar.

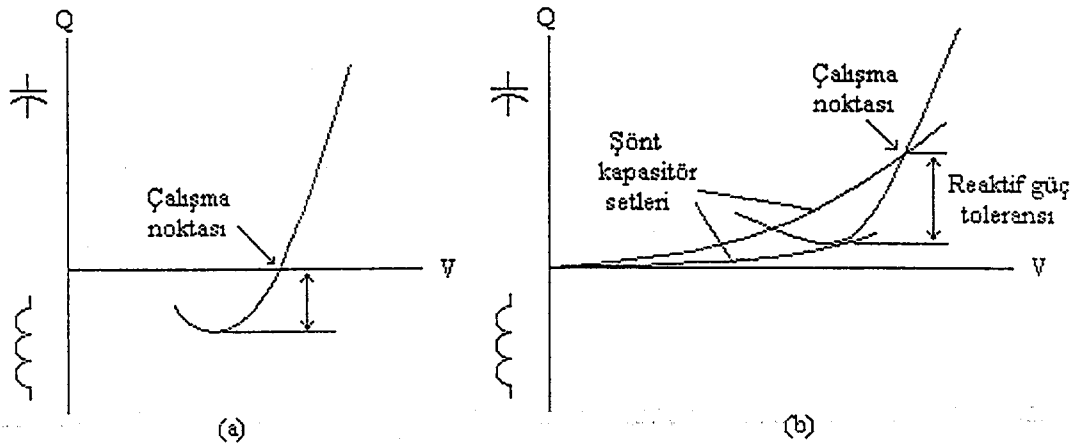
Q-V eğrilerinin sahip olduğu bazı avantajlar şunlardır:

- 1) Gerilim güvenliği reaktif güçle yakından alakalıdır ve Q-V eğrileri test barasında reaktif sınırını ortaya koyar. Reaktif güç toleransları çalışma noktasından hem eğrinin dibine hem de uygulanmış kapasitörün gerilim kareli karakteristiğinin Q-V eğrisine teğet olduğu noktaya kadar MVAR boyutlarındadır (Şekil 4.9). Test barasındaki değişimler de bir `gerilim kontrol bölgesi`ndeki (gerilim büyüklüğünün birlikte değiştiği bölge) tüm baralar için yol gösterici olabilir.
- 2) Q-V eğrileri bir P-V eğrisi boyuncaki noktalarda sistemin sağlamlığını sınamak için hesaplanabilir.
- 3) Test barası şönt reaktif kompanzasyonunun karakteristikleri direkt Q-V eğrisi üzerinde tanımlı olabilir. Çalışma noktası, Q-V sistem karakteristiği ile reaktif kompanzasyon karakteristiğinin kesişimidir (4.9.b). Bu reaktif kompanzasyonun gerilim kararlılığı problemlerine karşı sıkça bir çözüm olması nedeniyle kullanışlıdır.
- 4) Q-V eğrisinin eğimi test barasının katılığını gösterir (bir  $\Delta Q$  için  $\Delta V$ ).
- 5) Daha geniş bir açıdan bakılırsa generatörlerin reaktif gücü, aynı grafikte tanımlı olabilir. Yakındaki generatörler VAR limitlerine ulaştığında, Q-V eğrisinin eğimi daha az dik hale gelir ve eğrinin dibi yaklaşır.

Bir hesaplama noktasından bakıldığında yapay P-V barası, güç akışı iraksama problemlerini minimize eder. Çözümler eğrinin kararsız sol tarafında elde edilebilir. Iraksama, sadece P-V barasından uzaktaki baralardaki gerilimler düştüğünde meydana gelir. Üretim, yeniden programlama ihtiyaçları, sadece gerçek güçteki değişimler, kayıplardaki değişimler sebebiyle gerçekleştiğinden ötürü en alt seviyededir. Çok az farklı gerilimlerdeki önceki çözümlerden alınan başlangıç değerleri, her bir güç akışı çözümünün hızlı olması için kullanılır. İşlem tüm eğrinin bir zamanda hesaplanması için otomatikleştirilebilir.



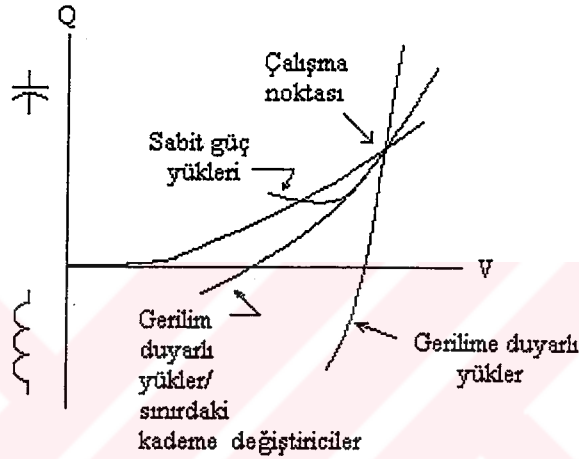
Şekil 4.8 Sonsuz kaynak ve reaktans şebeke için Q-V eğrileri. Yükler sabit güçlüdür.



Şekil 4.9 Reaktif güç toleransları.

Gerilime duyarlı yüklerin etkisi ya da kademe değiştirmenin eriştiği limitler, Q-V eğrileri ile gösterilebilir. Gerilime duyarlı yüklerle birlikte Q-V eğrileri, daha büyük reaktif güç toleranslarına ve daha düşük kritik gerilimlere sahip olacaktır. Kademe değiştirciler limitlerine geldiğinde, eğriler sol tarafa dönmekten daha çok düzleşecek şekilde davranırlar. Şekil 4.10'da bu durum görölmektedir.

Q-V eğrileri halen pek çok gerilim kararlılığı analizinde en çok başvurulan metotlardan biridir.



**Şekil 4.10 Gerilime duyarlı yüklerin ve limitindeki kademe değiştircilerin etkilerini gösteren Q-V eğrileri.**

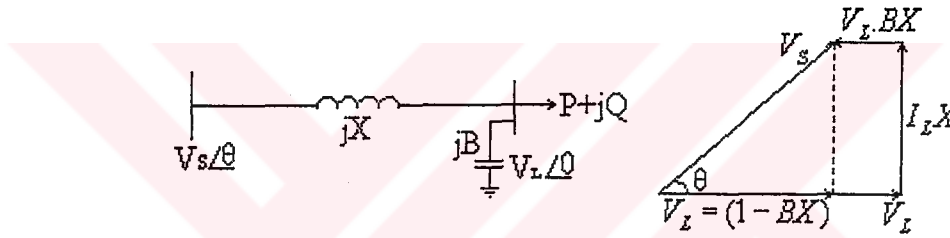
#### 4.4 Sistem ve Yük Modeli

Gerilim kararsızlığı konusunu iyi ortaya koyabilmek için gerilim kararlılığı üzerinde hissedilir etkilere sahip dinamiklerin incelenmesi gerekir. Gerilim kararsızlığını etkileyen dinamikler; yüklerin, gerilim kontrol aygıtlarının ve özellikle de generatör uyartım kontrollerinin dinamikleridir (Pal,1992).

Gerilim kararsızlığı ve çökmesinin gerçekleşme mekanizmaları hakkında önemli fikirler, bu mekanizmaları elde etmede dominant elementleri içeren basitleştirilmiş modeller kullanılarak elde edilebilir. Buradan elde edilen sonuçların daha sonra ayrıntılı simülasyonlara uygulanması mümkündür.

Örnek olarak analiz edilebilecek bir güç sistemi Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Buna göre tek bir generatör, bir iletim hattı üzerinden yükü beslemektedir. Basit olması açısından hattın rezistansı ihmal edilmiştir. Bununla birlikte hattın sonuna yükte gerçekleşebilecek bir ihtiyaç için reaktif besleme dahil edilmiştir.

Gerilim kararlılığı açısından en önemli yük çeşitinin, sabit MVA karakteristikleri taşıyan yükler olduğu bilinmektedir. Bunun sebebi, hem kendi yük doğası hem de dağıtım gerilim regülatörleri, kademe değiştiriciler vb. gibi yük besleme noktasında sabit bir gerilim taşıması istenen kontrol mekanizmalarının hareketleridir. Herhangi bir gerilim kontrol hareketi olmaksızın da termostatik kontrollü ısıtma yükleri gibi statik yükler de sabit enerji tüketimleri sebebiyle uzun dönemde sabit MVA yükleri gibi davranma eğiliminde olurlar. Bu tarz yükler, gerilim kararsızlığı konusunda hayli belirleyici bir rol oynarlar.



**Şekil 4.11** Yükü bir iletim hattı üzerinden sabit kaynak gerilimi ile besleyen bir güç sistemi ve fazör diyagramı.

Bir gerilim kararlılığı analizinde önemli olan, yükün dinamiklerini iyi ve uygun şekilde modellemektir. Sabit MVA yüklerini statik bir modelle modellemeye çalışmak hatalı ve yanıltıcı sonuçlara neden olabilir. Bu noktada, sabit MVA yükün statik yük olmadığı göz önüne alınmalıdır. Bu durum, güç isteği değişirken bir seviyeden diğerine bir anda atlanamayacağı anlamına gelir. Güç isteğindeki değişimi (bozucu etkiyi) takiben yük, ilk olarak sabit empedans ya da sabit akım gibi kendi anlık karakteristiğine uygun değişecektir. Daha sonra akımı (ya da empedansı) ayarlayacak ve isteği karşılamak için ne kadar akım gerekliyse onu sistemden çekecektir. Bu işlemlerin tümü de anlık bir olay değildir. Gerçekleşmesi için belirli bir zaman süresi gereklidir. Gerilim kararlılık analizleri için uygun bir yük modeli bu temel gerçekleri içermelidir.

Sabit bir MVA yükünün dinamik davranışı, birinci dereceden basit bir diferansiyel denklemlerle modellenmelidir. Elbetteki bunun daha farklı şekillerde modellenmesi de mümkündür. Böyle

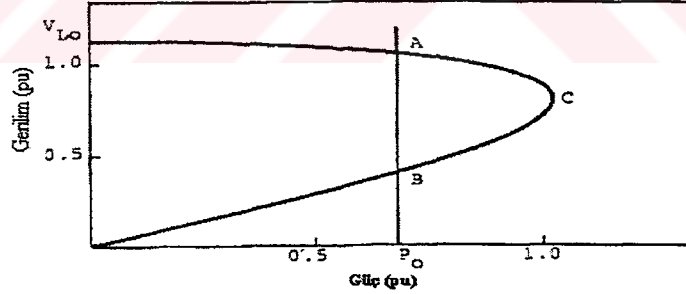
bir denklem  $V_L$  yük gerilimi,  $P_0$  güç set değeri,  $G$  sabit yükü taşımak üzere ayarlanmış yük kondüktansı ve  $T_L$ 'nin yük zaman sabiti olduğu ve denklem 4.2'de verildiği gibi

$$T_L \frac{\partial}{\partial t} G = P_0 - V_L^2 G \quad (4.2)$$

biçiminde olabilir.

#### 4.4.1 Çekim Bölgesi

Bir gerilim kararlılığı analizinde sistemin P-V eğrilerinin kararlı denge noktalarının çekim bölgelerini gözden geçirmek, sağlıklı bir sonuç elde etmek açısından gereklidir. Şekil 4.11'de gösterilen sistem için tam güç faktöründe bozucu etki sonrası sistemin P-V eğrisi, Şekil 4.12'de görüldüğü gibidir. Sabit yük gücü  $P_0$ 'ın yük karakteristiği dikey çizgi ile gösterildiği gibi sistemin P-V eğrisini A ve B gibi iki muhtemel denge noktasında keser. P-V eğrisinin alt kısmındaki (düşük gerilim çözümü) B noktası kararsız denge noktası iken üst kısmındaki (yüksek gerilim çözümü) A noktası kararlı denge noktasıdır.



Şekil 4.12 Şekil 4.11'deki sistem için Güç-Gerilim eğrisi.

Eğer bozucu etki sonrasında sistem durumu  $V_{LO}$  eğrisinin ACB yayı üzerinde bir noktaya erişiyorsa, bozucu etki sonrası sistem kararlıdır, yani çalışma noktası kararlı denge noktası A'da olacaktır.  $V_{LO}$ -ACB bölgesi yani kararsız denge noktasının sağ tarafındaki P-V eğrisi bölgesi, bozucu etki sonrası sistemin kararlı denge noktasının çekim bölgesidir.

Şekil 4.11'deki fazör diyagramından

$$V_L^2 = \frac{V_s^2}{(1-BX)^2 + G^2 X^2} \quad (4.3)$$

yazılabilir. Denklem 4.2

$$G_{10,20} = \frac{V_s^2 \pm \sqrt{V_s^4 - 4P_0^2 X^2 (1-BX)^2}}{2P_0 X^2} \quad (4.4)$$

olduğu

$$T_L \frac{\partial}{\partial t} G = \frac{P_0 X^2 (G - G_{10})(G - G_{20})}{(1-BX)^2 + G^2 X^2} \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilebilir.

G'nin iki değeri,  $P_0$  gücü için belirli iki gerilim çözümüne karşılık gelir. Bu çözümler Şekil 4.12'de görülen B ve A noktalarıdır. Bu iki gerilim değeri

$$V_L^2 = \frac{V_s^2 \pm \sqrt{V_s^4 - 4P_0^2 X^2 (1-BX)^2}}{2(1-BX)^2} \quad (4.6)$$

dir. Bununla birlikte

$$V_{L1}^2 \cdot G_{20} = V_{L2}^2 \cdot G_{10} = P_0 \quad (4.7)$$

yazılabilir.

Denklem 4.5'ten gösterilebilir ki, eğer başlangıç şartı P-V eğrisinde A noktasının sol kısmında ise  $(G < G_{20})$   $\frac{\partial G}{\partial t}$  pozitifdir ve çalışma noktası A'ya doğru hareket edecektir. Benzer olarak başlangıç durumu ACB eğrisi üzerinde herhangi bir yerde ise  $(G_{20} < G < G_{10})$   $\frac{\partial G}{\partial t}$  negatifdir ve çalışma noktası yine A'ya doğru hareket eder. Eğer başlangıç durumu B noktasının sol tarafında ise  $\frac{\partial G}{\partial t}$  pozitifdir ve çalışma noktası B'den öteye doğru ilerler. Bu nedenle B noktasının sağındaki bölge kararlı denge noktası A'nın çekim bölgesindedir.

Bunların fiziksel açıklaması ise şöyle yapılabilir: P-V eğrisinin alt kısmında kararsız denge noktası B'nin sağında bir noktada başlangıç durumunun olduğu kabul edilirse; bu durumdayken iletilen güç  $P_0$ 'dan daha büyük bir değerdedir. Sabit güç kontrol mekanizmaları gücü azaltmak için akımı ya da admitansı azaltacak şekilde hareket ederler. Bununla birlikte bu hareket, bu bölgede akım ya da admitans azalırken, gerilimin hızlı bir şekilde artmasına karşın gücü daha da arttırır. Bu şekilde çalışma noktası C'ye kadar ilerler. C noktasından sonra ise aynı kontrol kumandaları devam etmesine karşın, güç azalmaya başlar: Bu işlem kararlı denge noktası A'ya erişilene dek sürer. Aynı işlemler eğrinin üst kısmı için de benzer şekilde kararlı denge noktasına ulaşılan dek gerçekleştirilebilir.

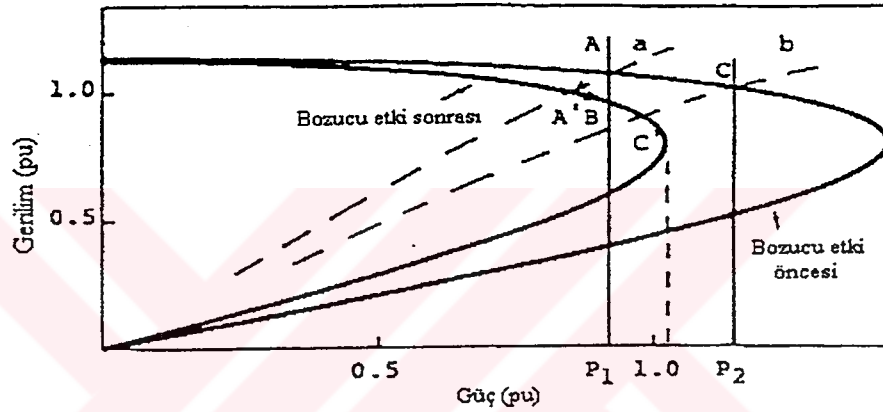
#### 4.4.2. Büyük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı

Tipik bir enerji sisteminde karma yükün tüm davranışı hesaba katıldığında gerilim kararlılığının bozucu etki sonrası sistemde kararlı bir denge noktasının varlığıyla temin edildiği görülür. Yine böyle bir sistemde yükler sabit MVA karakteristiklerini elinde bulundurduğu zaman bile, tüm cevap zamanı hayli yavaştır. Bozucu bir etkiyi hemen takiben tüm yükler geçici olarak statik yükler gibi davranır. Bu hem yükün kendi doğasından ötürüdür hem de sabit MVA'lı yükleri neticede restore eden bazı kontrol mekanizmaları hareketlerinden dolayıdır. Büyük bir kısmı sabit MVA olarak görülebilecek yük tarafından bu mekanizmalar, öncelikle generatör uyarım kontrolleri olan gerilim kontrol ekipmanlarının cevap hızına göre daha yavaş hareket ederler. Bu nedenle generatör terminal gerilimleri gibi kontrol edilen baralardaki gerilimler bütün yük karakteristikleri sabit MVA'ya dönmeden önce iyi şekilde restore edilmiş olabilir. Yük gruplarının hızlı cevap verme karakteristiğinde olduğu özel durumlarda bu düşünce doğru değildir ve hatalara yol açabilir.

Şekil 4.11'deki sistemin  $P_1$  yükü gibi bir yükü beslediğini ele alırsak, iki devreli bir iletim hattındaki bir bozucu etki sebebiyle bir devrenin açtığı durum düşünüldüğünde bozucu etki sonrası sistemin P-V eğrilerinin Şekil 4.13'teki gibi olacağı gösterilmiştir.  $P_1$  başlangıç yük gücü için çalışma noktası  $P_1$ 'deki dikey hat ile bozucu etki öncesi kararlı hal P-V eğrisinin kesişimi A noktasıdır. Bozucu etkiyi hemen takiben yük, sabit empedans gibi davranır. Tipik bir sistem için yük, sabit güce dönmeden önce sistem gerilimi restore edilebilir. Bundan dolayı çalışma noktası geçici olarak noktalı gösterilen anlık yük karakteristiği 'a' eğrisi ile bozucu etki sonrası P-V eğrisinin kesişimi A' ne kadar kayar. A' noktası son kararlı hal

denge noktası B'nin çekim bölgesinde olduğundan çalışma noktası B'ye hareket edebilir ve sistem kararlı kalır. Bozucu etki sonrası sistemde kararlı bir denge noktasının olması, gerilim kararlılığını garanti eder.

Diğer taraftan başlangıç yükü  $P_2$ , bozucu etki sonrası sistem tarafından beslenebilecek maksimum güçten daha büyük olsaydı, çalışma noktası geçici olarak bozucu etkiyi takiben C' noktasına kayardı. Bu yük için bozucu etki sonrası eğride kararlı bir denge noktası bulunmadığından eğer yük sabit gücü devam ettirmeye çalışırsa gerilim çökmesi görülecektir. Bununla birlikte çökme derhal gerçekleşmez; genellikle kararlılığı kurtarmak için gerekli manevraları yapacak yeterli süre vardır.



Şekil 4.13 Sistem P-V eğrileri, sürekli hal ve anlık yük karakteristikleri.

Sistem gerilim kontrolünün cevap hızına göre daha yavaş cevap hızı olan sabit MVA yüklerinin gerilim kararlılık sınırı, standart güç akışı modelinden elde edilen güç limitleriyle aynıdır. Güç akışı modeli kullanmada, sistem gerilim kontrolünün durumu önemlidir ve modelde yansıtılmalıdır. Eğer generatör terminal gerilimleri uyartım kontrolleri tarafından devam ettirilmiyorsa, yani generatörler sabit uyartımda çalıştığında, güç akış modelinde bir değişiklik yapmak gerekli olabilir. Bu şartlar altında gerilim kararlılık sınırı gösterilebilir. Bu nedenle de kararlı denge noktası generatör senkron reaktansı ardındaki sabit gerilim (generatör alan gerilimi) tarafından belirlenir. Bu durum farkedilmezse büyük hatalara yol açabilir.

#### 4.4.3 Yükün Bir Bölümü Statik Olduğunda Gerilim Kararlılık Sınırı

Gerilim kararsızlığının statik yük için meydana gelemeyeceğine karşın belirli bir güç faktöründe iletilebilecek maksimum güç, yükün tipinden bağımsızdır. Maksimum güç değerinin ötesinde iletilen gerçek güç, artan isteğe karşın azalır. Yükün bir kısmının statik yük olması durumunda gerilim kararlılığı sınırı da bundan bir ölçüde etkilenir. Tam güç faktöründe sabit güç yükü ve rezistif yükten oluşan bir karma yükün toplam ifadesi aşağıdaki şekilde belirtilebilir.

$$P=V_L^2(G+G_L) \quad (4.8)$$

Bu denklemde  $G_L$  yükün rezistif kısmının kondüktansı ve  $G$  de 4.2 nolu denklemle dinamikleri verilmiş sabit güçlü yükün kondüktansıdır.

Şekil 4.11'deki fazör diyagramından aktif ve reaktif güç denge denklemleri aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$V_L(G+G_L)X=V_S \cdot \text{Sin}\varphi \quad (4.9)$$

$$V_L(1-BX)=V_S \cdot \text{Cos}\varphi \quad (4.10)$$

Denklem 4.2, 4.9 ve 4.10 lineerize edilerek ve durum değişkeni olmayan değişkenler elenerek

$$T_L \frac{\partial}{\partial t} \Delta G = -V_L^2 \left[ 1 - \frac{2GX \cdot \tan \varphi}{(G+G_L)X \cdot \tan \varphi + (1-BX)} \right] \Delta G \quad (4.11)$$

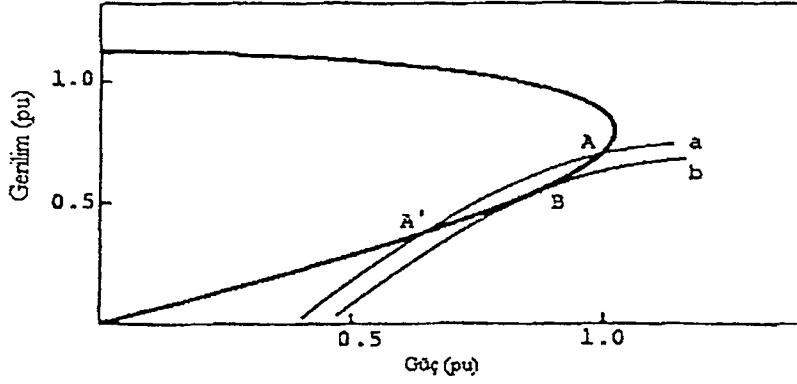
denklemini elde edilir. 4.9 ve 4.10 denklemleri kullanılarak bu da aşağıdaki hale getirilir.

$$T_L \frac{\partial}{\partial t} \Delta G = -V_L^2 \frac{G \cos 2\varphi + G_L}{G+G_L} \Delta G \quad (4.12)$$

Kararlılık için,  $G \cdot \cos 2\varphi + G_L > 0$  olmasından ötürü

$$\cos 2\varphi = -\frac{V_L^2 G_L}{P_0} \quad (4.13)$$

olduğunda gerilim kararlılık sınırına erişilir. Burada  $P_0 = V_L^2 \cdot G$  yükün sabit güç kısmıdır.



**Şekil 4.14 Rezistif ve sabit güç yükü kombinasyonu için yük karakteristikleri ve sistem P-V eğrileri.**

Şekil 4.14'e göre sabit güç yükü ve rezistif bir yükten oluşan bir yük kombinasyonunun karakteristiğinin 'a' eğrisiyle gösterildiği gibi olduğu kabul edilsin. Bu eğri sistem P-V eğrisine teğet olana kadar azaltılırsa (bu yük azaltımı hem sabit güç yükünün, hem rezistif yükün ya da her ikisinin azaltımıyla elde edilir):

$$P_0 + V_L^2 G_L = \frac{V_S V_L}{X} \sin \phi \quad (4.14)$$

Reaktif güç denge denklemindeki (4.10)  $V_L$ , bu denklemde yerine konursa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$P_0 + \frac{V_S^2 G_L}{(1 - BX)^2} \cos^2 \phi = \frac{V_S^2}{2X(1 - BX)} \sin 2\phi \quad (4.15)$$

Limiti elde etmek amacıyla  $P_0$  ve  $G_L$ 'nin  $\phi$ 'ye göre türevleri alınıp sifıra eşitlenir. Birkaç cebirsel işlem ardından da 4.13 denklemindeki gerilim kararlılık sınırıyla aynı olan

$$\cos 2\phi = -\frac{V_L^2 G_L}{P_0} \quad (4.13)$$

sonucuna ulaşılır.

Şekil 4.14'te 'b' yük karakteristiği eğrisinde sistem P-V eğrisine teğet olan B noktası, aynı zamanda gerilim kararlılığı sınırınıdır. Bu da A noktasının kararlı, A' noktasının kararsız denge noktaları olmasının bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

#### 4.4.4 Büyük Şebekelere Uygulanması

Elde edilen bu sonuçlar, yükün statik kısmını da yansıtmak üzere değiştirilmiş sistem jakobiyesiyle kararlılık sınırının ilişkisi kurulursa büyük şebekelere de uygulanabilir.

Ele alınan örnekteki sistem için farka dayalı güç akışı denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(V_s V_L / X) \cos \theta & 2V_L G_L - (V_s / X) \sin \theta \\ (V_s V_L / X) \sin \theta & 2V_L (1 - BX) / X - (V_s / X) \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

Burada sıradan güç akışı jakobiyesi, yükün rezistif kısmından kaynaklanan terimlerle bir artışa uğramıştır. Rezistif yüke göre değiştirilmiş bu jakobiye matris determinanı sıfır olduğunda tekildir. Determinant hesaplandıktan ve bazı cebirsel işlemler yapıldıktan sonra tekillik için gereken koşul, gerilim kararlılık sınırı için gerekli koşulla aynı olan

$$\cos 2\theta = \frac{V_L^2 G_L}{P_0} \quad (4.13)$$

koşulu elde edilir. Bu nedenle yük statik bileşenler taşıdığı anda gerilim kararlılığı sınırı, değiştirilmiş jakobiye matrisin tekilliği ile belirlenir.

Büyük şebekelere uygulanması da direkt olarak yukarıdaki analizlerin yolunu izler. İlk olarak 4.16 ve 4.17 numaralı denklemlerde görüldüğü gibi yükün sabit güç kısmından gerilime bağımlı güçler ayrılır.

$$P + P(V) = f(\phi, V) \quad (4.16)$$

$$Q + Q(V) = g(\phi, V) \quad (4.17)$$

Lineerize edilmiş güç akış denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{PP} & j_{PV} \\ j_{QP} & j_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mu \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Buradaki terimler için

$$j_{PV'} = j_{PV} - \partial P(V) / \partial V \quad (4.19)$$

$$j_{QV'} = j_{QV} - \partial Q(V) / \partial V \quad (4.20)$$

Generatör ve diğer gerilim kontrol baralarında  $\Delta V$ 'ler sıfırdır, yani jakobiyen gerilim kontrolü periyodu altında klasik güç akış çözümünde olduğu gibi düzeltilmiştir. Bu durum, gerilim kontrol baralarındaki herhangi bir uygunsuzluk için önemlidir. Örneğin generatörlerden herhangi biri ya da birkaçı uyarım sınırlarına eriştiğinde, terminal gerilimleri daha fazla sabit kalmaz. Bunun yerine sabit uyarımda sabit gerilim, daha önce de belirtildiği gibi senkron reaktans ardındaki gerilimdir. Bir jakobiyen matris bu özellikleri yansıtmalıdır. Gerilim kararlılık limiti de, değiştirilmiş jakobiyen matrisin tekilliği ile belirlenebilir.

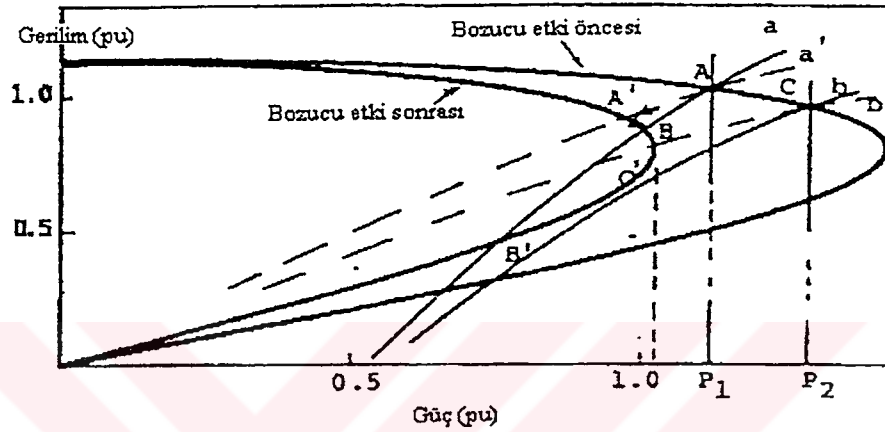
#### 4.4.5 Karma Yükler için Büyük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı

Toplam yükün bir kısmı statik olduğunda, gerilim kararlılığı sınırının sistem P-V eğrisi üzerinde maksimum güç noktasından öteye geçebileceği belirtilmişti. Böyle yükler için kararlılık, bozucu etki öncesi başlangıç yük değeri için bozucu etki sonrası maksimum güç kapasitesinden daha iyi devam ettirilebilir. Bunun nedeni bozucu etkiyi takiben taşınan gerçek gücün azalmasına karşın bozucu etki sonrası sistemde bir kararlı denge noktasının bulunma ihtimalidir.

Bu anlatılanları göstermek amacıyla %50 rezistif yüklü bir durum ele alınırsa, sistemin P-V eğrileri ve kararlı hal yük karakteristikleri düz çizgilerle Şekil 4.15'te görüldüğü gibidir. Toplam yük  $P_1$  için A noktası bozucu etki öncesi ilk çalışma noktasıdır. Bozucu etki ardından denge noktaları yeni P-V eğrisi üzerinde gösterilen B ve B' noktalarıdır.

Daha önce de bahsedilen bir durum olarak B' noktasının (kararsız denge noktası) sağındaki bölgenin kararlı denge noktası, B noktasının çekim bölgesi olduğu söylenebilir.

Bozucu bir etkiyi takiben çalışma noktası, bozucu etki sonrası P-V eğrisi ile noktalı olarak gösterilmiş anlık yük karakteristiği a' eğrisinin kesişimi A' noktasına geçer. Bu nokta kararlı denge noktası B'nin çekim bölgesinde olmasından dolayı sistem kararlı kalacaktır.



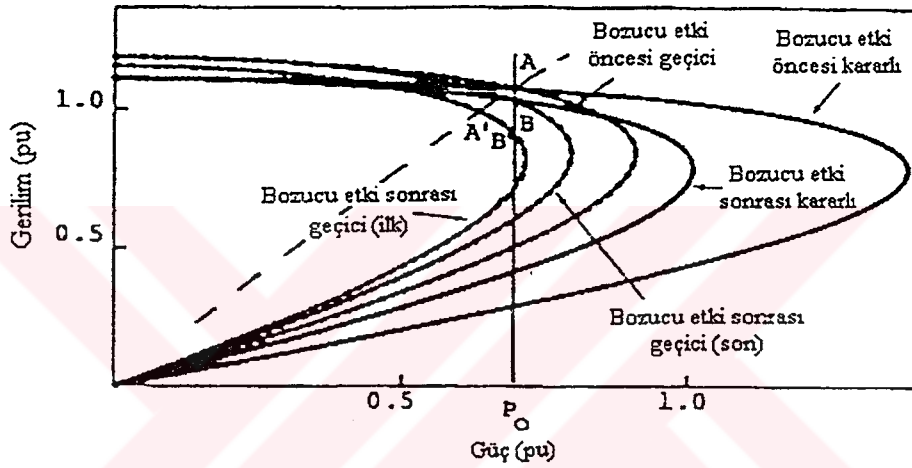
Şekil 4.15 Yükün bir kısmı statik olduğunda sürekli hal (düz çizgiler) ve anlık (kesikli çizgiler) yük karakteristikleri ile sistem P-V eğrileri.

Eğer toplam yük, şekildeki  $P_2$  değeri olsaydı, bozucu etki sonrası sistemde bir denge noktası olmadığından ötürü bozucu etki sonrasında gerilim çökmesi olacaktır. Bu da bozucu etki sonrası sistemde kararlı bir denge noktası bulunmasının büyük bozucu etki gerilim kararlılığını temin ettiğini bir kez daha göstermektedir.

#### 4.4.6 Hızlı Cevap Veren Yükler için Gerilim Kararlılığı

Gerilim kararsızlığı analizlerinde sabit MVA karakteristikli yükler için, yükleri sabit MVA'ya restore eden mekanizmaların generatör gerilim kontrolleri gibi sistem gerilimlerini restore eden mekanizmalara göre çok daha yavaş hareket ettiği bilinmektedir. Yük cevabının hızı, gerilim kontrol aygıtlarının hızıyla karşılaştırılabilir ölçüde hızlı olduğunda, sistemde sabit sistem gerilimi olacağını kabul etmek büyük bir hatadır.

Bu tarz yükler için gerilim kararlılığı konusunun anlaşılmasında 'geçici' sistem P-V eğrilerinin kullanılması faydalı olabilir. Şekil 4.16, yük gücü  $P_0$  olduğunda sistemin geçici ve kararlı hal P-V eğrilerini göstermektedir. Noktalı çizgilerle gösterilen geçici eğriler, geçici periyot esnasında gerçek olmayan bir reaktansın ardında sabit tutulan gerçek olmayan bir gerilim kullanılarak elde edilmiştir. Uygulamada bu reaktansın gerçek değerini tahmin etmek kolay değildir.  $P_0$  yükü için başlangıç çalışma noktası, bozucu etki öncesi kararlı hal P-V eğrisi ile sabit yük gücü olarak kabul edilen  $P_0$ 'daki dikey kararlı hal yük karakteristiğinin kesişimi A noktasıdır.

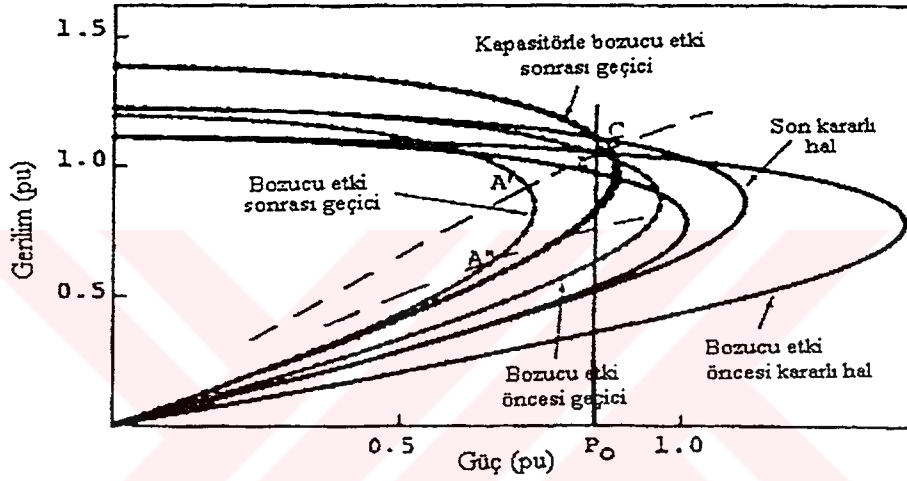


**Şekil 4.16 Hızlı cevap veren yükler için 'geçici' P-V eğrileriyle büyük bozucu etki gerilim kararlılığı. Gösterilen güç seviyesinde sistem bozucu etkiyi takiben kararlıdır.**

Bozucu bir etki ardından çalışma noktası geçici P-V eğrisiyle anlık yük karakteristiğinin kesişimi A' noktasına kayar. A' noktası geçici P-V eğrisinde kararlı denge noktası B' 'nün çekim bölgesinde olduğundan sistem de geçici olarak kararlı kalır. Çalışma noktası ise en sonunda, bozucu etki sonrası kararlı hal ve son geçici P-V eğrileriyle kararlı hal ve yük karakteristiğinin kesişimi B noktasında olacaktır.

Şekil 4.17'de ise kararlı hal yük karakteristiği ve bozucu etki sonrası sistem P-V eğrisinin bir kesişim noktası bulunmadığı, daha yüksek bir başlangıç güç değeri için durum görülmektedir. Bununla birlikte bozucu etki sonrası sistem, bu yük değeri için sürekli hal kararlılığındadır. Bu durum, gerilimin bozucu etkiyi takiben herhangi bir çeşit kontrol hareketi olmaksızın çökeceğinin kanıtıdır. Uygun bir kontrol manevrasıyla gerilim kararlılığı kurtarılabilir. Örneğin yeteri kadar kapasitör hemen anahtarlanırsa, kararlı çalışma, şekilde gösterildiği gibi

restore edilebilir. Bu şekilde çalışma noktası bozucu etki ardından önce A' noktasına kayar. Daha sonra geçici P-V eğrisinde aşağı doğru hareket eder ve herhangi bir kontrol hareketi yapılmazsa gerilim çöküşü gelir. Tam vaktinde yapılan kapasitör anahtarlama ile sistem yeni P-V eğrisinin kararlı denge noktasının çekim bölgesine getirilebilir. Bu durumda da nihai olarak kararlı denge noktası C'ye ulaşılır. Eğer kapasitörün devreye sokulmasında geç kalınırsa çalışma noktası geçici P-V eğrisinde A'' noktasının ötesine geçer ve kararlı çalışma kurtarılamaz. Bunun nedeni kapasitörün devreye girdiği yeni başlangıç durumunun yeni kararlı denge noktasının çekim bölgesinin dışına düşmesidir.



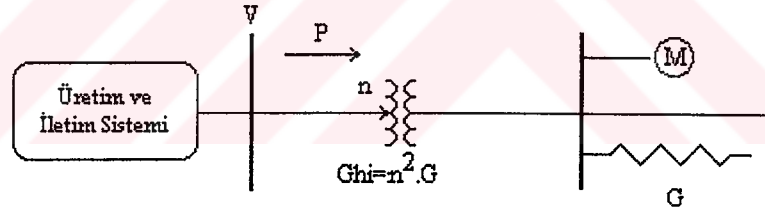
**Şekil 4.17 Hızlı cevap veren bir yük için büyük bir bozucu etki ardından gerilim kararsızlığının görünümü. P<sub>0</sub> yük seviyesinde bozucu etki sonrası sistemde kararlı bir denge noktası vardır. Bozucu etki ardından gerilim kararlılığını devam ettirmek amacıyla kapasitör anahtarlama gibi bazı kontrol hareketleri gerekli olabilir.**

Tüm bu durumlar göz önüne alındığında, hızlı cevap veren karma yük grupları bulunması halinde hem küçük hem de büyük bozucu etkileri göz önüne alarak ayrıntılı bir analiz gerektiği görülmektedir. Bu analizler, generatörlerin kontrol ekipmanlarını özellikle de uyarım kontrollerini ayrıntılı modellemelerle içerebilir. Kritik olmayan durumlarda ise böyle yükler için gerilim kararlılık sınırlarının yaklaşık tahminleri, güç akış modellerinde kullanıldığı gibi sabit generatör terminal gerilimi yerine, iyi hesaplanmış reaktans ardındaki generatör iç gerilimini kullanan kararlı hal analizlerinden elde edilebilir.

#### 4.4.7 Uzun Dönem Gerilim Kararlılığının Grafik Açıklaması

P-V eğrileri kullanılarak, yük karakteristikleri ile ilgili olarak gerilim kararlılığının analiz edilebileceğini ortaya koyduktan sonra kademe değiştirme, sabit enerji yükleri ve generatör akımı sınırlanması gibi etkileri de kapsayan bir sistem, Şekil 4.18'de görülmektedir. 0.9-1.1 pu'luk bir gerilim aralığı boyunca indüksiyon motoru, sabit güçlü statik bir yük olarak tahmin edilerek, sabit ve rezistif yükün farklı miktarda olduğu kabul edilmiştir (Küçük bir gerilim aralığında, aydınlatma gibi diğer yük bileşenleri sabit ve rezistif yük kombinasyonları olarak modellenebilir). Rezistans (ya da kondüktans  $G$ ), transformatörün kademe değiştirici tarafına sarım sayısı  $n$ 'in karesiyle orantılı olarak geçmektedir. Tipik kademe değiştirici aralığı  $\pm 10\%$ 'dur.

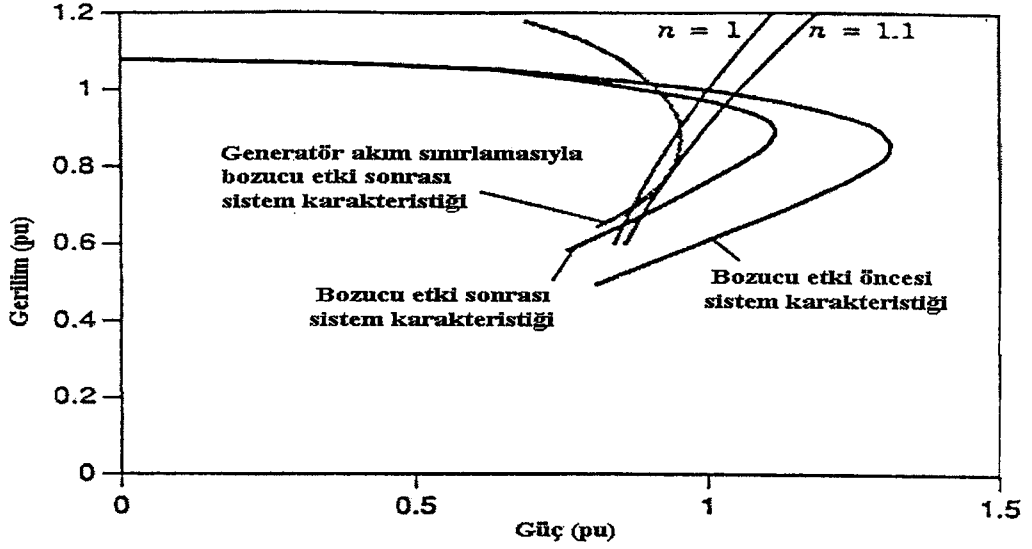
İlk olarak %75'lik motor, %25'lik rezistif yük bulunan bir bölge için, sonra da %25'lik motor, %75'lik rezistif yükü olan bir bölge için sistem ve yük karakteristikleri ele alınacaktır. İlk durum için yük bölgesinin endüstriyel bir bölge, ikinci durum için ise tahminen elektriksel ısıtma yapılan bir yük bölgesi olduğu söylenebilir.



Şekil 4.18. Enerji sistem modeli.

**Yüksek oranda motor yükü:** Şekil 4.19 üç sistem karakteristiği ve %75'lik motor yükü durumu için yük karakteristiklerini göstermektedir. Çalışma noktası sistem ve yük karakteristiklerinin kesiştiği noktadır.

Bahsedilen üç sistem karakteristiği bozucu etki öncesi, bozucu etki sonrası-generatör akım sınırlama öncesi ve bazı generatörlerin akım sınırlamasıyla birlikte bozucu etki sonrası karakteristiklerdir. Aşırı yüke cevap olarak generatör alan akımının sınırlanması aşırı uyartım sınırlayıcıları ya da bizzat operatör tarafından gerçekleştirilir. Her sistem karakteristiği, üretim ve iletim sisteminin sürekli hal güç transfer kabiliyetini ortaya koyan bir maksimum nokta içerir. Sistem karakteristikleri tamamen kavramsaldir ve reaktif güç yüküyle kompanzasyon etkilerini dolaylı olarak içerir (Taylor, 1993).



**Şekil 4.19** %75'lik motor yükü için sistem ve yük karakteristikleri. Yük karakteristiği  $P=0.75+0.25.n^2.G.V^2$  ( $G=1$  pu). Başlangıç şartları: gerilim ve güç 1 pu.

Şekil 4.19'da ayrıca %75'lik motor yükü karakteristikleri de gösterilmiştir. Gösterilen iki yük karakteristiğinden biri başlangıç yük karakteristiği, diğeri ise +10% kademe değiştirme ile yük karakteristiğidir. Yük denklemi  $P=0.75+0.25.n^2.G.V^2$ 'dir. Bozucu etkiyi takiben gerilim düşecek ve yük karakteristiği bozucu etki sonrası sistem karakteristiklerinden biriyle kesişecektir. Gerilimdeki düşüş, rezistif yükü alçak gerilim tarafının kademe değiştirici regülasyonuna kadar azaltır. Eğer kademe değiştirici yoksa ya da kademe değiştirici sınırdaki ise yük kondüktansı ısı kontrollü yükler ya da diğer çeşitli sabit enerjili yükler için artacaktır.

Yukarıdaki şekle göre yük karakteristiklerinin hayli ters ve elverişsiz olduğu görülmektedir. Kademe değiştirme ve generatör akımını sınırlama ile çalışma noktası kaybolmuştur (sistem ve yük karakteristiklerinin kesişimi yoktur). Bir çalışma noktasının kaybı da gerilim çökmesini başlatır. Kesin modeller için dinamik simulasyon belirlemeyi gerektirir. Gerçekte, motor kararsızlığı sürekli hal analizleri tarafından tahmin edilen kararsızlıktan önce meydana gelir. Eğer bozucu etki ciddi bir kısıtlayıcı içeriyorsa motorlar bu etki ardından yeniden toparlanamayabilir. Bununla birlikte Şekil 4.19 kavramsal bir değerdedir.

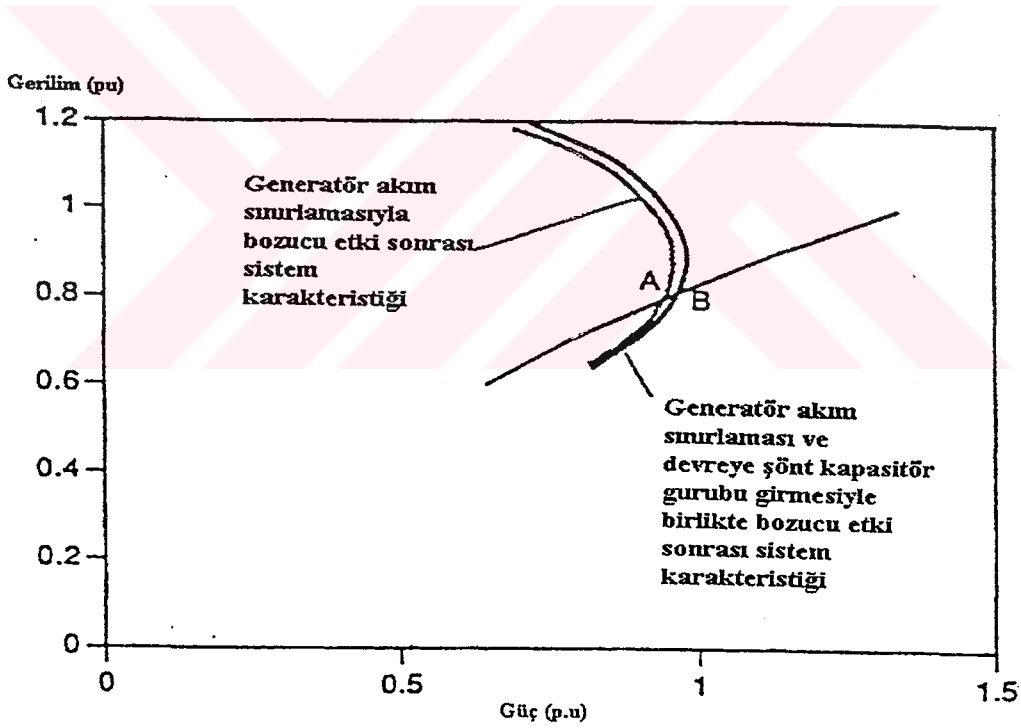
**Yüksek oranda rezistif yük:** Şekil 4.20, %75 oranda rezistif yük içeren bir bölgeye ait eğrileri göstermektedir (Sistem karakteristikleri değişmemiştir). Yük denklemi kondüktans  $G$ 'nin a ve b eğrilerinde 1 pu, c'de ise 1.2 pu olduğu  $P=0.25+0.75.n^2.G.V^2$  'dir. c eğrisindeki ek kondüktans, rezistif yük kısmının termostatik regülasyonundan ötürüdür ve tüm



ve kademe değiştiricinin yk tarafında muhtemel aşırı gerilimle B noktasında geçici bir işlemlle sonuçlanabileceği söylenebilir (Bu generatör gerilim regülatörlerinin yüksek gerilime hızlı cevap verdiği kabulünü gerektirir).

#### 4.4.8 şönt Kapasitör Anahtarlamasının Etkileri

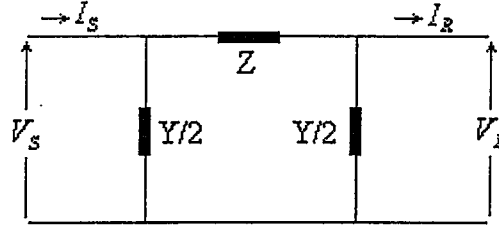
şekil 4.7’de gösterilen farklı g faktörleri için P-V eğrileri referans alınarak, P-V eğrisinin alt kısmında kapasitör ünitelerinin anahtarlama etkileri analiz edilebilir. %75’lik rezistif yük durumu için şekil 4.21, devreye giren bir kapasitör gurubunun çalışma noktasını A’dan B’ye getirmesini göstermektedir. Böyle bir anahtarlama sonucunda gerilim ve gücün ikisi de artmaktadır. Gerilim/reaktif güç performansı da normaldir.



şekil 4.21 Gerilime duyarlı yük durumunda kapasitör gurubunun devreye girmesinin P-V eğrisinin alt kısmında etkisi. Yük karakteristiği şekil 4.20’deki c eğrisininkiyile aynıdır.

## 5. SAYISAL UYGULAMA

Gerilim kararlılığı açısından incelenecek bir enerji sistemi için iletim devresi aşağıdaki simetrik  $\Pi$  devresi ile gösterilebilir. Hat başı ve hat sonu gerilim ve akım değerleriyle iletim hattı parametreleri şekilde gösterildiği gibidir.



Şekil 5.1 Simetrik  $\Pi$  Devresi.

Genel olarak iletim hatları dört uçlu şebekeler olarak gösterilebileceğinden devre denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} V_S &= A \cdot V_R + B \cdot I_R \\ I_S &= C \cdot V_R + D \cdot I_R \end{aligned} \quad (5.1)$$

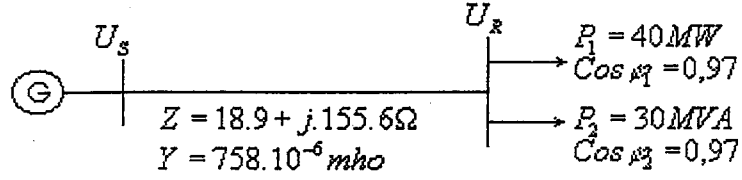
Matrisel formda yazılırsa:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Simetrik  $\Pi$  devresi için iletim hattı sabitlerini gösteren matris:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + ZY/2 & Z \\ Y(1 + ZY/4) & 1 + ZY/2 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Bu genel bilgiler ardından incelenecek enerji sistemi parametreleri ve şekli aşağıdaki gibidir. İletim hattı orta uzunlukta bir iletim hattıdır ve hat sonundan iki farklı güç faktöründe iki farklı tip yük çekilmektedir. Hat sonundaki fazlararası gerilim 220 kV'tur.



Şekil 5.2. İletim hattı ve yük parametreleri verilmiş basit bir enerji sistemi.

İletim hattı empedansı:

$$Z = 18,9 + j155,6 = 156,7 \angle 83,07 \text{ ohm}$$

İletim hattı admitansı:

$$Y = 758.10^{-6} \angle 90 \text{ mho}$$

Bu değerlere göre denklem 5.3'ten hesaplanan simetrik II devre sabitleri

$$A = 1 + Z.Y/2 = 0,941 \angle 0,43 = 0,941 + j.0,007$$

$$B = Z = 156,7 \angle 83,07 = 18,9 + j.155,6$$

(5.4)

Hat sonundaki baradan çekilen yükler için  $I_1$  ve  $I_2$  akımları

$$I_1 = 40000 / (\sqrt{3} \times 220 \times 0,97) = 108,2 \angle -14,06 \text{ A}$$

$$I_2 = 30000 / (\sqrt{3} \times 220) = 78,7 \angle -14,06 \text{ A}$$

(5.5)

Hat sonundan çekilen toplam yük akımı

$$I_R = I_1 + I_2 = 108,2 \angle -14,06 + 78,7 \angle -14,06 = 186,9 \angle -14,06$$

$$I_R = 186,9 \angle -14,06 \text{ A}$$

(5.6)

Hat sonu faz-nötr gerilimi  $V_R$

$$V_R = 220000 / \sqrt{3} = 127017 \angle 0 \text{ V}$$

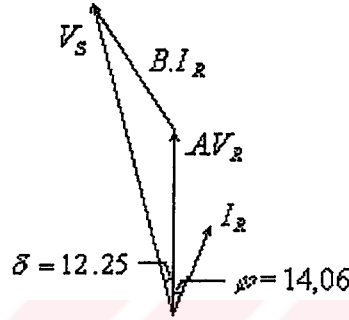
(5.7)

Hesaplanan bu değerler ardından hat başındaki  $V_S$  gerilimi denklem 5.1'den

$$V_S = (0,941 \angle 0,43 \times 127017 \angle 0) + (156,7 \angle 83,07 \times 186,9 \angle -14,06) \text{ V}$$

$$V_S = 133042 \angle 12,25 \text{ V} \quad (5.8)$$

olarak bulunur (Bu değer faz-nötr gerilimidir).  $12,25^\circ$  'lik açı hat başı ve hat sonu gerilimleri arasındaki yük açısı  $\delta$ 'dır. Buna göre oluşan sistemin fazör diyagramı aşağıdaki gibidir.  $V_R$  hatsonu gerilimi  $V_R \angle 0$  olarak referans alındığında  $A \cdot V_R$  fazörü buna göre  $0,43 B \cdot I_R$  fazörü de  $69,01$  derece açı ile yer alacak ve vektörel toplamları hatbaşı gerilimi  $V_S$ ,  $12,25^\circ$  ileride olacaktır.



Şekil 5.3. Sistemin fazör diyagramı.

### 5.1 Sistemin Gerilim Kararlılığı Açısından Kritik Değerlerinin Bulunması

Bir sistemin gerilim kararlılığı açısından kritik değerlerinin P-V eğrilerinden elde edilmesi güç sisteminin karmaşık yapısı sebebiyle daima kolay şekilde mümkün olmaz. Kritik değerlerin doğrudan hızlı bir şekilde bulunması güç akışının jakobiyen matrisinin tekillik ulaştığı noktalar belirlenerek gerçekleştirilebilir.

Bu noktadan sonra hat başı gerilimi  $V_S' = V_S \angle 0$ , hat sonu gerilimi  $V_R' = V_R \angle -\delta$  ve genelleştirilmiş devre sabitleri  $A' = a_1 + j \cdot a_2$  ve  $B' = b_1 + j \cdot b_2$  şeklinde alıp  $I_R'$  akımının ifadesinde yerine yazılırsa

$$I_R = \frac{V_S - A \cdot V_R}{B} = \frac{V_S - (a_1 + j a_2) \cdot V_R \cdot (\cos \delta - j \sin \delta)}{b_1 + j b_2} \quad (5.9)$$

bulunur. Bunun eşleniği,

$$\dot{I}_R' = \frac{V_S - (a_1 - ja_2)V_R(\cos \delta + j \sin \delta)}{b_1 - jb_2} \quad (5.10)$$

şeklindedir. Bu akım, kompleks güç

$$\dot{S}_R' = \dot{V}_R + \dot{I}_R' \quad (5.11)$$

ifadesinde yerine konulursa,

$$\dot{S}_R' = \frac{V_S V_R (\cos \delta - j \sin \delta) - (a_1 - ja_2)V_R^2}{b_1 - jb_2} \quad (5.12)$$

elde edilir. Düzenlemelerle,

$$\begin{aligned} \dot{S}_R' &= \frac{V_S V_R (\cos \delta - j \sin \delta)(b_1 + jb_2) - (a_1 - ja_2)(b_1 + jb_2)V_R^2}{b_1^2 + b_2^2} \\ &= \frac{V_S V_R (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) - (a_1 b_1 + a_2 b_2)V_R^2}{b_1^2 + b_2^2} \\ &\quad + j \frac{V_S V_R (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - (a_1 b_2 - a_2 b_1)V_R^2}{b_1^2 + b_2^2} \end{aligned} \quad (5.13)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikteki reel ve imajiner kısımlar sırasıyla aktif ve reaktif güçlerdir.

$$P_R = \frac{V_S V_R (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) - (a_1 b_1 + a_2 b_2)V_R^2}{b_1^2 + b_2^2} \quad (5.14)$$

$$Q_R = \frac{V_S V_R (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - (a_1 b_2 - a_2 b_1)V_R^2}{b_1^2 + b_2^2} \quad (5.15)$$

Bu değerler ortaya konduktan sonra iki baralı bir sistem için Newton güç akışındaki jakobiyen matrisin tekilliğinden yararlanılarak kritik değerler belirlenir. Bunun için iki fonksiyon

$$f_1(V_S, V_R, \delta) = P_R - \frac{V_S V_R (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) - (a_1 b_1 + a_2 b_2)V_R^2}{b_1^2 + b_2^2} \quad (5.16)$$

$$f_2(V_S, V_R, \delta) = Q_R - \frac{V_S V_R (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - (a_1 b_2 - a_2 b_1) V_R^2}{b_1^2 + b_2^2} \quad (5.17)$$

olarak tanımlanır. Matrisel formda jakobiyen matrisi elde etmek için bu eşitlikler düzenlenirse

$$\begin{bmatrix} \Delta P_R \\ \Delta Q_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial \delta & \partial f_1 / \partial V_R \\ \partial f_2 / \partial \delta & \partial f_2 / \partial V_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V_R \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

şeklinde yazılabilir. Jakobiyen matrisin tekil olma şartı denklemin determinantının sıfır olmasıdır. Buna göre,

$$(\partial f_1 / \partial \delta) \cdot (\partial f_2 / \partial V_R) - (\partial f_2 / \partial \delta) \cdot (\partial f_1 / \partial V_R) = 0 \quad (5.19)$$

olmalıdır. Buradaki her bir terim

$$\frac{\partial f_1}{\partial \delta} = \frac{V_S V_R (-b_1 \sin \delta + b_2 \cos \delta)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial V_R} = \frac{V_S (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) + (a_1 b_1 + a_2 b_2) \cdot 2V_R}{b_1^2 + b_2^2} \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \delta} = \frac{V_S V_R (-b_2 \sin \delta - b_1 \cos \delta)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial V_R} = \frac{V_S (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) + (a_1 b_2 - a_2 b_1) 2V_R}{b_1^2 + b_2^2} \quad (5.23)$$

eşitlikleri ile bulunduktan sonra denklem 5.19'da yerine yazılırsa

$$V_S = 2 \cdot V_R (a_1 \cdot \cos \delta + a_2 \cdot \sin \delta) \quad (5.24)$$

ile verilen kritik noktada iletim hattının hat sonu ve hat başı gerilimleri arasındaki eşitlik elde edilir. Kritik iletim (yük) açısını belirlemek için, güç ifadelerinde  $V_S$  yerine  $V_R$  ve  $\delta$ 'ya bağlı ifadeler yazılır. Ayrıca aktif ve reaktif güç arasındaki

$$Q_R = P_R \tan \phi \quad (5.25)$$

bağıntısı kullanılarak kritik iletim açısının öncelikle,

$$\tan(2\mu) = \frac{a_1(b_2 - b_1 \tan \mu) + a_2(b_1 + b_2 \tan \mu)}{a_1(b_1 + b_2 \tan \mu) + a_2(-b_2 + b_1 \tan \mu)} \quad (5.26)$$

değeri bulunur. Daha sonra,

$$K_1 = a_1(b_2 - b_1 \tan \mu) + a_2(b_1 + b_2 \tan \mu) \quad (5.27)$$

$$K_2 = a_1(b_1 + b_2 \tan \mu) + a_2(-b_2 + b_1 \tan \mu) \quad (5.28)$$

kısaltmaları yapılarak kritik iletim (yük) açısı

$$\delta_{kritik} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( -\frac{K_2}{K_1} \right) \quad (5.29)$$

olarak bulunur. Bu eşitlik denklem 5.24'teki yerine yazılırsa

$$V_{kritik} = \frac{V_s}{2(a_1 \cos \delta_{kritik} + a_2 \sin \delta_{kritik})} \quad (5.30)$$

elde edilir. 5.24 ve 5.29 eşitliklerinin 5.14 denkleminde yerine yazılması ve

$$K_3 = b_1 \cos \delta_{kritik} + b_2 \sin \delta_{kritik} \quad (5.31)$$

$$K_4 = a_1 \cos \delta_{kritik} + a_2 \sin \delta_{kritik} \quad (5.32)$$

kısaltmaları ile hat sonundan çekilebilecek kritik güç değeri

$$P_{kritik} = \frac{V_s^2 (2K_3 K_4 - (a_1 b_1 + a_2 b_2))}{(b_1^2 + b_2^2) \cdot 4K_4} \quad (5.33)$$

olarak bulunur.

İncelediğimiz sistemin kritik değerlerini bulmak amacıyla bu denklemlere sistem parametreleri uygulanırsa, ilk olarak hat başı gerilimini referans olarak alınır.

$$V_s = V_s \angle 0 = 133,042 \angle 0 \text{ kV} \quad (5.34)$$

Buna göre hat sonu geriliminin yeni durumu

$$V_R = V_R \angle -\delta = 127,017 \angle -12,25 \text{ kV} \quad (5.35)$$

olur. İletim hattının denklemlerde kullanılan bileşenleri ise;

$$\begin{aligned} A &= a_1 + ja_2 = 0,941 + j0,007 \\ B &= b_1 + jb_2 = 18,9 + j155,6 \end{aligned} \quad (5.36)$$

şeklindedir.

Denklem 5.14 ve denklem 5.15'ten  $P_R$  ve  $Q_R$  değerleri aşağıdaki değerlerde bulunur.

$$\begin{aligned} P_R &= 23,017787 \text{ MW} \\ Q_R &= 5,766996 \text{ MVA} \end{aligned} \quad (5.37)$$

Bu iki güç değeri arasındaki 5.25 bağıntısından  $\varphi$  açısı

$$\begin{aligned} \tan\varphi &= 0,2505 \\ \varphi &= 14,06^\circ \end{aligned} \quad (5.38)$$

olarak bulunur. Bu değer denklem 5.26'da yerine konulursa,

$$\tan(2\delta) = 142,370619 / 53,39824427 = 2,666204 \quad (5.39)$$

sonucu elde edilir. Denklem 5.27 ve denklem 5.28'deki  $K_1$  ve  $K_2$  kısaltmaları

$$\begin{aligned} K_1 &= 142,370619 \\ K_2 &= 53,39824427 \end{aligned} \quad (5.40)$$

şeklinde yapıldıktan sonra kritik iletim (yük) açısı denklem 5.29'dan

$$\delta_{\text{kritik}} = 34,72^\circ \quad (5.41)$$

olarak bulunur. Bu değer bulunduktan sonra denklem 5.30'da yerine konularak kritik gerilim değeri elde edilir.

$$V_{R\text{kritik}} = 85,564 \text{ kV} \quad (5.42)$$

Hat sonundaki kritik gerilim değeri de bulunduktan sonra denklem 5.31 ve 5.32'deki  $K_3$  ve  $K_4$  kısaltmaları yapılarak

$$\begin{aligned} K_3 &= 104,1593086 \\ K_4 &= 0,777437469 \end{aligned} \quad (5.43)$$

Denklem 5.33'ten de hat sonundaki kritik güç değeri bulunur.

$$P_{R_{kritik}} = 42,637 \text{ MW} \quad (5.44)$$

Elde edilen bu kritik gerilim, yük açısı ve güç değerleri gerilim kararlılığı açısından hat sonundaki limit değerleri belirler. Bu kritik değerlerin ötesinde gerilim kararsızlığı görülmeye başlar ve çalışma noktası sistem P-V eğrisi üzerinde kararsız bölgeye kayar. Yapılan kumanda hareketlerine ya da sistemin kendi yapısının güçlülüğüne göre yeni bir kararlı çalışma noktası bulunması halinde sistem gerilim kararlılığı açısından kabul edilebilir sınırlara geri dönebilir. Elbette bu da bozucu etkinin tipi, süresi ve yeriyle de birinci dereceden ilgilidir.

İncelenen sistemin gerilim kararlılığı açısından kritik değerleri bu şekilde bulunduktan sonra bu kritik değerleri etkileyebilecek faktörler güç faktörü, hat uzunluğu, paralel hat sayısı, hat başı gerilimin büyüklüğü, seri kompanzasyon ve şönt kompanzasyon olarak sıralanabilir.

## 5.2 Güç Faktörünün Değişiminin Kritik Değerlere Etkimesi

Aynı iletim uzunluğu ve hat parametrelerine sahip bir iletim hattı sonundan aynı gerilim altında aynı yük değerlerini farklı güç faktörleriyle çekmek, sistemin gerilim kararlılık sınırlarını değiştirir. Buna göre endüktif durumdan kapasitif duruma ilerleyen güç faktörü, gerilim kararlılığını olumlu etkiler. Tam güç faktörü değerine yakın bir güç faktörü, gerilim kararlılığının sınırlarını genişletmesi açısından tercih edilir.

İncelenen sistemin iletim hattı, hat sonu gerilimi ve çekilen güç değerleri aynı tutularak  $\cos\phi=1$ ,  $\cos\phi=0,97$  (yukarda hesaplanan durum),  $\cos\phi=0,95$  ve  $\cos\phi=0,80$  değerleri için yeni gerilim kararlılık limitlerini elde etmek istenirse; öncelikle aynı güç değerleri farklı güç faktörlerinde çekildiğinden yeni yük akımları bulunur.  $P_1$  yükü ile gösterilen yük tipinde akım güç faktörüne bağlı olarak değişirken,  $P_2$  ile gösterilen sabit MVA tipi yükte akımlar aynı

kalmaktadır. Toplam  $I_R$  yük akımı, bu iki tip yük akımlarının da toplamıdır.  $I_R$  akımlarındaki bu değişimlere bağlı olarak denklem 5.1'den görüldüğü üzere  $V_S$  hat başı gerilimleri de değişir.

Bu güç faktörü değerleri için yeni yük akımları, toplam hat sonu akımı  $I_R$  ve hat başı gerilimleri  $V_S$ 'nin yeni değerleri Tablo 5.1'de gösterildiği gibidir.

$\cos\phi$	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_R$ (A)	$V_S$ (kV)
1	104,9∠0	78,7∠0	183,6∠0	126,469∠13,46
0,97	108,2∠-14,06	78,7∠-14,06	186,9∠-14,06	133,042∠12,25
0,95	110,5∠-18,19	78,7∠-18,19	189,2∠-18,19	134,986∠11,85
0,80	131,2∠-36,86	78,7∠-36,86	209,9∠-36,86	144,398∠9,82

**Tablo 5.1 Aynı iletim hattı, hat sonu gerilim ve güç değerleri için yeni akım ve hat başı gerilim değerleri.**

Bu yeni değerlerin hesaplanmasının ardından  $\cos\phi=0,97$  olarak incelediğimiz sistemde olduğu gibi, gerilim kararlılığı açısından kritik değerleri aynı yoldan hesaplayabiliriz. Jakobiyen matrisin tekilliğe ulaştığı veya ıraksadığı noktalar bulunarak kritik değerler elde edilirse güç faktörü değişiminin gerilim kararlılığını nasıl etkilediği de ortaya konur. Bu değişimin kritik değerlere yansımaları aşağıdaki Tablo 5.2'de verilmektedir.

$\cos\phi$	$P_R$ (MW)	$Q_R$ (MVar)	$\phi$ (°)	$\delta_{kritik}$ (°)	$V_{Rkritik}$ (kV)	$P_{Rkritik}$ (MW)
1	23,304819	0,003675	0,009	41,74	89,464	48,0523
0,97	23,017787	5,766996	14,06	34,72	85,564	42,6370
0,95	22,813065	7,503224	18,20	32,65	84,781	40,9942
0,80	21,319914	15,988928	36,86	23,32	83,284	33,3180

**Tablo 5.2 Değişik  $\cos\phi$  değerleri için sistemin gerilim kararlılığı açısından yeni kritik değerleri.**

Bu tablodan da anlaşılmaktadır ki endüktif olan bu güç faktörleri değerleri tam güç değerinden uzaklaştıkça hat sonundaki kritik gerilim ve kritik güç değerleri düşmektedir. Bu da gerilim kararlılığı limitlerinin gitgide artması anlamına gelir ki olumsuz olan bu durumda

kalmamak için daha büyük güç faktörleri tercih edilir. Reaktif güç ihtiyaçları da gözönünde bulundurulduktan sonra mümkün olabilecek en büyük güç faktörü gerilim kararlılığı açısından tercih edilendir.

### 5.3 İletim Hattı Uzunluğunun Değişiminin Kritik Değerlere Etkimesi

Gerilim kararlılığına etki eden faktörlerden biri de iletim hattının uzunluğudur. Kilometre başına hat parametrelerinin değişmediği bir durumda hattın uzunluğunun değiştiğini ele almak toplam hat parametrelerini değiştireceğinden kritik değerlerin hesaplanmasında kullanılan pek çok parametre de değişir. Bu da hat uzunluğunun gerilim kararlılığı limitlerini direkt olarak değiştirdiğini gösterir.

İlk olarak incelediğimiz ve kritik değerlerini bulduğumuz ve parametreleri  $Z=18,9+j155,6=156,7\angle 83,07^\circ$  ,  $Y=j0,000758=0,000758\angle 90^\circ$  olan iletim hattının uzunluğu 200 km idi. Buna göre km başına hat parametreleri

$$R=18,9/200=0,0945 \Omega/\text{kmfaz}$$

$$X_L=155,6/200= 0,778 \Omega/\text{kmfaz}$$

$$1/X_C=0,000758/200= 0,00000379 \text{ mho/kmfaz}$$

olarak hesaplanabilir. Bunun ardından iletim hattı uzunluğunun, gerilim kararlılık limitlerine olan etkilerini göstermek amacıyla  $l=220$  km.,  $l=150$  km. ve  $l=100$  km. uzunluğundaki iletim hatlarının parametreleri bulunabilir. Örneğin 220 km.'lik hat uzunluğu için iletim hattı direnci  $0,0945 \times 220=20,79 \Omega$  olarak tek faz için hesaplanabilir. Bu şekilde yapılmış hesaplamaların ardından ilk olarak hesapladığımız 200 km.'lik hattın parametrelerini de içeren 4 farklı uzunluktaki iletim hattı için hat parametreleri ve simetrik  $\Pi$  devre sabitleri ile hat başı gerilimleri Tablo 5.3'te görüldüğü gibi elde edilir.

I	Z	Y	$A=1+Z.Y/2$	$B=Z$
220 km.	20,79+j171,1	$j833,8.10^{-6}$	0,928∠0,53	172,3∠83,07
200 km.	18,9+j155,6	$j758.10^{-6}$	0,941∠0,43	156,7∠83,07
150 km.	14,17+j116,7	$j568,5.10^{-6}$	0,966∠0,23	117,5∠83,07
100 km.	9,45+j77,8	$j379.10^{-6}$	0,985∠0,10	78,3∠83,07

I	$A=a_1+ja_2$	$B=b_1+jb_2$	$V_s$ (kV)
220 km	0,928+j0,008	20,79+j171,1	133,099∠13,15
200 km.	0,941+j0,007	18,9+j155,6	133,042∠12,25
150 km.	0,966+j0,004	14,17+j116,7	132,241∠9,1
100 km.	0,985+j0,001	9,44+j77,7	131,09∠6,7

**Tablo 5.3 km.-faz başına aynı hat parametrelerine sahip 4 farklı uzunluktaki iletim hattı için hat ve simetrik II devre parametreleri.**

Devre parametreleri ve hat başı gerilimi bu şekilde hesaplanarak ortaya konan 4 farklı uzunluktaki iletim hattı için hat sonu gerilim, güç ve  $\cos\phi=0,97$  değerleri ilk incelenen sistemle aynı alınarak, yeni gerilim kararlılık kritik değerleri aynı formüllere yeni iletim hattı parametreleri konarak uygulanırsa elde edilebilir. Bu yolla hesaplanarak elde edilen kritik değerler Tablo 5.4'te gösterilmiştir.

I (km)	$P_R$ (MW)	$Q_R$ (MVar)	$\phi$ (°)	$\delta_{kritik}$ (°)	$V_{Rkritik}$ (kV)	$P_{Rkritik}$ (MW)
220	23,0136	5,7776	14,09	34,73	86,739	39,2891
200	23,0177	5,7669	14,06	34,72	85,564	42,6370
150	22,9143	5,7923	14,18	34,56	82,878	54,7203
100	25,4284	5,2198	11,60	35,76	81,943	82,7711

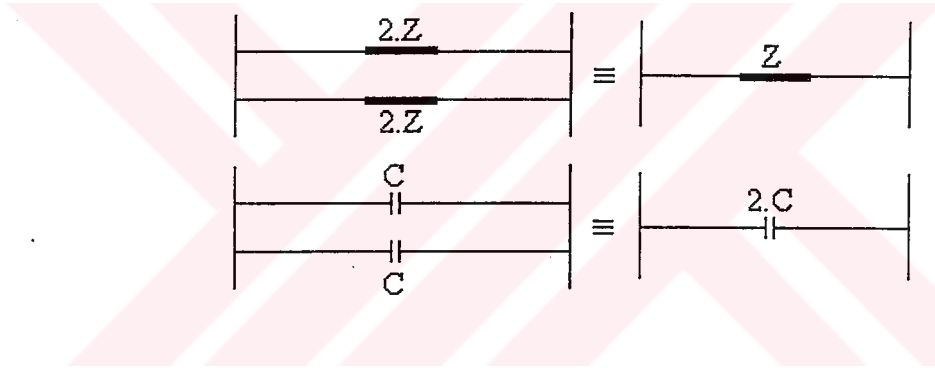
**Tablo 5.4 Aynı hat sonu gerilim, güç ve  $\cos\phi=0,97$  değerleri için 4 farklı uzunluktaki iletim hattının gerilim kararlılığı açısından kritik değerleri.**

Tablodan da görüldüğü üzere iletim hattının uzunluğu arttıkça, kritik değerlerin sistemi gerilim kararlılığı açısından sınırlaması da artmaktadır. Buna göre üretim merkezine daha yakın olan yüklerin gerilim kararlılığı limitleri daha geniştir. Zorunlu durumların sözkonusu

olmadığı hallerde iletim hattının nispeten daha kısa olması gerilim kararlılığı açısından tercih edilendir.

#### 5.4 Paralel Hat Sayısının Değişiminin Kritik Değerlere Etkimesi

Bir iletim hattı üzerinden iki nokta arasındaki güç iletiminin maksimum değerinde iletim hattının reaktansının etkili olduğu bilinmektedir. Buna göre iletim hattının reaktansının düşürülmesi iletilen maksimum gücü artırmaktadır. İletim hattının reaktansının düşürülmesinin bir yolu da paralel hat kullanmaktır. İki paralel iletim hattının eşdeğer empedansına  $Z$  dersek bu paralel hatlardan birinin devre dışı olması durumunda tek hattın toplam empedansı  $2Z$  olacaktır. Hattın kapasitesi ise  $2C$ 'den  $C$ 'ye düşer.



Şekil 5.4. Paralel hatların empedans ve kapasite eşdeğerleri.

İletilen maksimum güç değerinde önemli bir belirleyici faktör olan paralel hat sayısı gerilim kararlılığını da etkiler. Bu etkiyi göstermek için ilk başta incelediğimiz sistemin iletim hattı parametreleri olan  $Z=18,9+j155,6$ ,  $Y=j0,000758$  değerlerinin paralel iki iletim hattının eşdeğer değerleri olduğunu kabul edersek, bu iki paralel iletim hattından birinin devre dışı olup, tek hat üzerinden aynı hat sonu geriliminde, aynı  $\cos\phi$  ve aynı yük değerleriyle sistem işlediğinde gerilim kararlılığı açısından kritik değerlerin değişimi, paralel hat sayısının gerilim kararlılığına etkisini verir.

Buna göre ilk iletim hattı parametrelerine sahip iki paralel hattın tek devre durumuna geçmesi halinde iletim hattı parametreleri,

$$Z=2 \times (18,9 + j155,6) = 37,8 + j311,2 = 313,4 \angle 83,07^\circ \text{ ohm.}$$

$$Y = 0,5 \times j0,000758 = j0,000379 = 0,000379 \angle 90^\circ \text{ mho.} \quad (5.45)$$

şeklini alır. Bu değişim sonucunda iletim hattı parametreleri A ve B de değişir.

$$A = 1 + Z.Y/2 = 0,941 \angle 0,43^\circ$$

$$B = Z = 313,4 \angle 83,07^\circ \quad (5.46)$$

Denklem 5.1'den yeni hat başı gerilimi  $V_S$

$$V_S = A.V_R + B.I_R$$

$$V_S = (0,941 \angle 0,43^\circ \times 127,017 \angle 0^\circ) + (313,4 \angle 83,07^\circ \times 186,9 \angle -14,06^\circ)$$

$$V_S = 151,096 \angle 21,58^\circ \text{ kV.} \quad (5.47)$$

olarak bulunur. Görüldüğü üzere hattın çift devreden tek devre durumuna geçmesiyle aynı hat sonu gerilimi ve güç değerleri için daha yüksek bir hat başı gerilimi gerekmektedir. Kritik değerlerin elde edilmesinde kullanılan bu değerlerin bulunması ardından denklem 5.14 ile denklem 5.44 arasındaki prosedüre göre yerlerine konarak kritik değerler elde edilir. Elde edilen bu değerler, aşağıdaki tabloda iki paralel hat ile iletim durumundaki kritik değerlerle karşılaştırılacak biçimde gösterilmiştir.

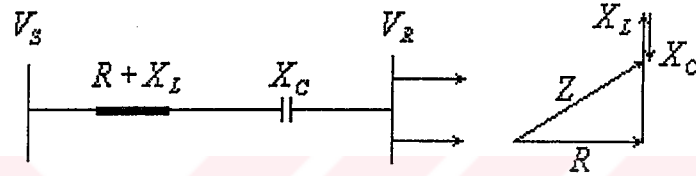
Hat Sayısı	$P_R$ (MW)	$Q_R$ (MVAr)	$\varphi$ (°)	$\delta_{\text{kritik}}$ (°)	$V_{R\text{kritik}}$ (kV)	$P_{R\text{kritik}}$ (MW)
Çift	23,017787	5,766996	14,06	34,72	85,564	42,6370
Tek	23,026175	5,818779	14,18	34,66	97,209	27,4722

**Tablo 5.5 Aynı hat sonu gerilim,  $\cos\varphi=0,97$  ve yük değerleri için iki paralel hatla iletim ile tek hatla iletim durumlarında kritik değerlerin değişimi.**

Tablodan da görülmektedir ki paralel hat sayısının artmasıyla gerilim kararlılığı olumlu etkilenmektedir. Tek hatla iletim durumunda hat sonundaki kritik gerilimin çift hat durumuna göre artması ve kritik güç değerinin düşmesi bunu iyi şekilde ortaya koymaktadır.

### 5.5 Seri Kompanzasyonun Kritik Değerlere Etkimesi

Bir enerji sisteminde iletim hattının reaktansı güç iletiminde olduğu gibi gerilim kararlılığında da önemli bir yer tutar. İletim hattı reaktansını azaltmanın bir yolu da, iletim hattı üzerine seri kapasitörler yerleştirilerek endüktif reaktansı kompanze etmektir. Bu kompanzasyon endüktansı istenilen oranda azaltılabileceği gibi tamamen de etkisini yok edebilir. Fakat %100 oranda kompanzasyon yapılması en ufak bir bozucu etki ardından büyük genlikli arıza akımlarına sebep olabileceğinden uygulanabilir değildir. Kompanzasyon olayının hat reaktansına etkisi Şekil 5.5'te gösterildiği gibidir.



Şekil 5.5 Seri kompanzasyonun iletim hattı endüktansına etkimesi ve fazör diyagramı.

Seri kompanzasyonun iletim hattı reaktansını bu şekilde etkilemesi yine maksimum güç iletimini olduğu gibi gerilim kararlılığını da etkileyecektir. Bu etkinin ne şekilde ve hangi oranda olduğunu görmek için iletim hattı endüktif reaktansının 4 farklı yüzdesi oranında kompanzasyon yapılması hali incelenmiştir.

Temel olarak alınan sistem yine ilk incelenen sistem parametreleridir ( $Z=18,9+j155,6$ ). Buna göre %20, %30, %40 ve %50 oranlarında kompanzasyon yapılmasına dair iletim hattı parametreleri şu şekildedir.

Kompanzasyon oranı	$X_L$ ( $\Omega$ )	$X_C$ ( $\Omega$ )	$X_L-X_C$ ( $\Omega$ )	$Z$ ( $\Omega$ )	$Y$ (mho)
%0	j155,6	0	j155,6	156,7 $\angle$ 83,07	0.000758 $\angle$ 90
%20	j155,6	j31,1	j124,5	125,9 $\angle$ 81,3	0.000758 $\angle$ 90
%30	j155,6	j46,6	j109	110,6 $\angle$ 80,1	0.000758 $\angle$ 90
%40	j155,6	j62,2	j93,4	95,2 $\angle$ 78,5	0.000758 $\angle$ 90
%50	j155,6	j77,8	j77,8	80 $\angle$ 76,3	0.000758 $\angle$ 90

Tablo 5.6 Dört farklı kompanzasyon değeri için seri kapasitör, kompanzasyon ardından endüktif reaktans ve toplam hat reaktansı değerleri.

Bu değerlerin elde edilmesi ardından simetrik  $\Pi$  devresinin A ve B katsayıları ile  $V_S$  hat başı gerilimleri denklem 5.3 ve 5.1'den hesaplanabilir. Her kompanzasyon oranında da hat sonu gerilim ilk örnekte olduğu gibi  $127.017 \text{ kV}$ ,  $\cos\phi=0,97$  ve çekilen yük akımı  $I_R=186,9 \angle -14,06^\circ \text{ A}$ 'dir. Buna göre:

Kompanzasyon oranı	$A=1+Z.Y/2$	$B=Z$	$A=a_1+ja_2$	$B=b_1+jb_2$	$V_S \text{ (kV)}$
%0	$0,941 \angle 0,43^\circ$	$156,7 \angle 83,07^\circ$	$0,941+j0,007$	$18,9+j155,6$	$133,042 \angle 12,25^\circ$
%20	$0,952 \angle 0,43^\circ$	$125,9 \angle 81,3^\circ$	$0,952+j0,007$	$18,9+j124,5$	$131,97 \angle 9,86^\circ$
%30	$0,958 \angle 0,43^\circ$	$110,6 \angle 80,1^\circ$	$0,957+j0,007$	$18,9+j109$	$131,572 \angle 8,65^\circ$
%40	$0,964 \angle 0,42^\circ$	$95,2 \angle 78,5^\circ$	$0,963+j0,007$	$18,9+j93,4$	$131,217 \angle 7,42^\circ$
%50	$0,97 \angle 0,42^\circ$	$80 \angle 76,3^\circ$	$0,97+j0,007$	$18,9+j77,8$	$130,932 \angle 6,19^\circ$

**Tablo 5.7 Dört farklı kompanzasyon oranı için simetrik  $\Pi$  devre sabitleri ve hat başı gerilimleri.**

Tablodan görüldüğü üzere kompanzasyon oranı arttıkça hat başı gerilimi düşmektedir ve aynı hat sonu geriliminde aynı güçler daha küçük yük açılarıyla iletilebilmektedir.

Bu kompanzasyon oranlarının gerilim kararlılığı kritik değerlerine nasıl etkideği Tablo 5.7'deki değerlerin denklem 5.14-5.44 arasındaki prosedüre göre kullanılarak kritik değerlerin bulunmasıyla görülür. Bu işlemin yapılması ardından ortaya çıkan değerleri gösteren tablo aşağıdaki gibidir.

Kompanzasyon oranı	$P_R$ (MW)	$Q_R$ (MVar)	$\phi$ (°)	$\delta_{\text{kritik}}$ (°)	$V_{R\text{kritik}}$ (kV)	$P_{R\text{kritik}}$ (MW)
%0	23,017787	5,766996	14,06	34,72	85,564	42,6370
%20	23,027276	5,788778	14,11	33,83	83,029	50,5424
%30	23,051448	5,931501	14,43	33,07	81,641	55,8396
%40	23,038908	5,946504	14,47	32,25	80,189	62,9220
%50	23,001195	5,778776	14,10	31,32	78,657	72,6967

**Tablo 5.8 Dört farklı kompanzasyon değeri ve ilk incelenen sistem için kritik gerilim kararlılık büyüklükleri.**

Tablonun da görüldüğü gibi kompanzasyon oranı arttıkça gerilim kararlılığı açısından kritik değerler olumlu yönde etkilenmektedir. %50 kompanzasyon durumunda kritik gerilim  $78,657$

kV iken kritik güç değeri 72,696 MW'tır. Oysaki kompanzasyonun olmadığı durumda kritik gerilim 85,564 kV, kritik güç de sadece 42,637 MW'tı.

Sonuç olarak seri kompanzasyon yapmanın gerilim kararlılığını olumlu etkilediği söylenebilir.

### 5.6 Hat Kayıp Faktörünün Kritik Değerlere Etkimesi

Kayıp faktörü iletim hattının kendi karakterine bağlı bir büyüklüktür. İletim hattının omik direnci ile endüktif reaktansı arasındaki oran olarak tarif edilir. Buna göre kayıp faktörü  $\tan\alpha=R/X_L$  oranı değiştiğinde gerilim kararlılığı açısından kritik değerleri belirleyen büyüklükler de değişir. Bu büyüklükler devre sabitleri  $A=a_1+ja_2$ ,  $B=b_1+jb_2$  ve dolayısıyla da hat başı gerilimidir. Kayıp faktörünün değişimi, endüktif reaktans  $X_L$ 'nin değişimiyle gerçekleşeceğinden yukarıda anlatılan seri kompanzasyon olayı da aslında kayıp faktörünün değişimini ve bunun etkilerini ortaya koyar. Her farklı kompanzasyon oranında endüktif reaktansın değeri de değiştiğinden hat kayıp faktörü de değişmiş olur. Buna göre yukarıdaki sistemler ve kompanzasyon oranları için kayıp faktörünün değişimi Tablo 5.9'daki gibidir.

R ( $\Omega$ )	$X_L$ ( $\Omega$ )	Kayıp faktörü $\tan\alpha=R/X_L$	$\delta_{\text{kritik}}$ ( $^\circ$ )	$V_{R\text{kritik}}$ (kV)	$P_{R\text{kritik}}$ (MW)
18,9	155,6	0,00211	34,72	85,564	42,6370
18,9	124,5	0,00264	33,83	83,029	50,5424
18,9	109	0,00302	33,07	81,641	55,8396
18,9	93,4	0,00353	32,25	80,189	62,9220
18,9	77,8	0,00423	31,32	78,657	72,6967

**Tablo 5.9 Beş farklı endüktif reaktans değeri için hat kayıp faktörünün değişimi ve bunlara ait kritik gerilim kararlılığı değerleri. ( $V_R$ ,  $\cos\phi$  ve  $I_R$  değerleri yukarıdaki örneklerle aynıdır.)**

### 5.7 Hat Başı Gerilimin Gerilim Kararlılığına Etkisi

Gerilim kararlılığını ve güç iletimini etkileyen en önemli faktörlerden biri de hat başı gerilimin genliğidir. Hat sonunda sağlıklı bir gerilimin korunması iletim hattı parametreleri ile ilgili olduğu kadar hat başı gerilimin değeri ile de alakalıdır. Bir bozucu etki ardından hat sonunda gerilimin artırılması gerektiğinde bunun temin edilmesinin bir yolu da hat başı geriliminin artırılmasıdır. Hat başı geriliminin artırılması gerilim kararlılığını olumlu yönde etkilemektedir.

Gerilim kararlılığını ve kritik değerlerini etkileyen tüm bu faktörleri incelemenin ardından tam güç faktörüne yaklaşan endüktif güç faktörlerinin, daha kısa iletim hatlarının, daha fazla sayıda paralel hattın, iletim hatlarında seri kompanzasyon yapmanın ve daha yüksek hat başı gerilimlerinin gerilim kararlılığını olumlu etkilediği görülmüştür. Bunların enerji sisteminin gereklerini sağladıktan sonra mümkün olduğunca gerçekleştirilmesi gerilim kararlılığı açısından sağlıklı bir sistem ortaya koyabilir.

### 5.8 Çatallaşma Durumunda Kaos Analizi

Enerji sistemlerinde kaos olaylarının meydana gelmesi, sistemin dinamikleri ile ilgili bir olaydır. Üretim kaynağı, iletim hattı ve yüklerden oluşan sistemde dinamik çatallaşma durumunu göstermek için, sistemi yöneten durum denklemlerinin bilinmesi gereklidir. Burada çatallaşmadan kastedilen, sistemin denge noktası sayısının değişmesidir.

4. Bölüm'de bahsedilen P-V eğrilerinde, sistemin her güç değerine karşılık iki gerilim değerinin mevcut olduğu ve bunlardan birinin kararlı, diğerinin kararsız denge noktaları olduğundan sözedilmişti. Çatallaşma olarak adlandırılan, bu iki denge noktasına sahip sistemin kritik güç değerine ulaştığında, bir tek denge noktasına sahip olacak şekilde gelişmesidir.

Sayısal uygulamada incelediğimiz sistemin kritik değerlerinde, denge noktası sayısı ikiden bire inerek sistem çatallaşmaya uğrayacaktır. Sistemin durum değişkenlerinin bu noktadaki değişimleri de kaos durumunu ortaya koyacaktır.

Bu dinamik çatalaşma halini göstermek ve sistemin durum denklemlerini elde etmek için, 40 MW'lık motor yükü ve 30 MVA'lık sabit akım yükünden oluşan toplam sistem yükü aşağıdaki şekilde modellenir (Chiang, Dobson ve Thomas, 1990).

$$P=P_1+P_2+K_{pw} \cdot \dot{\delta}+K_{pv} \cdot (V_R+T \cdot \dot{V}_R) \quad (5.48)$$

$$Q=Q_1+Q_2+K_{qw} \cdot \dot{\delta}+K_{qv} \cdot V_R+K_{qv2} \cdot V_R^2 \quad (5.49)$$

Bu modelde  $P_1$  ve  $Q_1$  motorun,  $P_2$  ve  $Q_2$  de sabit akım yükünün aktif ve reaktif güçleridir.

Generatör dinamikleri aşağıdaki dalga denklemiyle tanımlanmıştır. Denklemdaki  $M$ ,  $D_m$  ve  $P_m$  sırasıyla generatör atalet momenti, damping katsayısı ve mekanik güçtür.

$$M \cdot \ddot{\delta}_s + D_m \cdot \dot{\delta}_s = P_m + V_R \cdot I_s \cdot \sin(\delta - \varphi_s) + V_s \cdot I_s \cdot \sin \varphi_s \quad (5.50)$$

Yüke sistem tarafından uygulanan yükler

$$P = -V_R \cdot I_s \cdot \sin(\delta + \theta) + A \cdot V_R^2 \cdot \sin \varphi \quad (5.51)$$

$$Q = V_R \cdot I_s \cdot \cos(\delta + \theta) - A \cdot V_R^2 \cdot \cos \varphi \quad (5.52)$$

biçimindedir. Sistemin dinamikleri ise aşağıdaki dört diferansiyel denklem ile ifade edilebilir.

$$\dot{\delta}_s = \omega \quad (5.53)$$

$$M \cdot \dot{\omega} = -D_m \cdot \omega + P_m + I_s \cdot V_R \cdot \sin(\delta - \theta) + V_s \cdot I_s \cdot \sin \theta \quad (5.54)$$

$$K_{qw} \cdot \dot{\delta} = -K_{qv2} \cdot V_R^2 - K_{qv} \cdot V_R + Q - Q_1 - Q_2 \quad (5.55)$$

$$T \cdot K_{qv} \cdot K_{pv} \cdot \dot{V}_R = K_{pw} \cdot K_{qv2} \cdot V_R^2 + (K_{pw} \cdot K_{qv} - K_{qv} \cdot K_{pv}) \cdot V_R + K_{qv} \cdot (P - P_1 - P_2) - K_{pw} \cdot (Q - Q_1 - Q_2) \quad (5.56)$$

Bu dört diferansiyel denklemde sistemin durum değişkenleri generatör faz açısı  $\delta_s$ , rotor hızı  $\omega$ , yük geriliminin açısı  $\delta$  ve yük geriliminin genliği  $V_R$ 'dir. Denklemlerde üzeri noktalı olan ifadeler zamana göre türevli olan ifadelerdir. Bu denklemlerde kullanılacak yük, şebeke ve generatör değerleri Tablo 5.10'daki değerlerdedir.

$K_{pw}=0,4$	$M=0,3$
$K_{pv}=0,3$	$P_m=69,1$ MW
$K_{qw}=-0,03$	$P_1=42,6$ MW
$K_{qv}=-2,8$	$P_2=0$ MW
$K_{qv2}=2,1$	$Q_1=10,5$ MVar
$T=8,5$	$D_m=0,05$

**Tablo 5.10 Yük, şebeke ve generatör parametreleri.**

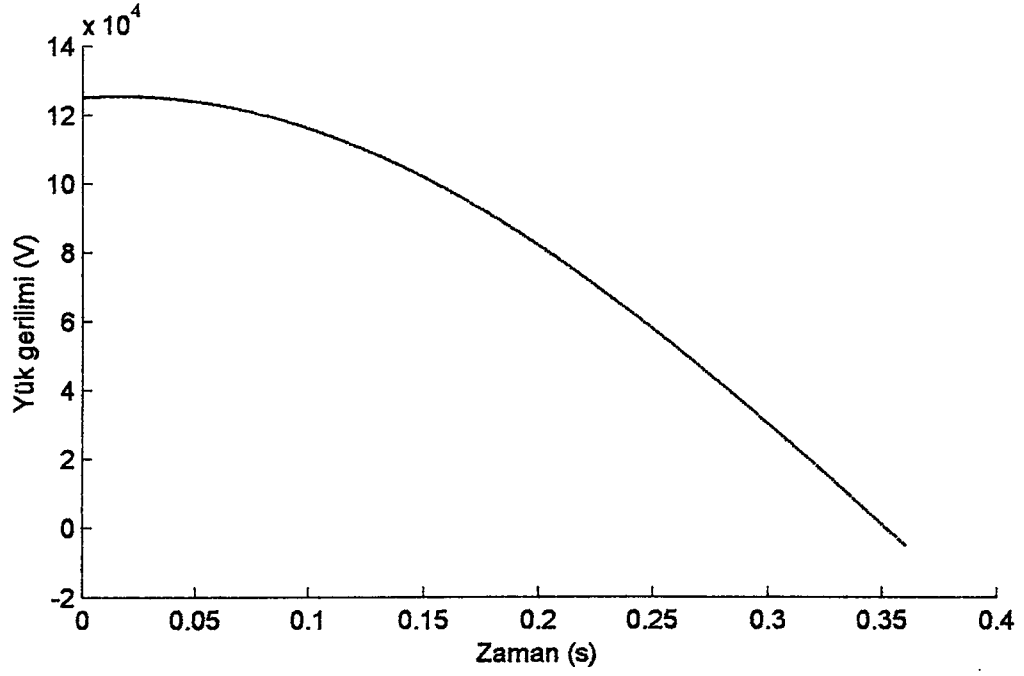
Buna göre, diferansiyel denklemlerde  $Q_2$  parametresi dışındaki bütün değerler sabit hale getirilerek  $Q_2$ 'nin değişimiyle çatallaşma durumuna erişilecektir. Çatallaşmanın meydana geldiği noktadaki  $Q_2$  reaktif güç değerini yaklaşık olarak bulmak için aşağıdaki formül kullanılır.

$$Q_2^* = \frac{(-K_{qv} + I_s)^2}{4 \cdot (K_{qv2} + A)} - Q_1 \quad (5.57)$$

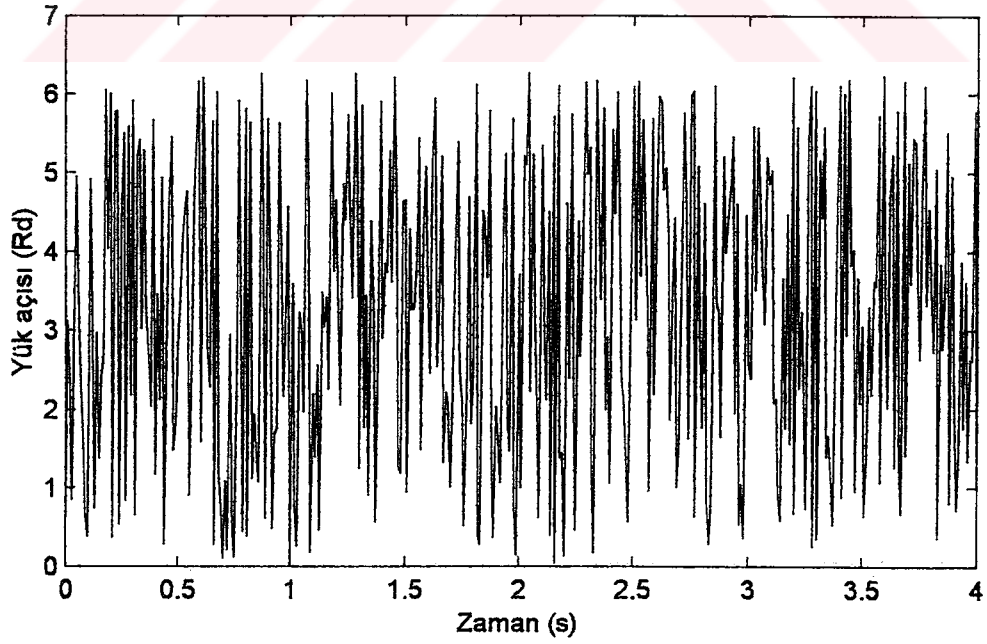
Bu reaktif güç değerinin söz konusu olduğu çatallaşma noktasındaki gerilim de

$$V_R^* = \frac{(-K_{qv} + I_s)}{2 \cdot (K_{qv2} + A)} \quad (5.58)$$

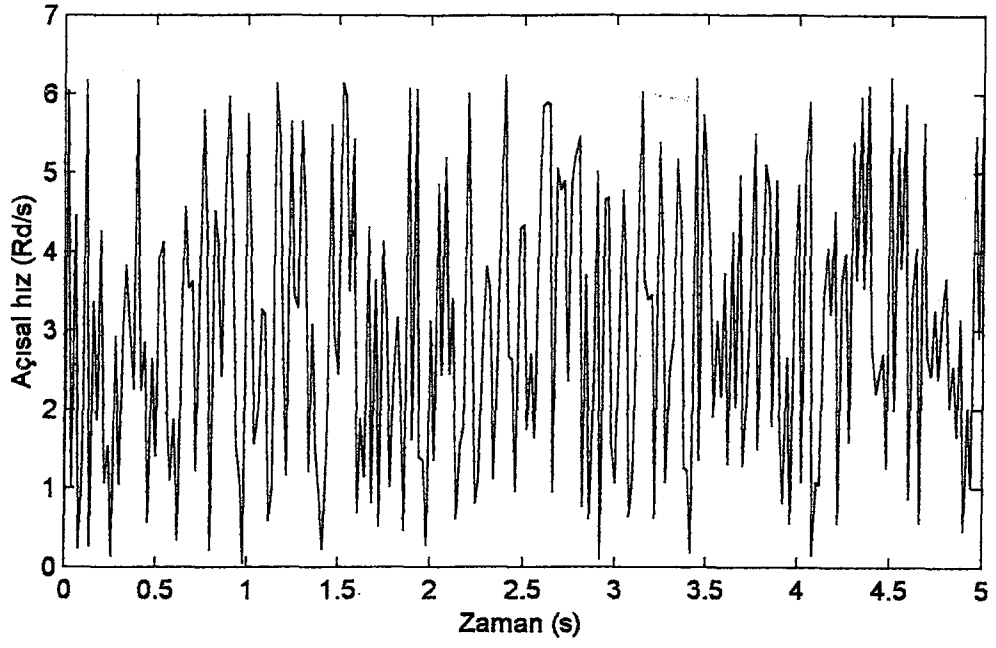
ifadesindedir. Bu formüllere göre elde edilen değerler, sistemin çatallaşma noktasını elde etmek için kullanılır. Çatallaşma denge noktası  $x=(\delta_s, \omega, \delta, V_R)=(0.35, 0.0, 0.14, 125e3)$  için durum değişkenlerinin zamanla ve birbirleriyle değişimleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere sistem parametrelerinin 3. Bölüm'de anlatılan kaos durumunda oldukları açıktır. Parametrelerin, durum uzayının belli bölgelerindeki belirgin yığılmaları sistemdeki bir karışıklığın belirtisidir. Bu yığılmada en önemli pay, uzayın o bölgesindeki yakınsakların çevredeki yörüngeleri kendine doğru çekmesi ve davranışlarını bozmasıdır. Sistem durum uzayında çatallaşmanın meydana geldiği noktada, kaos olayı gerçekleşmiştir.



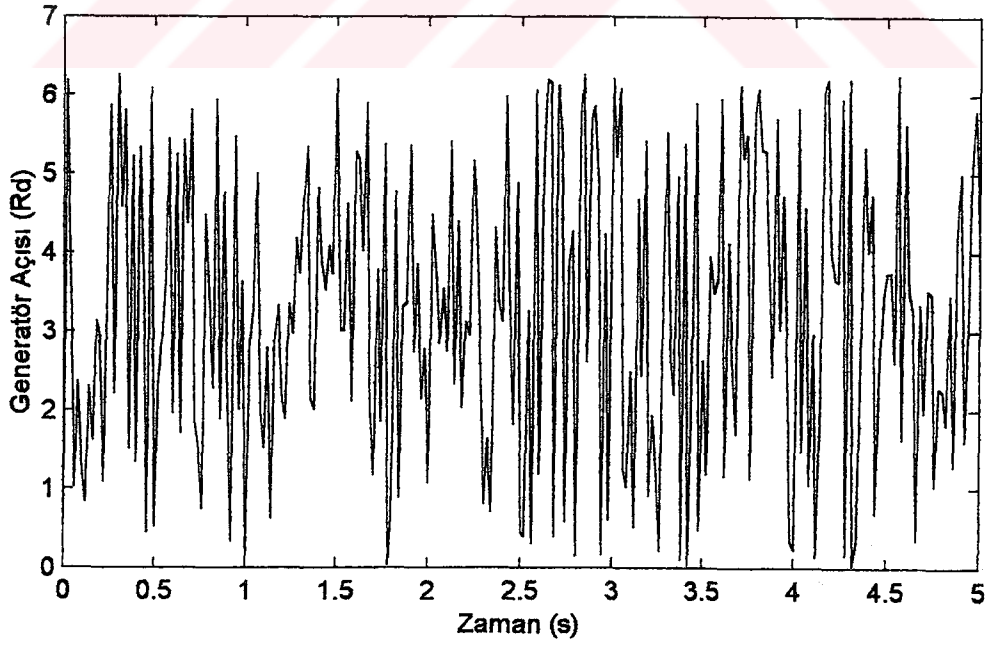
Şekil 5.6 Yük geriliminin zamana göre değişimi.



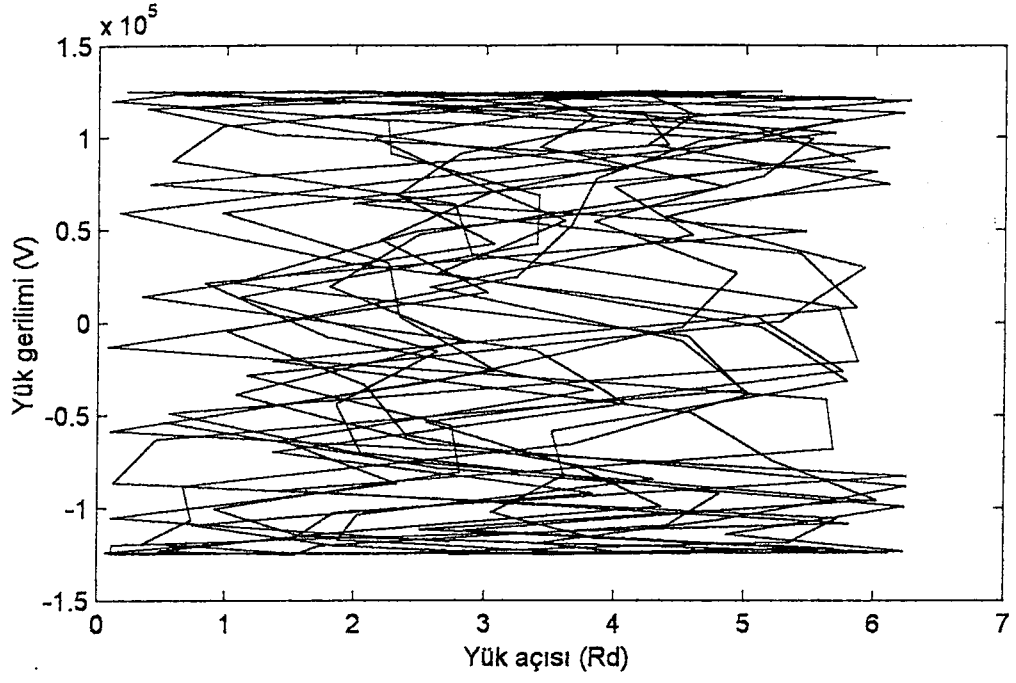
Şekil 5.7 Yük açısının zamana göre değişimi.



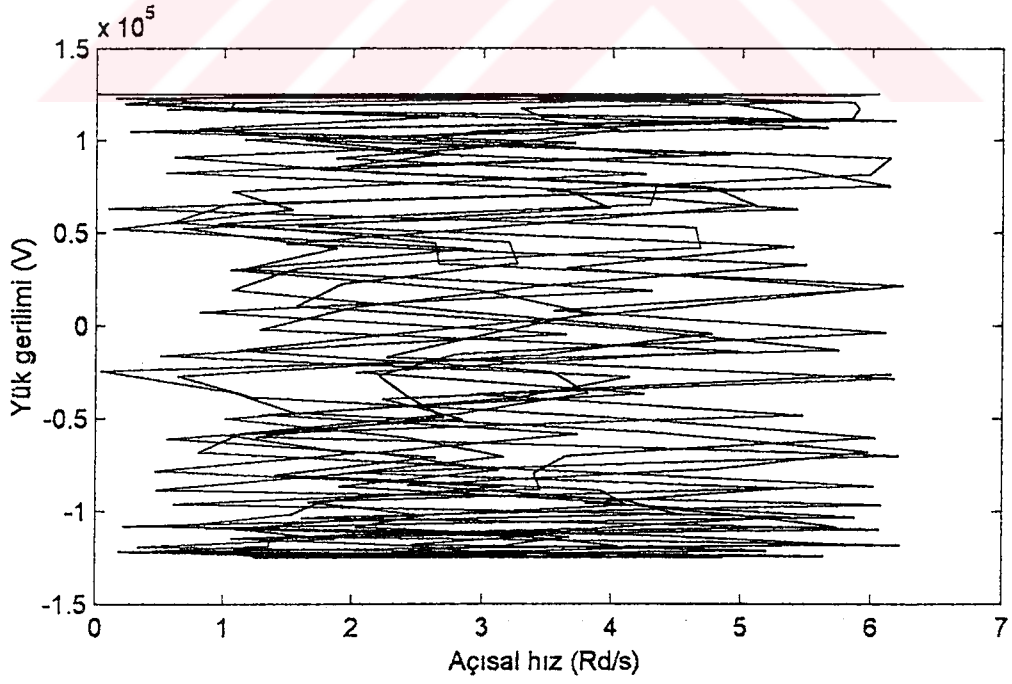
Şekil 5.8 Açısal hızın zamana göre değişimi.



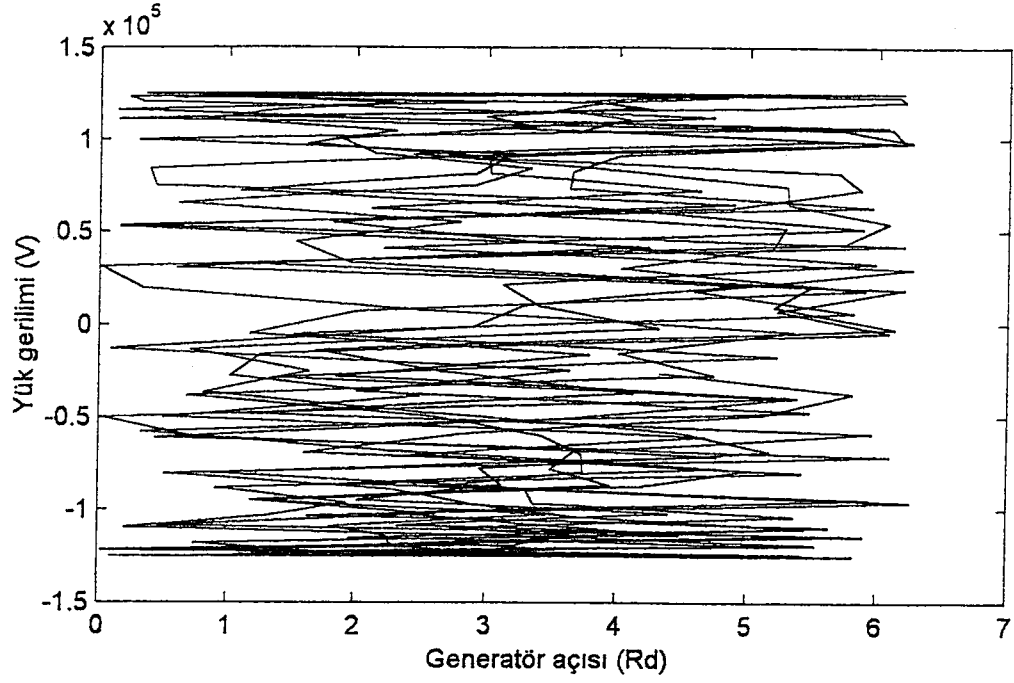
Şekil 5.9 Generatör açısının zamana göre değişimi.



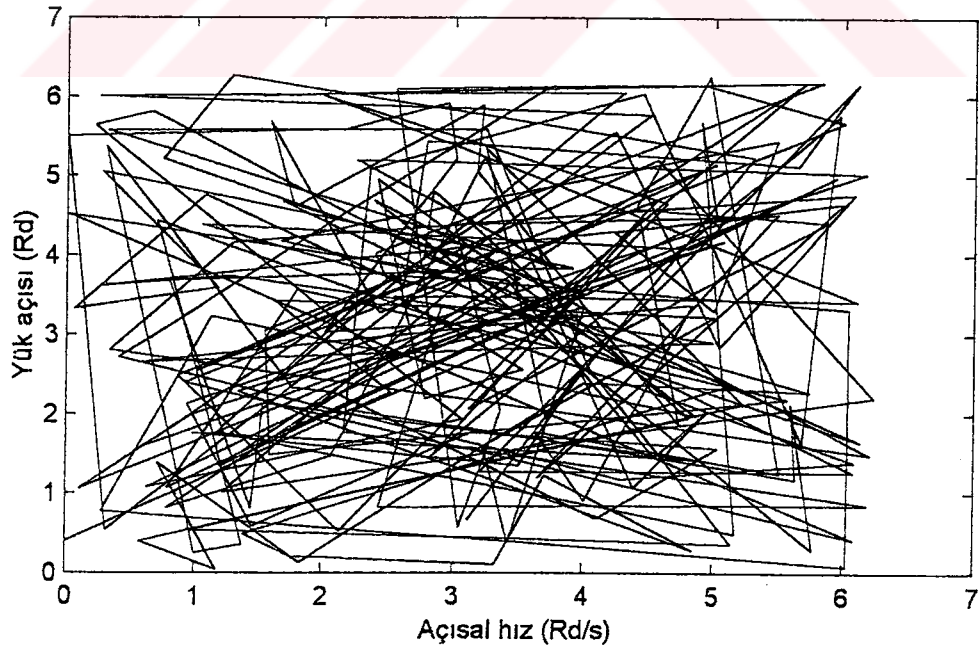
Şekil 5.10 Yük açısı ile yük gerilimi arasındaki kaos yakınsağı.



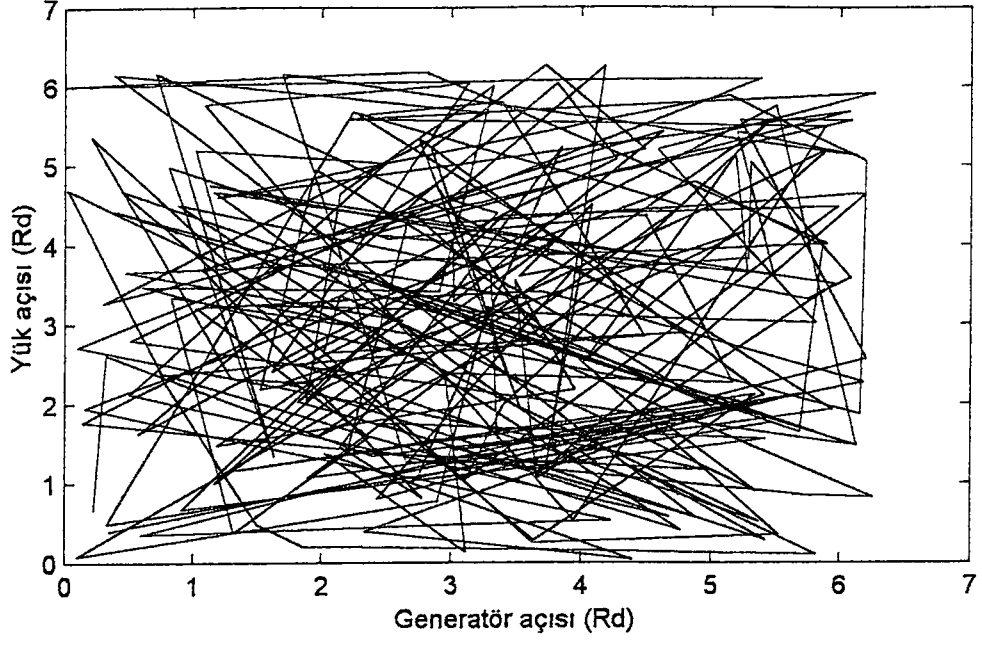
Şekil 5.11 Açısal hız ile yük gerilimi arasındaki kaos yakınsağı.



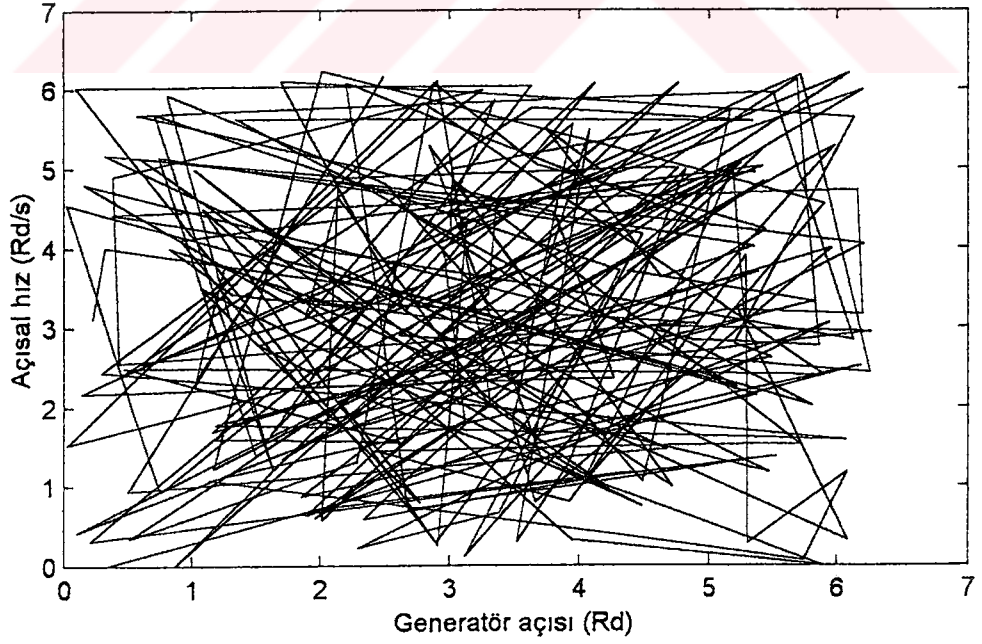
Şekil 5.12 Generatör açısı ile yük gerilimi arasındaki kaos yakınsağı.



Şekil 5.13 Açısal hız ile yük açısı arasındaki kaos yakınsağı.



Şekil 5.14 Generatör açısı ile yük açısı arasındaki kaos yakınsağı.



Şekil 5.15 Generatör açısı ile açısal hız arasındaki kaos yakınsağı.

## 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Gerilim kararlılığı temel olarak geçici ve uzun dönem gerilim kararlılığı olmak üzere iki sınıfta tanımlanır. Büyük güç sistemlerinde üretim, iletim ve dağıtım sistemlerini içeren gerilim kararlılığı hakkında üç anahtar konu şunlardır:

- 1) Güç şebekesinden görülen yük karakteristikleri
- 2) Şebekedeki generatörlerin gerilim kontrolleri için geçerli özellikler
- 3) Üretim noktasından yük bölgesine şebekenin güç transfer (özellikle de reaktif güç) kabiliyeti

İçerdiği konulardan en önemlisi olan yük karakteristikleri, sistemin davranışında birinci derece rol oynar. Gerilim kararlılığı konusunda karma yük karakteristikleri göz önüne alındığında, hem küçük hem de büyük bozucu etki gerilim kararlılıkları bozucu etki sonrası sistemde kararlı çalışma noktalarının varlığıyla mümkündür.

Yük statik bileşenler içerdiğinde kararlılık sınırları, sistem P-V eğrisinde maksimum güç noktasının ötesine genişler. Bu tarz yükler için kesin kararlılık sınırları, yükün statik bileşenini yansıtacak şekilde değiştirilmiş güç akış modelleriyle belirlenir.

Geçici sistem P-V eğrilerinin kullanımı, hızlı cevap veren yüklerin gerilim kararlılık analizlerinde faydalıdır. Gerilim kararlılığı konusunda bu tarz yükler için geniş kapsamlı analizlerin gerekliliği, sistem bileşenlerinin ayrıntılı sunumlarını zorunlu kılar.

Gerilim kararsızlığı konusunda özel bir problem olan motor yükleri de sınırlayıcı şartlar haline gelebilir. Birbirleriyle de kararsızlığa götürecek şekilde etkileşime giren motor yükleri sistemin gerilim çökmesine neden olabilir. Bu tarz kararsızlıkların belirlenmesi için ayrıntılı dinamik analizler gereklidir.

Pek çok gerilim çökmesi olayında gerilimin yavaşça azalarak sistemi çöküşe götürdüğü bir periyot söz konusudur. Yapılan çalışmada, sistemin kararlı hal durumundaki kritik değerleri elde edilmiş, bunun ardından çatallanma durumunda dinamik bir model kullanılmıştır.

Sistemin reaktif güç iletim kabiliyeti, çatallanma noktasına yakınlığı hakkında da bir fikir verebilir. Sistem parametreleri ile bu kabiliyetin sınırları da değişir. Elde edilen sonuçların gerçek sistemlere uygulanmasında, modellemedeki eksiklikler de göz önünde

bulundurulmalıdır. Bu çalışmada yük dinamikleri ve iletim hattı karakteristikleri ön planda tutulmuştur.

Sayısal uygulamada incelenen enerji sisteminin, gerilim kararlılığı açısından kararlı hal analizi sonucunda kritik güç ve gerilim değerleri elde edilmiştir. Ardından bu değerlere etki eden enerji sistemi parametreleri değiştirilerek etkilerinin ne yönde olduğu belirlenmiştir. Buna göre 1'e yaklaşan endüktif güç faktörlerinin, iletim hatlarının daha kısa tutulmasının, paralel hat sayısının artırılmasının, mümkün olduğu ölçüde iletim hattında seri, hat sonunda şönt kompanzasyon yapılmasının ve hat başı gerilimlerinin daha yüksek seçilmesinin kritik değerleri ne derecede iyi etkilediği gösterilmiştir.

Bu analizler sonrasında yükün dinamik modellenmesi, iletim hattı da dikkate alınarak yapılmış ve çatallanmaya uğrayan noktalarda sistemin düştüğü kaos durumunun eğrileri elde edilmiştir. Gerçek bir sistemde böyle bir duruma düşülmemesi, sistemin gerilim kararlılık profilinin çıkarılıp sistem parametrelerinin kontrol altında tutularak, önceden hesaplanmış çatallanma noktalarına yaklaşmayan bir bölgede seyretmesinin sağlanmasıyla mümkündür.

Sistem kararlı bir şekilde işlerken meydana gelen bir bozucu etki ardından kararlı çalışmaya devam etmenin ancak bozucu etki sonrası sistemde kararlı bir çalışma noktasının varlığıyla mümkün olduğu önceden de belirtilmişti. Kararlı bir çalışma noktasının, sistemin temel bir parametresinin (örneğin reaktif güç) değişimi karşılığında çatallanmaya uğrayarak kaybolması, sistemin kaos yolundaki ilk adımı kabul edilebilir. Kaosa giden bu yola girildikten sonra sistemi, parametrelerini değiştirerek normal çalışma durumuna getirmek imkansızdır. Çünkü bu çatallanma noktası ardından sistemi yöneten denklemlerdeki bir parametrenin çok küçük bir değişimi, çalışma noktasını durum uzayında tahmin edilemeyecek bölgelere götürür. Böyle bir çalışma da kuşkusuz enerji sistemlerinin koruma elemanları tarafından sınırlıdır.

Enerji sisteminde, örneğin gerilim gibi bir parametrenin kabul edilebilir sınırlar dışına çıkması halinde, sistemin bu şartlarda çalışabilme süresi, koruma sistemlerinin duyarlılık ve hızı gibi faktörlerin sınırladığı bir zaman içerisinde bir takım manevralarla istenilen çalışma noktasını elde etme imkanı vardır. Bu manevraların da işe yaramaması durumunda, tüm sistem çöküşe uğramadan koruma sistemlerinin devreye girmesi ve ilgili yük bölgesini devreden çıkartmaya kadar giden tedbirleri alarak sistemi bir çatallanma noktasından uzak tutması gerekmektedir.

Enerji sistemlerinin daha planlanma aşamasında gerilim kararlılığı ile ilgili değerlendirmelerinin yapılarak şekillendirilmesi, sonuç olarak ortaya sağlıklı bir kararlılık ve güvenli bir gerilim profili koyar. Yük gruplarının tiplerine göre sınıflandırılması, benzer dinamiklere sahip üretim birimlerinin birbirlerine yakın çalıştırılarak ortak bir bölgeyi beslemesi, iletim hattı uzunluklarının ve etkilerinin göz önüne alınması bu yöndeki belirleyici çalışmalardır.

Bu tip çalışmalar sonucunda ortaya konulan bir enerji sistemi, bozucu etkilere karşı daha iyi tepkiler verir. Bunda kuşkusuz tek yük tipinin dinamiklerinin de aynı olması büyük rol oynar. Farklı yük tiplerinin bulunması, dinamiklerinin farklı olması sebebiyle sistemin bozucu etkilere ve kritik değerlere yaklaşma durumuna vereceği cevabı olumsuz etkileyebilir.

Çalışmada yer alan sayısal uygulamada, iki farklı yük tipinin var olduğu durum incelenmiştir. Sabit akım ve sabit güç yükü tipinde olan bu yüklerin, sürekli hal durumunda sistem parametrelerinin değişimiyle kritik değerleri nasıl etkilediği gösterilmiştir. İki farklı tip yükün dinamik etkileri ise çatallanma sonrasında elde edilen kaos eğrileriyle görülmektedir. Gerçek enerji sistemlerinde de yük modellerinin mümkün olduğu kadar ayrıntılı ve iyi yapılması, daha sağlıklı bir gerilim kararlılığı analizi elde etmeye yarar.

## KAYNAKLAR

Abarbanel, H.D.I., (1996), Analysis of Observed Chaotic Data, Institute for Nonlinear Science, Springer, New York.

Banks, S.P., Salamcı M.U. ve Özgören M.K., (1999), "On the Global Stabilization of Nonlinear Systems via Switching Manifolds", TÜBİTAK Turkish Journal of Electrical Engineering, 7. No 1-3:1-17.

Barbier, C. ve Barret, J.P., (1980), "An Analysis of Phenomena of Voltage Collapse on a Transmission System", Revue Generale de l'electricite, T.89:672-690.

Canizares, C.A., (1995), "On Bifurcations, Voltage Collapse and Load Modeling", IEEE Transactions on Power Systems, 10, No 1:512-522.

Chiang, H.D., Dobson, I., Thomas, R.J., Thorp, J.S. ve Ahmed, L.F., (1990), "On Voltage Collapse in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, 5, No 2:601-611.

CIGRE Task Force 38-02-10, (1993), Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena.

Clark, H.K., (1992), "Voltage Stability: Criteria, Planning Tools, Load Modeling", EPRI/NERC Forum on Operational and Planning Aspects of Voltage Stability, Breckenridge, Colorado, 14-15 Eylül 1992.

Costi, A., (1986), "Power System Voltage Stability and Control", IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 3:1023-1027.

Çambel, A.B., (1993), Applied Chaos Theory a Paradigm for Complexity, Academic Press, Boston.

De Marco, C.L. ve Overbye T.J., (1990), "An Energy Based Security Measure for Assessing Vulnerability to Voltage Collapse", IEEE Transactions on Power Systems, 5, No 2:419-425.

Flatabo, N., Ognedal, N. ve Carlsen T., (1990), "Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods", IEEE Transactions on Power Systems, 5, No 4:1286-1293.

IEEE VAR Management Working Group Report, (1987), "Bibliography on Reactive Power and Voltage Control", IEEE Transactions on Power Systems, 2. No 2: 361-370.

Indulkar, C.S. ve Viswanathan, B., (1989), "Maximum Power Transfer Limited by Voltage Stability in Series and Shunt Compensated Schemes for AC Transmission Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, 4, No 2:1246-1252.

Kapitaniak, T., (1996), Controlling Chaos-Theoretical and Practical Methods in Nonlinear Dynamics, Harcourt Brace, London.

Kellert, S.H., (1993), In the Wake of Chaos:Unpredictable Order in Dynamical Systems, University of Chicago Press, Chicago.

- Kwatny, H.G., (1986), "Static Bifurcations in Electric Power Networks: Loss of Steady-State Stability and Voltage Collapse", IEEE Transactions on Circuits and Systems, CAS 33, No 10: 981-991.
- Löf, P.A., Smed, T., Andersson, G. ve Hill D.J., (1992), "Fast Calculation of a Voltage Stability Index", IEEE Transactions on Power Systems, 7, No 1:54-64.
- Machowski, J., Bialek, J.W. ve Bumby, J.R., (1997), Power System Dynamics Stability and Control, John Wiley, Chichester.
- Pal, M.K., (1992), "Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics", IEEE Transactions on Power Systems, 7, No 1:243-249.
- Praprost, K.L. ve Loparo, K.A., (1994), "An Energy Function Method for Determining Voltage Collapse During a Power System Transient", IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 41, No 10:635-651.
- Taylor, C.W., (1993), Power System Voltage Stability, Mc Graw-Hill, New York.
- Tranuchit, A., Ewerbring, L.M., Thomas, R.J., Duryea, R.A. ve Luk, F.T., (1988), "Towards a Computationally Feasible On-line Voltage Instability Index", IEEE Transactions on Power Systems, 3, No 2:669-675.
- Tranuchit, A. ve Thomas, R.J., (1988), "A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, 3, No 1:87-93.
- Tsonis, A.A., (1992), Chaos from Theory to Applications, Plenum Press, New York.
- Van Cutsem, T. ve Vournas C., (1998), Voltage Stability of Electric Power Systems, Kluwer Academic Publishers, Boston.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	31.07.1979	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1989-1995	Eminönü Cibali Lisesi
Lisans	1995-1999	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Eletronik Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1999-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Müh. Programı

