

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GERİLİM KARARLILIĞI İYİLEŞTİRİCİLERİNİN
ÇATALLAŞMA VE KAOTİK ANALİZLERİ**

DOKTORA TEZİ

Elk. Yük.Müh. Kadir ABACI

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet Ali YALÇIN

Mayıs 2007

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GERİLİM KARARLILIĞI İYİLEŞTİRİCİLERİNİN
ÇATALLAŞMA VE KAOTİK ANALİZLERİ


DOKTORA TEZİ

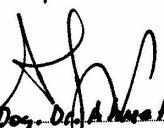
Elektrik Yük Müh. Kadir ABACI

Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
Bilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

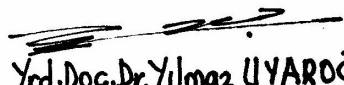
Bu tez 21/05/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. A. Çaptan Sönmez
Jüri Başkanı


Prof. Dr. M. M. YALÇIN
Jüri Üyesi


Yrd. Doç. Dr. A. Mustafa ÖMEN
Jüri Üyesi


Yrd. Doç. Dr. İbrahim Çengel
Jüri Üyesi


Yrd. Doç. Dr. Yılmaz UYAROĞLU
Jüri Üyesi

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında çalışmalarımı yönlendirerek beni destekleyen, başlangıcından bitimine kadar yardımlarını ve katkılarını esirgemeyen değerli hocam, Prof. Dr. Mehmet Ali YALÇIN'a, tüm içtenliği ile beni cesaretlendiren sayın Yrd. Doç Dr. Yılmaz UYAROĞLU'na, her türlü imkanlarından faydalandığım Arş.Gör. Murat YILDIZ ile ilgi ve desteğini gördüğüm tüm arkadaşlara sonsuz teşekkürler....

Adapazarı, Mayıs 2007

Kadir ABACI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLOLAR LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xviii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZLERİ.....	7
2.1. Giriş.....	7
2.2. P-V Eğrileri.....	9
2.2.1. Radyal iletim hattı P-V eğrisinin analitik olarak elde edilmesi	9
2.3. Güç Akışı.....	12
2.3.1. Newton-Raphson yöntemi ile güç akışı.....	12
2.3.2. Farklı salınım barası seçimi.....	14
2.4. Sürekli Güç Akışı.....	15
2.4.1. İki baralı basit bir sistemde uygulanması.....	17
2.5. Duyarlılık Analizi.....	19
2.6. Çatallaşma Analizi.....	21
2.6.1. Eyer-düğüm çatallaşması.....	22
2.6.2. Hopf çatallaşması.....	23
2.7. Güç Sistemlerinde Çatallaşma Analizi.....	23

2.7.1. İki Baralı basit bir sistemde uygulanması.....	24
BÖLÜM 3.	
GÜÇ SİSTEM MODELİ.....	26
3.1. Generatör Modeli.....	26
3.2. Yük Modelleri.....	27
3.2.1. Gerilime bağlı yükler (Statik Yük modelleri).....	27
3.2.1.1. Üstel yük modeli.....	28
3.2.2. Dinamik yük modelleri.....	28
3.2.2.1. Basit bir dinamik yük modeli.....	29
3.2.2.2. Genel dinamik yük modeli.....	30
3.3. Kademe Değişirici Transformatörlerin (KDT) Modellenmesi.....	31
3.3.1. Ayrık kademe değiştirici modeli.....	31
3.3.2. Sürekli kademe değiştirici modeli.....	33
3.4. Şebekenin Modellenmesi.....	33
3.4.1. İki kapılı şebekenin modellenmesi.....	34
BÖLÜM 4.	
GERİLİM KARARLILIĞININ İYİLEŞTİRİLMESİ.....	35
4.1. Gerilim ve Aktif Gücün Kontrolü.....	36
4.1.1. Kademe değiştirici transformatörler.....	37
4.1.2. Faz kaydırıcı transformatörler.....	38
4.2. Reaktif Güç Kontrolü.....	38
4.2.1. Şönt elemanlar.....	39
4.2.2. Seri elemanlar.....	40
4.3. Facts Teknolojisi.....	40
4.3.1. TCR.....	41
4.3.1.1. TCR modeli.....	41
4.3.2. SVC.....	42
4.3.2.1. SVC ile gerilim kontrolü.....	43
4.3.3. TCSC.....	44
4.4. Facts Cihazlarının Güç Akışı Denklemlerine Sokulması.....	45
4.5. KDT ve FKT'nin Güç Akışı Modelleri.....	46

4.5.1. KDT güç akışı modeli.....	46
4.5.2 FKT güç akışı modeli.....	48
4.6. Facts Cihazlarının Güç Akışında Modellenmesi.....	50
4.6.1. SVC güç akışı modeli.....	50
4.6.1.1. Ateşleme açısı modeli.....	50
4.6.2. TCSC güç akışı modeli.....	51
4.6.2.1. Ayarlanabilen seri reaktans modeli.....	52
4.7. Beş Baralı Test Sisteminde Sayısal Uygulama	53
4.7.1. KDT uygulaması.....	54
4.7.2. FKT uygulaması.....	55
4.7.3. SVC uygulaması.....	56
4.7.4. TCSC uygulaması.....	58

BÖLÜM 5.

ÇATALLAŞMA ANALİZİ İLE GERİLİM KARARLILIĞI İYİLEŞTİRİCİLERİNİN DİNAMİK ANALİZLERİ.....	61
5.1. Kararlılık ve Gerilim çökmesi.....	63
5.1.1. Generatör limitleri.....	65
5.2. Basit Bir Güç Sisteminde Çatallaşma Analizi ve Kaos.....	69
5.2.1. SVC uygulaması.....	69
5.2.1.1. Güç sisteminin durum uzayında davranışı.....	73
5.2.2. KDT uygulaması.....	76
5.2.2.1. Çatallaşma analizi.....	78
5.2.2.2. Yük karakteristiklerinin etkisi.....	80
5.2.2.3. Güç sisteminin durum uzayında davranışı.....	82
5.2.3. TCSC uygulaması.....	85
5.2.3.1. Dinamik gerilim kararlılığı analizi.....	86
5.2.3.2. Güç sisteminin durum uzayında davranışı.....	89
5.3. N Baralı Güç Sistemlerinde Çatallaşma ve Kaos Analizi.....	91
5.3.1. Duyarlılık analizi.....	92
5.3.2. Bara indirgeme yöntemi.....	94
5.3.3. Hopf ve eyer- düğüm çatallaşması.....	95
5.3.4. Güç sisteminin durum uzayında davranışı.....	97

BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE KATKILAR.....	100
KAYNAKLAR.....	104
EKLER.....	114
ÖZGEÇMİŞ.....	148

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$: Numune kesit alanı
a	: Kademe değiştirici donüştürme oranı
Δa	: Kademe değiştirici adım aralığı
a^{\min}, a^{\max}	: Kademe değiştirici donüştürme oranının min. ve max. değerleri
α	: Tetikleme açısı
α	: Yük modellerinde aktif güç için üstel değer
α_t, α_s	: Yük modellerinde aktif güç geçici ve sürekli hal üstel değerleri
$B(\alpha)$: Tetikleme açısının fonksiyonu olarak etkin suseptans değeri
B_{ref}	: Referans suseptans gerilim değeri
B_{SVC}	: SVC'nin eşdeğer suseptansı
B_L	: İletim hattının toplam şönt kapasitesi
B	: Yük modellerinde reaktif güç için üstel değer
β_t, β_s	: Yük modellerinde reaktif güç geçici ve sürekli hal üstel değerleri
B_i	: i.nci baraya bağlı yükün suseptans değeri
C	: Kapasitans
D_G	: Generatör sönümlleme sabiti
D	: Kademe değiştiricilerde band genişliğinin alt yarısı
D_L	: Dinamik yüke ait frekans zaman katsayısı
E	: Generatör uç gerilimi
e_k	: Parametreye bağlı olarak ∓ 1 , diğer elemanları 0 olan satır vektörü
ε	: Kademe değiştiricilerde band genişliği tolerans değeri
F	: Sistem frekansı
G	: Kondüktans
\bar{I}	: İletim hattı akımının fazörü
\bar{I}	: Fazör olarak n boyutlu enjete akım vektörü
I_{SVC}	: SVC'nin reaktif akımı

J	: Jacobian matrisi
J_R	: Sistemin indirgenmiş Jacobian matrisi
K	: P ile Q arasındaki yüklenme profili
L	: Endüktans
M	: Generatörün eylemsizlik sabiti
P	: Kaçak empedans gücünü kompanze edecek güç
P_0	: Aktif gücün başlangıç güç değeri
P_d	: Sürekli halde talep edilen aktif güç
P_G	: Generatörün elektriksel çıkış gücü
P_i	: i.barada λ ile belirlenen aktif güç
P_M	: Generatör için mekanik giriş gücü
P_t, P_s	: Aktif gücün geçici ve sürekli hal yük karakteristikleri
P_{ij}^{ayr}	: Kontrolörün transfer ettiği ayarlanmış güç
ΔP	: Bozucu etkiden sonra aktif güç değişim miktarı
$\Delta \delta$: Bara gerilim açısındaki değişim miktarı
ΔV	: Bara gerilim genliğindeki değişim miktarı
Q	: Yük barasındaki reaktif güç
Q_0	: Reaktif gücün başlangıç güç değeri
Q_i	: i.barada λ ile belirlenen reaktif güç
Q_L	: Çalışma noktasındaki reaktif güç değeri
Q_d	: Sürekli halde talep edilen reaktif güç
Q_t, Q_s	: Reaktif gücün geçici ve sürekli hal yük karakteristikleri
ΔQ	: Bozucu etkiden sonra reaktif güç değişim miktarı
Q_{SVC}	: SVC tarafından baraya aktarılan reaktif güç değeri
R	: Yük direnci
S	: Yük barasındaki görünür güç
S_b	: Sistemin baz gücü
S_c	: SVC barasındaki üç faz kısa devre gücü
T_{Gi}, T_{Bi}	: Kondüktans ve suseptansa ait zaman sabitleri
T_f	: Kademe değiştiricinin kasıtlı zaman geciktirmesi
T_L	: Termostat kontrollü yükler için toparlanma zaman sabiti
T_M	: Kademe değiştirici için toparlanma zaman süresi

T_P, T_Q	: Yük modellerinde aktif ve reaktif güç için zaman sabiti
T	: zaman
t_k, t_{k+1}	: Kademe değiştiricilerin ortalama zaman süresi
$\Delta T_0, \Delta T_k$: Kademe değiştiricinin ilk ve ortalama zaman geciktirmesi
x_s	: Kararlı denge noktası
x_u	: Kararsız denge noktası
X	: Durum vektörü
$x(0)$: Başlangıç durum vektörü
x^*	: Çatallaşma noktası
x_0^λ	: Eyer noktası denge noktası
x_0	: Sürekli hal denge noktası
X_L	: İletim hattının reaktif indüktansı
X_C	: İletim hattının kapasitif reaktansı
X_e	: TCSC'nin eşdeğer empedansı
X_{TCSC}	: TCSC'nin kontrol edilebilen eşdeğer reaktansı
ΔX_{TCSC}	: TCSC'nin kontrol edilebilen eşdeğer reaktansındaki değişim miktarı
X_t	: Transformatör kaçak reaktansı
X_L	: Bobinin ana frekanstaki reaktansı
X_{SVC}	: SVC terminalinden görülen eşdeğer empedans
\dot{Y}_{ij}	: Bara admitans matrisi fazörü
\dot{Y}_{bara}	: Tüm sistemin düğümleri arasındaki bağlantı matrisi
$\dot{Y}_{BARA_{mod}}$: İndirgenmiş baralar admitans matrisi
Y_{KDT}	: KDT'nin kaçak admitans değeri
V_0	: Yük barası geriliminin başlangıç değeri
V_b	: Faz-faz arası baz gerilimi
\bar{V}	: Fazör olarak n boyutlu enjekte gerilim vektörü
V_1, V_2	: Kademe değiştiricilerin birincil ve ikincil gerilim değerleri
V_2^0	: Kademe değiştiricinin referans değeri
\dot{V}_i, \dot{V}_j	: i ve j.inci baralara ait gerilim fazörü
V_{ref}	: Referans gerilim değeri
Z	: Yük empedansı

Z	: Bağımsız yük talebi değişkenleri
z_p, z_Q	: Yük modellerinde aktif ve reaktif güç dinamiklerine ait değişkenler
z_p^{\min}, z_p^{\max}	: Yük modellerinde aktif güç yük değişkenlerinin sınır değerleri
z_Q^{\min}, z_Q^{\max}	: Yük modellerinde reaktif güç yük değişkenlerinin sınır değerleri
Δ	: Bara yük açısı
λ	: Yüklenme miktarı(çatallaşma parametresi)
μ	: Özdeğer
Φ	: Faz kaydırıcı transformatörün açısı
τ	: Dinamik yüke ait gerilim zaman katsayısı
Γ_1	: Sistemin genel kümesi
σ	: Her bir tristörün iletimde kalma süresi (açı miktarı)
v	: Sağ özvektör
W	: Sol özvektör
W_1, w_2	: Oto transformatörü birincil ve ikincil sargısı
Ω	: Generatörün açısal hızı
ω	: Adım uzunluğu

FACTS : Flexible Alternatif Current Transmission Systems
(Esnek Alternatif Akım iletim Sistemleri)

FKT : Faz Kaydırıcı Transformatör

HB : Hopf Bifurcation (Hopf çatallaşması)

IEEE : International Electrical Electronics Committee
(Uluslararası Elektrik Elektronik Komitesi)

IEC : International Electrotechnical Commission
(Uluslararası Elektroteknik Komisyon)

KDT : Kademe Değiştirici Transformatör

SVC : Static Var Compensator (Statik Var Kompansatör)

SNB : Saddle Node Bifurcation (Eyer Noktası Çatallaşması)

TCR : Thyristor Controlled Reactors (Tristör Kontrollü Reaktör)

TCSC : Thyristor Controlled Series Capacitors
(Tristör Kontrollü Seri Kapasitör)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	P-V eğrilerinin elde edilmesi için a)İki baralı radyal bir iletim sistemi b) İletim hattının iki kapılı bir devre olarak gösterilimi....	9
Şekil 2.2	Radyal bir iletim hattı için P-V eğrisi.....	11
Şekil 2.3	Sürekli güç akışı tekniğinin gösterilmesi.....	16
Şekil 2.4	İki baralı basit bir sistem.....	18
Şekil 2.5	Örnek sistem için P-V Eğrisi.....	19
Şekil 2.6	Çatallaşma diyagramı.....	22
Şekil 2.7	İki baralı örnek sistem.....	24
Şekil 2.8	Güç sistemine ait P-V eğrisi ve sistemin eyer-düğüm noktası.....	25
Şekil 3.1	Bir güç sistemi gösterimi.....	26
Şekil 3.2	Bir genel dinamik yük modeli.....	30
Şekil 3.3	Bir kademe değiştiricinin eşdeğer devresi.....	31
Şekil 3.4	N baralı güç sisteminin (a) Genelleştirilmiş gösterimi (b) İndirgenmiş sistem c) İki kapılı indirgenmiş sistemin pi eşdeğer devresi.....	34
Şekil 4.1	Bir kademe değiştiricinin eşdeğer devresi.....	37
Şekil 4.2	Faz kaydırıcı transformatörün eşdeğer devresi.....	38
Şekil 4.3	Basit bir TCR modeli.....	41
Şekil 4.4	Basit bir SVC modeli.....	43
Şekil 4.5	SVC ile kontrol edilen güç sisteminin basit bir şeması b)endüktif SVC akımı için AC sistemin fazör diyagramı c) SVC'nin sürekli hal V-I karakteristiği.....	43
Şekil 4.6	Basit bir TCSC modeli.....	44
Şekil 4.7	Güç akışı jacobian matrisinin a)Facts cihazları yok iken b) Facts cihazları var iken genel formu.....	45
Şekil 4.8	i ve j. baralar arasına bağlı KDT'nin a) elektriksel eşdeğer devresi b) π eşdeğer devresi.....	46

Şekil 4.9	Faz kaydırıcı transformatörün elektriksel eşdeğer devresi.....	48
Şekil 4.10	k. baraya bağlı SVC'nin gösterimi.....	50
Şekil 4.11	i. ve j. baralar arasında bağlı TCSC'nin gösterimi.....	52
Şekil 4.12	Farklı salınım barası seçilmesi durumlarında Lake barasına ait P-V eğrileri ($\lambda_{\text{North SNB}} = 8.7884, \lambda_{\text{South SNB}} = 8.9578$)	54
Şekil 4.13	KDT uygulaması durumunda Lake barasına ait P-V eğrileri a) North barası salınım barası ($\lambda_{\text{SNB}}^{\text{KDT}} = 7.6735$) b)South barası salınım barası ($\lambda_{\text{SNB}}^{\text{SVC}} = 7.8511$)	55
Şekil 4.14	FKT uygulaması durumunda Lake barasına ait P-V eğrileri a) North barası salınım barası ($\lambda_{\text{SNB}}^{\text{FKT}} = 7.5194$) b)South barası salınım barası ($\lambda_{\text{SNB}}^{\text{FKT}} = 7.6253$)	56
Şekil 4.15	SVC uygulaması durumunda Lake barasına ait P-V eğrileri a) North barası salınım barası ($\lambda_{\text{SNB}}^{\text{SVC}} = 9.4328$) b)South barası salınım barası ($\lambda_{\text{SNB}}^{\text{SVC}} = 9.6358$)	57
Şekil 4.16	TCSC uygulaması durumunda Lake barasına ait P-V eğrileri a) North barası salınım barası ($\lambda_{\text{SNB}}^{\text{TCSC}} = 9.1398$) b)South barası salınım barası ($\lambda_{\text{SNB}}^{\text{TCSC}} = 9.2389$)	58
Şekil 4.17	Temel durum için Lake barasına ait P-V eğrileri.....	59
Şekil 4.18	Farklı salınım barası seçilmesi durumları için Lake barasına ait maksimum güç değerleri	60
Şekil 5.1	400 KV'luk bir güç sisteminde gerilim çökmesi olayları.....	63
Şekil 5.2	Durum uzaylarının gösterimi.....	65
Şekil 5.3	Gerilim çökmesi esnasında gerilim ve açının zamanla değişimi....	65
Şekil 5.4	Gerilim çökmesi olayının oluşumu.....	66
Şekil 5.5	Daralan bir kararlılık bölgesi.....	67
Şekil 5.6	Yaprak bölgesindeki sistem, gerilimin tekrar toparlanmasına izin verirken kademe değiştiricisinin kilitlemesi	67
Şekil 5.7	İki baralı hat sonunda SVC olan basit bir güç sistemi.....	69
Şekil 5.8	Kritik yüklenme seviyesi civarında üç farklı çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimi.....	71

Şekil 5.9	Her iki durum için güç sisteminin P-V eğrileri.....	72
Şekil 5.10	0.6 +j0.2 p.u yük kararlı kalan sistemin zamanla a) gerilim(V_2) b) açısı(δ_2) c) SVC suseptansı (B_{SVC}) d) generatörün açısıl frekans (w) değişimleri.....	73
Şekil 5.11	$P_d = 0.72$ p.u yük değerinde her iki durum için sistemin faz portreleri zamanla a) SVC'li (w)-(δ_2) b) SVC'siz (w)-(δ_2) c) SVC'li (V_2)-(δ_2) d) SVC'siz (V_2)-(δ_2).....	74
Şekil 5.12	SVC'li sistem için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri a) (w)-(δ_2) b) (w)-(δ_2) c) (V_2)-(δ_2) d) (V_2)-(δ_2)	75
Şekil 5.13	SVC'li sistem için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri.....	76
Şekil 5.14	İki baralı hat sonunda KDT olan basit güç sistemi.....	76
Şekil 5.15	Kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için gerilim- zaman değişimi.....	78
Şekil 5.16	Farklı dönüştürme oranı (a) değerleri için P-V eğrileri.....	79
Şekil 5.17	0.6 +j0.2 p.u yüklenme değerinde kararlı kalan sistemin zamanla a) gerilim b) açısı c) dönüştürme oranı d) açısıl frekans değişimi....	80
Şekil 5.18	(Şekil 5.14)'de verilen güç sisteminde $z=0, z=1, z=2$ için P-V eğrileri.....	81
Şekil 5.19	KDT'li sistem için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri a) (w)-(δ_2) b) (w)-(δ_2) c) (V_2)-(δ_2) d) (V_2)-(δ_2).....	82
Şekil 5.20	($z=0$) için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri.....	83
Şekil 5.21	$P_d = 0.66$ p.u için sabit akım ve sabit empedans, yük karakteristiğinde yüklerin karşılaştırmalı faz portreleri.....	84
Şekil 5.22	(δ) açısının iki farklı başlangıç değeri için faz portreleri ve açısı ve gerilimin zamanla değişimi (üstte $\delta_0 = 0^0$, altta $\delta_0 = 0.6^0$).....	84
Şekil 5.23	İki baralı hat sonunda TCSC olan basit güç sistemi.....	85
Şekil 5.24	Kritik yüklenme seviyesi civarında üç farklı çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimi.....	87

Şekil 5.25	TCSC ilaveli güç sisteminin P-V eğrisi.....	87
Şekil 5.26	0.6 +j0.2 p.u yükte kararlı kalan sistemin zamanla a)gerilim(V_2) b)açı(δ_2) c)TCSC reaktansı (X_{TCSC}) generatörün açısal frekansı (w) değişimleri.....	88
Şekil 5.27	TCSC'li sistem için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri portreleri a)(w)-(δ_2)b)(w)-(δ_2) c) (V_2)-(δ_2) d) (V_2)-(δ_2).....	89
Şekil 5.28	P_d^2 ve P_d^3 yüklenme değerleri için faz portreleri.....	90
Şekil 5.29	(δ) açısının üç farklı başlangıç değeri için faz portreleri.....	90
Şekil 5.30	N baralı güç sisteminde çatallaşma ve kaos analizi için akış şeması	91
Şekil 5.31	1.25 +j0.5 p.u yükte kararlı kalan sistemin zamanla a)gerilim(V_2) b)açı(δ_2) c)TCSC reaktansı (X_{TCSC}) generatörün açısal frekansı (w) değişimleri.....	95
Şekil 5.32	Kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimi.....	96
Şekil 5.33	SVC'li sistem için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri portreleri a)(w)-(δ_2)b)(w)-(δ_2) c) (V_2)-(δ_2) d) (V_2)-(δ_2).....	97
Şekil 5.34	Kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri.....	98
Şekil 5.35	(δ) açısının üç farklı başlangıç değerinde üç boyutlu durum uzayı	99
Şekil A.1	Tipik bir faz portresi.....	116
Şekil A.2	Çatallaşma noktası.....	117
Şekil A.3	$r = -1$, $r = 0$, $r = 1$, için üç faz düzlemi çizilmesi.....	119
Şekil A.4	Üst kritik Pitchfork diyagramı.....	119
Şekil A.5	Alt kritik Pitchfork çatallaşma diyagramı.....	120
Şekil A.6	Üst kritik Pitchfork çatallaşması.....	120
Şekil A.7	Eğer noktası çatallaşması.....	122
Şekil A.8	Çeşitli parametre durumları.....	123
Şekil A.9	Hopf çatallaşması.....	124
Şekil A.10	Üst kritik Hopf çatallaşması.....	126

Şekil A.11	Alt kritik Hopf çatallaşması.....	126
Şekil A.12	Limit çevrim yapıları.....	127
Şekil A.13	Kapalı yörüngeli limit çevrim.....	128
Şekil A.14	Lorenz sisteminin garip yakınsakları $s=10, r=28, b=8/3$ ve başlangıç şartları $X_0 = [-8 \ 8 \ 27]$	132
Şekil B1	İki baralı bir iletim hattının a) Elektriksel eşdeğeri b) İletim hattının iki kapılı bir devre olarak gösterilimi.....	135
Şekil B.2	İki baralı bir iletim hattının sonuna SVC eklenmesi durumunda a) Elektriksel eşdeğeri b) İletim hattı ve SVC'nin iki kapılı bir devre olarak gösterilimi.....	137
Şekil B.3	İki baralı bir iletim hattının sonuna TCSC eklenmesi durumunda a) Elektriksel eşdeğeri b) İletim hattı ve TCSC'nin iki kapılı bir devre olarak gösterilimi.....	139
Şekil B.4	İki baralı bir iletim hattının sonuna KDT eklenmesi durumunda a) Elektriksel eşdeğeri b) İletim hattı ve KDT'nin iki kapılı bir devre olarak gösterilimi.....	142
Şekil C.1	Beş baralı Stag-El Abiad sistemi.....	145
Şekil C.2	Dokuz baralı WSCC sistemi.....	146

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1	Örnek sistem için parametrik değerler.....	18
Tablo 2.2	Yük barasına ait çatallaşma noktasını gösteren sonuçlar.....	25
Tablo 4.1	KDT bağlanması durumunda bara gerilim ve açı değerleri.....	54
Tablo 4.2	FKT bağlanması durumunda bara gerilim ve açı değerleri.....	56
Tablo 4.3	SVC bağlanması durumunda bara gerilim ve açı değerleri.....	57
Tablo 4.4	TCSC bağlanması durumunda bara gerilim ve açı değerleri.....	58
Tablo 5.1	Dokuz baralı (WSCC) sisteminin bara gerilim ve açı değerleri (SVC yok).....	92
Tablo 5.2	V-Q duyarlılık matrisi J_R^{-1} 'in köşegen elemanlarına göre elde edilen sıralama.....	93
Tablo 5.3	Dokuz baralı (WSCC) sisteminin bara gerilim ve açı değerleri (SVC var).....	94
Tablo C.1	Beş baralı Stag–El Abiad sisteminin hat verileri.....	145
Tablo C.2	Beş baralı Stag–El Abiad sisteminin generatör verileri.....	145
Tablo C.3	Dokuz baralı WSCC sisteminin hat verileri.....	147
Tablo C.4	Dokuz baralı WSCC sisteminin transformatör verileri.....	147
Tablo C.5	Dokuz baralı WSCC sisteminin generatör ve generatör baralarına ait veriler.....	147

ÖZET

Anahtar Kelimeler : Sürekli Güç Akışı, Gerilim Kararlılığı, FACTS, Çatallaşma Analizi, Kaotik osilasyonlar

Güç sistemi planlama ve kontrol çalışmaları yapan mühendisler için sistemin gerilim kararlılığı analizinin kapsamlı bir biçimde yapılmasının önemi gitgide artmaktadır. Generatör ve iletim hatlarının kapasitelerinin sınırlı olması ve sistem yüklerinin artması sonucu olarak giderek lineer olmayan bölgelerde çalışan sistemler için gerilim kararlılığı analizine büyük ölçüde ihtiyaç duyulmaktadır. Son zamanlarda, gerilim kararlılığı ve gerilim çökmesi olayı güç sistem analizi ve kontrolünde çok önemli bir konu olmaya başlamıştır. Araştırmacılar bu problem için statik ve dinamik yaklaşımlarla çözüm önerileri sunmuşlardır.

Çatallaşma teorisi güç sistemlerindeki açılma ve gerilim kararlılığı gibi değişik sorunların analiz edilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden birisidir. Çatallaşma teorisi, özellikle denge noktalarının küçük-sinyal kararlılığı ve çatallaşması, salınımlı kararsızlıklar ve gerilim çökmesi gibi dinamik olayların analizinde pratik yöntemler geliştirme imkanını vermektedir. Bir güç sisteminde yük artışı sonucu Eyer Noktası ve Hopf çatallaşmaları gibi temel çatallaşma olayları meydana gelir. Eyer noktası çatallaşması güç sistemlerinde gerilim çökmesi noktası olarak bilinir ve bu noktada, sistem Jakobiyen matrisinin özdeğerlerinden biri orijindedir. Hopf çatallaşması noktasında sistem sanal eksen üzerinde bulunan iki adet özdeğere sahiptir ve bu özdeğerler sistemde salınımlı kararsızlıkların oluşmasına sebep olmaktadır. Her iki çatallaşma olayı güç sisteminin lineer olmayan çalışma bölgesindeki kararsızlık mekanizmasını açıklar ve kaotik yapıya dönüşeceği yüklenme aralıklarını tesbit etmemize olanak sağlar. Bu parametrik değerler sistemin kararlılık ve kontrol çalışmalarında kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında gerilim kararlılığı analizi hem statik hem de dinamik yaklaşımlarla ele alınmıştır. Lineer olmayan bölgelerde çalışan güç sistemlerinde Kademe Değiştirici Transformatör (KDT), Faz Kaydırıcı Transformatör (FKT), Flexible Alternatif Current Transmission Systems (FACTS) cihazları olarak bilinen Static Var Compensators (SVC) ile Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC) gibi gerilim kararlılığını iyileştirici cihazların statik ve dinamik modelleri kullanılarak çatallaşma ve kaotik analizleri yapılmıştır. Elde edilen güç sistem modelleri ile bu cihazların iyileştirici performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmada öncelikle iki baralı bir güç sistemi ele alınmış daha sonra genelleştirilerek N baralı sistemlere uygulanabilirliği gösterilmiştir.

BIFURCATION AND CHAOTIC ANALYSIS OF THE LINE CONDITIONERS FOR VOLTAGE STABILITY

SUMMARY

Keywords : Power Flow Continuation, Voltage Stability, FACTS, Bifurcation Analysis, Chaotic Oscillations

It is becoming increasingly important for power system planning and operating engineers to be capable of performing comprehensive voltage stability analyses of the systems. This need is largely due to the recent trends towards operating systems under stressed conditions as a result of increasing system loads without sufficient transmission and generation enhancements. There have been many failures, due to voltage instability in power systems around the world. In recent years voltage stability and voltage collapse phenomena have become more and more important issues in power system analysis and control. Researchers have suggested techniques for voltage stability analysis considering both static and dynamic aspects.

The bifurcation theory is one of the most common theory which is used to analysis the problems such as angular and voltage stability in power systems. Bifurcation theory allows us to develop practical methods especially in analysis of dynamic events such as small-signal stability and bifurcation of balance nodes oscillate instabilities and voltage collapse. Power systems are consist of Saddle-Node and Hopf bifurcations which as a result of load increasing. Saddle node bifurcation is known as voltage collapse node in power systems and on this mode one of the eigenvalues of the system jacobian matrix is on the origin. The system has two eigenvalues on the imaginary axis and these eigenvalues cause oscillative instabilities. Both of these bifurcation events explain the instability mechanism that is in the nonlinear work zone of the power system and enable us to establish the loading intervals that will be turn into chaotic building. These parametric values can be used in stability and control studies of the system.

In this thesis, voltage stability analysis is dealing with both static and dynamic approaches. Bifurcation and chaotic analysis have been done by using the static and dynamic models of the devices that improve the voltage stability, such as tap changer transformers (LTC), phase shifting transformers (PST), Static var Compensators (SVC) known as Flexible Alternatif Current Transmission Systems (FACTS) devices and Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC) in power systems that work on the nonlinear zones. The power system models that has been obtained. Furthermore the improving performances of these devices have been compared. In this study, firstly a two bus power system has been taken up, then by generalizing this, it has been indicated that it can be applied to N bus system.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzün hızlı teknolojik gelişmelerine paralel olarak elektrik enerjisine olan talep de aynı ölçüde artmaktadır. Sürekli yük artımı ile birlikte ekonomik ve çevresel baskılar güç sistemlerini kararlılık limitine yakın noktalarda çalışmaya zorladığından kararlılık sınırları azalmaya ve gerilim kararlılığı kritik bir konu olmaya başlamıştır [1]. Sürekli artan bu ihtiyaca cevap verebilmek için yeni üretim tesisleri kurmak kaçınılmazdır. Bu tür tesislerden, elektriksel yüklerin dinamik davranışlarına ve meydana gelebilecek bozucu etkilere (paralel iletim hatlarından birisinin devre dışı kalması , kısa devreler veya büyük miktarlarda yük almalar gibi) hızla cevap verebilmeleri istenmektedir. Üretim tesislerinde kullanılan senkron generatörlerin, bu tür etkiler karşısında senkronizmadan kopup kopmayacağı diğer bir deyişle kararlılık problemi, beraberinde gerilim kararlılığı sorununun ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu açıdan bakıldığında gerilim kararlılığı bir enerji sisteminin yük baralarının gerilimlerinin genliklerini, gerek sürekli halde gerekse geçici olaylar esnasında, belirli işletme limitleri içerisinde tutabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Dünyanın çeşitli ülkelerinde enerji sistemlerinde son yıllarda meydana gelen çeşitli olaylardan sonra gerilim kararlılığına artan bir ilgi duyulmaya başlanmıştır .

Güç sisteminde generatörler arasında bir dengesizlik esnasında bir gerilim düşümü meydana geldiğinde yük, iletim sistemi bileşenleri ve sistem kayıpları bir gerilim kararsızlığı artışına neden olabilirler. Gerilim kararsızlığı gerilim kararlılığının yok olmasıdır ve gerilimde artma ve azalma gibi sonuçlar doğurmaktadır. Kararlılığa ulaşmak için kontrol mekanizmaları, kararlılık limitini tespit ederek kararlılığı sağlayabilirler [2]. Gerilim kararsızlığının birincil nedeni, normal olmayan sistem çalışmaları veya kontrolör davranışları altında, yük taleplerini karşılamaya çalışan belirli sistem baralarına yeterli reaktif gücün verilemeyişiştir [3]. Gerilim kararsızlığının bir tipi gerilim çökmesidir. Bir sistem bir bozucu etki nedeniyle gerilim çökmesine girdiğinde gerilimde kontrol edilemeyen bir düşüşe neden olur.

Gerilimin düzenlenmesi reaktif kompanzasyon cihazlarının veya kaynaklarının, yük talebini karşılayacak reaktif güç üretim miktarının üretilmesi hızına bağlıdır. Reaktif güç miktarı büyük bir ölçüde yük karakteristikleri ile belirlenebilir ve gerilim kontrol edilebilir. Gerilim kararsızlığı reaktif yükteki artışın sürmesiyle meydana gelmektedir. Bu süreç iletim hatlarında kayıpların artmasına neden olacaktır. Buna ilave olarak, iletim şebekelerinin zayıflığı güç transfer seviyelerindeki kuvvetsizliği, gerilimin çökmesine katkı sağlamakta ayrıca generatör reaktif güç sınırları, yük karakteristikleri, reaktif kompanzasyon cihazlarının karakteristikleri ve gerilim kontrol cihazları özellikle Kademe Değiştirici Transformatörlerin (KDT)'lerin davranışları etkilidir [4].

Güç transferlerinin artması ile, güç sistemi ağır şartlar altında daha yüksek kayıplar vererek çalışmaya başlamıştır. Bununla birlikte düzenli olmayan yük akışı ile güvenilir olmaktan uzaklaşmaktadır. Bu bağlamda FACTS(Flexible Alternatif Current Transmission Systems) olarak isimlendirilen yeni bir teknoloji güç sistemlerinde yerini almaya başlamıştır. FACTS teknolojisinin ana hedefi sistemi kontrol altında tutarak güç transferinin düzenlenmesini ve ayrıca taşıma kapasitesinin belirli sınırlar dahilinde artırılmasını sağlamaktır. Günümüzün güç sistemleri büyük ve mekanik kontrollüdür. FACTS teknolojisi yüksek güç elektroniğine dayalı çeşitli tristör cihazlarından oluşmuş mikroelektronik, haberleşme ve ileri kontrol uygulamaları içeren bir teknolojidir.

Gerilim çökmesi ile gerilim kararlılığı problemi modern güç sistemlerinin işletilmesi ve planlamasında önemli bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Güç sistemlerinin yararlarını artırmak için sistemin gerilim çökmesi riskine neden olan gerilim kararlılığı sınırlarına yakın yerlerde çalışması sağlanmalıdır. Gerilim çökmesinin temel nedeni yük barasına gerekli reaktif gücün sağlanamamasıdır [3]. FACTS teknolojisi ile bara gerilimi, hat empedansı ve faz açısı esnek ve hızlı bir şekilde düzenlenebilir. Bu nedenle, FACTS'ler güç akışı kontrolünü kolaylaştırarak, güç transfer kapasitesini artırıp generatör maliyetini azaltır, güç sisteminin güvenilirliğini ve kararlılığını geliştirebilir [91].

Son zamanlarda elektrik güç sistemlerinde oluşan sistem çökmeleri, güç sistemi baralarındaki gerilim genliklerinde, giderek artış gösteren bir azalma ile karakterize edilmektedir. Ekonomik ve çevre baskıları nedeniyle büyük güç sistemlerinin birbirlerine bağlantılarının sürmesi, kararlılık sınırlarına yakın çalışması gereken kompleks bir sisteme yol açmaktadır. Bu çalışma ortamı, güç sistemlerinin dinamik kararlılık değerlendirmeleri ile ilgili problemlerin artan önemine katkı sağlamaktadır.

Doğrusal olmayan büyük bir enterkonnekte güç sistemi, sürekli haldeki bir çalışma noktasından uzaklaştığı zaman çok karmaşık olaylar göstermektedir. Ekonomik ve çevre baskıları yeni iletim ve üretim kapasitesi artırımını sınırladığı için güç sistemleri gittikçe daha da çok yüklenmektedir. Bu aşırı çalışma koşulları altında, büyük elektrik işletmesinin devre dışı kalmasına neden olan gerilim çökmesi olarak da adlandırılan yeni bir kararsızlık problemiyle karşı karşıya kalınmaktadır.

Son zamanlarda çoğu büyük elektrik güç sistemlerinin devre dışı kalması sistemin hatalara vermiş olduğu dinamik cevap yüzünden olmaktadır. Böylece güç sistemlerinin dinamik değerlendirilmesi hızla önem kazanmaktadır.

Bir güç sisteminin dinamik davranışı bir parametre değişimiyle değiştirildiği zaman güç sistemlerinde çatalaşmalar doğmaktadır. Bunlardan en yaygın olanı yük artışının bir sonucu olarak denge noktalarının çatalaşmasıdır. Çatalaşma teorisi doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde anahtar rol oynamaktadır. Sistemdeki anlık değişiklikler, sistemi kararlı normal durumundan artarak uzaklaştırmakta, bu da elektrik güç sisteminde gerilim çökmesini ve kaos olaylarını beraberinde getirmektedir.

Çatalaşma teorisi güç sistemlerindeki açısal kararlılık ve gerilim kararlılığı gibi değişik sorunların analizinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Çatalaşma teorisi, özellikle denge noktalarının küçük-sinyal kararlılığı ve çatalaşması, salınımlı kararsızlıklar ve gerilim çökmesi gibi dinamik olayların analizinde pratik yöntemler geliştirme imkanını vermektedir [93, 94].

Elektrik güç sistemlerinde meydana gelen gerilim çökmesi olayları, iyi tanımlanamamakta ve sistem dinamikleri iyi anlaşılmamaktadır. Eyer noktası çatallaşması saddle node bifurcations (SNB) gerilim çökmesi problemleriyle ilişkilendirilerek sistemin dinamik kararsızlığı için temel bir fikir verir.

Şu ana dek literatürde elektrik güç sistemlerinin statik ve dinamik gerilim kararlılığı analizleri geniş bir biçimde çalışılmıştır. Elektrik güç sistemlerinin bilgisayar destekli analiz ve kontrolü [6,7, 8] numaralı kaynaklarda, kararlılık analizleri [2, 9] kaynaklarda ayrıntılı bir biçimde anlatılmıştır. Ayrıca birçok teknik rapor ve dökümanlarda [10,11] gerilim kararlılığı problemi ve analiz metodlarından bahsedilmiştir. Statik analiz için, modal analiz [28], sürekli güç akışı (continuation power flow-CPF) [5, 13], tekil değer ayrıştırması [12,18,25,29] gibi metotlar sistemin maksimum yüklenebilirlik sınırı ve meydana gelebilecek kararsızlık mekanizması hakkında bilgi verirler. Sistemin kararlılık sınırlarının belirlenmesi sürekli güç akışı [20, 21], çatallaşma analizi [19,24,27,116] ve diğer metotlarla [22, 56, 61, 118]'de belirlenmiştir. [15, 60]'de gerilim çökmesi ve dinamik analizleri yapılmıştır. Gerilim kararlılığı olayını anlamak için onun yakın ilişkili olduğu yük dinamikleri ile tek tek ilgilenmelidir [57].Birçok çalışmalar göstermiştir ki, yükün tanımlanması analiz sonuçlarında önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle geliştirilen yük modeli çok önemlidir [47]. Son yıllarda bu bilgileri özetlemek için tavsiye edilen standart yük modellerine ilişkin bir bilgi yayınlanmıştır [117] . Bunlar statik yük modelleri(sabit empedans, sabit güç, sabit akım ve bu modellerin kombinasyonları ile dinamik yük modelleri [46,58,59] olarak iki ana gruba ayrılabilir.

Son yıllarda bir çok çalışma nonlinear bir olay olan çatallaşma ve kaos içermektedir [32,33,82]. Güç sistemlerinde Eyer noktası çatallaşması gerilim çökmesi problemleriyle ilişkilendirilerek sistemin dinamik kararsızlığı için temel bir fikir verir. [34,54,55,62,70,75]' de güç sistemlerinde çatallaşma ve kaos analizleri yapılmıştır.Gerilim kararlılığının iyileştirilmesi amacıyla birçok çalışma mevcuttur [36]. Bu çalışmalarda temel hedef öncelikle gerilim kararsızlığına neden olan reaktif güç eksikliğinin sisteme şönt ve seri [41,42,43,89,98] kompanzatörlerle enjekte

edilmesidir. Ayrıca kademe değiştirici [44,49,71] ve faz kaydırıcı transformatörlerle [90] yük barasındaki gerilim istenilen değerlerde tutulmaya çalışılmıştır.

Son yıllarda gerilim kararlılığı çalışmalarında FACTS Teknolojisinin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. FACTS teknolojisi ile bara gerilimi, hat empedansı ve faz açısı esnek ve hızlı bir şekilde düzenlenebilir. Facts cihazlarının matematiksel modellerinin elde edilerek güç akışı denklemlerine katılması suretiyle statik analizleri [64,65]yapılmış, kontrol ve kararlılık sınırlarının geliştirilmesi amacıyla dinamik performansları incelenmiştir [50,66,67,69,103,105].FACTS cihazları ile ilgili en önemli sorular bu cihazların yerleşimi ve dizaynıdır. [77] nolu kaynakta bu metodoloji yerini almıştır. Güç akışı Jacobien matrisinin tekil değerine dayalı, sağ ve sol tekil vektörler ile daha duyarlı bir biçimde aktif ve reaktif güç enjeksiyon değişimlerinin yönetimi sağlanmıştır. Osilasyonun söndürülmesini sağlayacak olan giriş sinyalinin kontrolunu gerçekleştirecek en uygun FACTS cihazlarının yerleşimi ve seçimi [78,79,100,109]'da tartışılmıştır. [68]'de bir SVC sisteminin Hopf Çatallaşması metodu ile kontrolü ve iki generatör arasına yerleşimi, üç makinalı örnek bir test sistemi düşünülerek incelenmiştir. [80] nolu kaynakta şönt bağlı FACTS cihazlarının yerleştirilmesi için bir metod önerilmiştir. [81,86]'da FACTS cihazlarının elverişli ve optimal biçimde yerleştirilmesi için etkili ve basit bir model gösterilmiştir. Yine FACTS cihazlarının optimal biçimde yerleştirilmeleri ve kontrolünün en iyi biçimde yapılabileceği noktaların gösterilmesi [107,108]' de yapılmıştır. [114]. kaynakta şönt ve seri kompanzasyon parametrelerinin optimal ayarlamaları ve sistemi bir eğer noktası çatallaşmasından ve beraberinde gerilim çökmesinden uzaklaştırmakla birlikte kullanılmıştır. FACTS cihazları ile güç transfer kapasitesinin ve güvenilirliğinin artırılması yönünde de çalışmalar mevcuttur. [110]' da bu cihazların transfer kapasitesine olan etkileri gözlemlenmiştir. [111,113] de sürekli hal kararlılık limitinin artırılması ve seri FACTS cihazlarıyla optimize edilmesi ve ayrıca yerleşimlerinin etkisi tartışılmıştır. [112]'de FACTS cihazlarının optimal seçimi için bir genetik algoritma önerilmiştir. Burada ana hedef çok makinalı sistemlerde generatör maliyetlerinin azaltılmasıdır. Bunlara ilave olarak FACTS cihazlarının güç sistemlerine etkileri ve gerilim kararlılığına olan katkıları açısından bir çok çalışma mevcuttur.

Literatür incelemelerinden anlaşılacağı gibi gerilim kararlılığını iyileştirici cihazların statik ve dinamik analizleri oldukça geniş bir biçimde çalışılmıştır. Bu çalışmada şu ana dek yapılan çalışmalara ilave olarak bu cihazların elde edilen Diferansiyel Cebirsel Denklemler (DCD) modelleri ile çatallaşma ve kaotik analizleri yapılarak güç sistemlerinde, kararlı halin ortadan kalktığı ve lineer olmayan bölgede çalışan sistemin dinamik davranışları durum uzayında incelenerek yorumlanmıştır. Çalışma esnasında literatürde yaygın olarak kullanılan Dobson-Chiang güç sistem modelinin [52] yerine iki baralı basit güç sistem modeli üzerinde yoğunlaşmış ve ardından N baralı sistem uygulamalarının yapılacağı gösterilmiştir.

Çalışma aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır. 2.Bölümde iki baralı bir sistem için gerilim kararlılığı analiz metodları basit açıklayıcı birer örnek verilerek açıklanmıştır. 3.Bölümde güç sistemi ve bileşenlerinin modellenmesi anlatılmıştır. 4.Bölümde reaktif güç sistemi ve facts cihazlarının matematiksel modelleri verilerek güç akışı çalışmalarında etkileri incelenmiş ve örnek bir test sistemi üzerinde sonuçlar verilmiştir. 5.Bölümde basit bir güç sisteminde gerilim çökmesi dinamik simülasyonları yapılmış çatallaşma ve kaotik analizler gerçekleştirilmiştir. Ardından N-baralı sistemlerin incelenmesine geçilmiş şebeke indirgeme tekniği kullanılarak sistem 2 baralı basit bir güç sistemine indirgenerek en uygun reaktif güç desteği sağlanacak baranın belirlenip çatallaşma ve kaos analizi gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 2. GERİLİM KARARLILIĞI ANALİZLERİ

2.1. Giriş

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı problemine son yıllarda artan bir ilgi vardır. Geçmişte gerilim kararlılığı probleminin statik veya dinamik yaklaşımlar ile çözümlenmesi tartışılmıştır. Statik analizlerde bir yük akışı problemi, dinamik analizde ise bir takım diferansiyel denklemlerin çözümlenmesi düşünülmüştür [4].

Verilen bir sistem durumu için gerilim kararlılığı analizi gerilim kararsızlığına yakınlık ve gerilim kararlılığı mekanizması olmak üzere iki yön içerir. Gerilim kararsızlığına olan mesafe yük seviyesi, kritik bir iç yüzeyden akan aktif güç ve reaktif güç yedekleri gibi fiziksel büyüklüklerle ölçülebilir. Verilen herhangi bir durum için en uygun ölçüm belirlenen sisteme ve sınırların kullanımına, örneğin çalışma koşullarına bağlıdır. Olası ihtimallere (hat çıkışları, bir üretim birimi veya reaktif güç kaynağının kaybı gibi) bakılarak karar verilir. Gerilim kararsızlığının neden ve nasıl olduğunu kararsızlığa götüren nedenin ne olduğunu hangi bölgelerinin gerilim açısından zayıf olduğunu ve gerilim kararsızlığının geliştirilmesine en etkili ölçütlerin neler olduğu bilinmelidir [87].

Gerilim kararlılığını etkileyen sistem dinamikleri genelde yavaştır. Bu yüzden, problemin pek çok yönü statik yöntemlerle etkili bir şekilde incelenebilir. Bu yöntemler güç sistemlerinin belirlenmiş bir çalışma durumu ile temsil edilen denge noktasının uygulanabilirliğini inceler [16].

Statik yaklaşım , zaman dönemi yörüngesi boyunca çeşitli zaman dilimlerindeki sistem koşullarından anlar içerir. Her bir zaman diliminde , durum değişkenlerinin zaman türevleri sıfır olarak kabul edilir ve durum değişkenleri belirli zaman dilimine uygun yer alır. Sonuç olarak , toplam sistem eşitlikleri , statik analiz tekniklerinin kullanılabilmesiyle tamamıyla cebirsel eşitliklere indirgenmiş olur [2].

Geçmişte, gerilim kararlılığı statik analizi için büyük ölçüde geleneksel yük akışı programları kullanılmaktaydı. Gerilim kararlılığı inceleme metotlarından statik (sürekli hal) metotları; yük akışı uygulamalarına dayalı metotlar, yani lineerleştirilmiş dinamiklerin öz değerleri ve duyarlılık analizlerini içerir [3].

Aynı grupta farklı bir küme oluşturan çalışmalarda ise duyarlılık gösterge olarak kullanılmıştır. Problemin kompleks yapısı gereği (yük akışı fizibilitesi, optimal güç akışı ve sürekli hal kararlılığı gibi statik tekniklere dayalı güç akışı çalışmaları yapılmıştır.

Statik analiz teknikleri içerisinde, modal analiz [28], sürekli güç akışı [5], tekil değer ayrıştırması [12,18,25,29] gibi geliştirilen metotlarla sistemin maksimum yüklenme noktası, kararlılık sınırları ve kararsızlık mekanizmasının meydana gelişi hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır.

Gerilim kararsızlığı veya gerilim çökmesi dinamik bir süreç olsa da, çoğunlukla statik (yük akışı) analizine uygun olarak bir sürekli hal problemi olarak görülmüştür. Bundan dolayı yük akışı tabanlı statik analiz yöntemleri hızlı ve yaklaşık analiz için kullanılmaktadır.

Açık bir şekilde gerilim kararlılığının ortaya çıkmasıyla birlikte dinamik yaklaşımlara da ihtiyaç duyulmuştur. Statik analiz teknikleri ile sistem koşulları geniş bir alanda incelenebilir ve eğer doğru kullanılırsa problemin doğasına daha yaklaşılabılır ve belirleyici temel etkenler bulunur.

Dinamik analiz , diğer bir taraftan belirli gerilim çökme durumlarının ayrıntılı incelenmesi , koruma ve kontrollerin koordinasyonu ve ölçüm testleri için yararlıdır. Dinamik simülasyonlar ayrıca sürekli hal denge noktasına nasıl ulaşılabileceğini de inceler[16]. Dinamik analizler sistemin gerçek dinamik davranışını tahmin edebilirler.

Bu bölümde gerilim kararlılığı analiz teknikleri hakkında bilgi verilerek basit bir güç sisteminde uygulamaları anlatılacaktır.

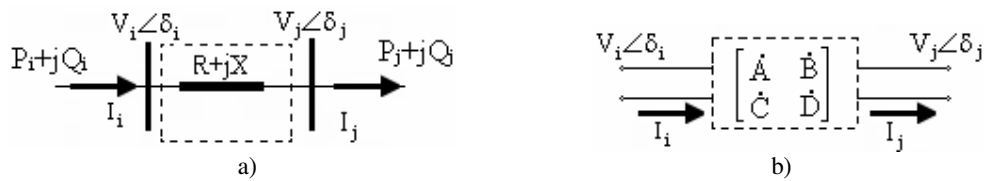
2.2. P-V Eğrileri

Gerilim kararlılığı incelemelerinin klasik yolu, statik yük akışı analizlerine dayanmaktadır. Sonuçlar genellikle, aktif güç – gerilim ordinatlarında P-V eğrileri ile gösterilirler. P-V eğrisi üzerinde gerilim kararsızlık noktası açıkça görülebildiğinden, statik analizler gerilim çökmesinden korunmak için faydalı olmaktadır. Ancak, statik yaklaşım, gerilim kararlılığının dinamik davranışı hakkında yeterli bilgi veremeyeceğinden, dinamik yaklaşımında göz önüne alınması gerekecektir [3].

Şekil 2.1a'da verilen iki baralı bir sistem için, hat sonu (alıcı uç) geriliminin genliği V_j ile bu uçtan çekilen aktif güç P_j arasındaki ilişkiyi, hat başı (gönderici uç) geriliminin genliği, iletim hattının sabitleri ve hat sonundan çekilen güce ilişkin güç katsayısı cinsinden analitik olarak ifade etmek ve bu ifade yardımıyla hat sonu için P-V eğrilerini elde etmek mümkündür.

2.2.1. Radyal iletim hattı P-V eğrisinin analitik olarak elde edilmesi

Şekil 2.1.a'da verilen iki baralı bir sistem için iletim hattını, iki kapılı bir devre olarak gözönüne alarak, **A-B-C-D** devre sabitleri, gönderici uç gerilimi ve alıcı uç güç faktörü cinsinden hat sonu gerilimi ile aktif güç arasındaki ifade elde edilebilir.



Şekil 2.1 P-V eğrilerinin elde edilmesi için a) İki baralı radyal bir iletim sistemi b) İletim hattının iki kapılı bir devre olarak gösterilimi

Bir enerji iletim hattının hat başı gerilimi V_i ve hat başı akımı I_i aşağıdaki gibi matrisel formda yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_i \\ \dot{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_j \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

(2.1) eşitliği ile hat sonu gerilimi \dot{V}_j , hat sonu akımı \dot{I}_j ve hattın genelleştirilmiş devre sabitleri $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$ cinsinden ifade edilir [31-35]. Genelleştirilmiş devre sabitlerini kartezyen biçimde $\dot{A} = a_1 + ja_2$, $\dot{B} = b_1 + jb_2$, $\dot{C} = c_1 + jc_2$, $\dot{D} = d_1 + jd_2$ şeklinde yazarsak, hat başı gerilimi ve hat sonu akımı için,

$$\dot{V}_i = (a_1 + ja_2) \cdot \dot{V}_j + (b_1 + jb_2) \cdot \dot{I}_j \quad (2.2)$$

$$S_j = P_j + jQ_j = \dot{V}_j \dot{I}_j^* \quad (2.3)$$

veya

$$I_j = \frac{P_j - jQ_j}{V_j^*} \quad (2.4)$$

yazılır ve (2.2) ifadesi düzenlenerek,

$$\dot{V}_i \cdot \dot{V}_j = (a_1 \dot{V}_i^2 + b_1 \cdot P_i + b_2 \cdot Q_i) + j(a_2 \dot{V}_i^2 + b_2 \cdot P_i - b_1 \cdot Q_i) \quad (2.5)$$

olur. Son eşitliğin her iki yanı kendi eşleniği ile çarpılıp kareleri alınır,

$$\begin{aligned} & |A|^2 \cdot |V_i|^4 + [2P_i \cdot (a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2) + 2Q_i \cdot (a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1) - |V_j|^2] \cdot |V_i|^2 \\ & - |B|^2 \cdot (P_i^2 + Q_i^2) = 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

elde edilir. $x = |V_i|^2$ dönüşümü yapılarak,

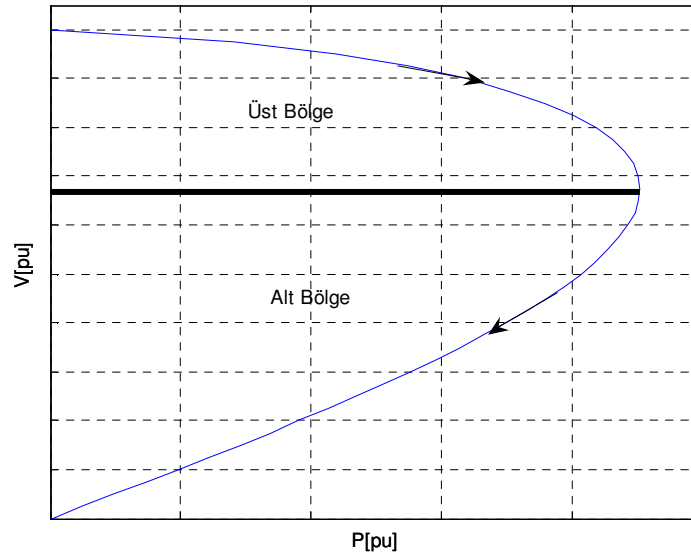
$$a \cdot x^2 + b \cdot x + c = 0 \quad (2.7)$$

şeklinde iyi bilinen 2.dereceden bir denkleme dönüştürülür. Denkleminin çözümü,

$$x_{1,2} = \frac{-b \mp \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \quad (2.8)$$

dir. Gerilime ilişkin gerçek kök ise $|V_i|_{1,2} = \mp \sqrt{x_{1,2}}$ belirlenirken şüphesiz (+) kök kullanılmaktadır.

Bu analitik ifadenin çözümü ile, hat başı gerilimi V_i belirli bir değerde sabit tutulurken, sabit güç katsayısı altında hat sonundan çekilen gücün sıfırdan itibaren artırılarak sürekli değişimine karşılık, hat sonu geriliminin genliğinin değişiminin gözlemlendiği P-V eğrisi olarak adlandırılan eğri elde edilir [3-73].



Şekil 2.2. Radyal bir iletim hattı için P-V eğrisi.

Bir radyal iletim hattına ilişkin P-V eğrisi Şekil 2.2’de gösterilmiştir. P-V eğrisinin üst kısmı normal kararlı çalışma bölgesini yansıtmaktadır, alt bölge ise Newton-Raphson algoritmasının çözüm vermediği gerilim kararsızlığına karşılık olan bölgedir. Eğri üzerinde eyer-düğüm noktası (SNB: saddle node bifurcation) olarak ta bilinen ve bir tek gerilim değerine karşılık gelen bu nokta gerilim kararlılığı açısından taşınabilecek maksimum güç sınırını ve buna gelen kritik gerilim değerini göstermektedir. Kritik güçten daha yüksek bir güç talebi için yük gerilimi kararsız olacaktır .

Gerçekte gerilim kararsızlığı P, Q ve V arasındaki ilişkilere bağlıdır bu ilişkileri gösteren karakteristikler radyal hat için (iki baralı sistem) analitik olarak

edilebilirken, daha büyük baralı karmaşık sistemler için yük-akışı analizi kullanılarak belirlenebilir.

2.3. Güç Akışı

Güç akışı çalışmaları, yaygın bir şekilde yük akışı olarak bilinmekte ve güç sistem analizinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Planlama ve kontrol açısından ve ileriye dönük genişlemeler için gerek duyulur. Problem her bir barada gerilimin büyüklüğü ile açısının belirlenmesi ve her bir hattan geçecek aktif ve reaktif gücün bulunmasının istenmesidir.

2.3.1 Newton-Raphson yöntemi ile güç akışı

Newton metotları güç akışı denklemlerinin çözümü için iteratif metodlara (Gauss, Gauss-Seidel...) göre kuadratik yakınsama karakteristiğine sahiptir. Özellikle çalışılan sistem hakkında bilgi sahibi olmak ve bunun sonucunda iyi başlangıç tahminleri yapmak, daha iyi sonuç verir [26]. Bir çözüm elde etmek için gerekli iterasyon sayısı sistemin boyutundan farklıdır, fakat her iterasyonda daha fonksiyonel değerlendirmeler gereklidir. Şekilde verilen sistem için i,baraya giren akım aşağıdaki gibi yazılabilir. Şekil 2.1'de verilen sistemde i. baraya giren akım aşağıdaki gibi yazılabilir .

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^n \dot{Y}_{ij} \dot{V}_j \quad (2.9)$$

burada $\dot{Y}_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$ ve $\dot{V}_j = |V_j| \angle \delta_j$ olup sırasıyla hattın admitansını ve j barasının gerilimini göstermektedir. Bu eşitliğin içerisine bara admitans matrisi konularak yeniden yazılırsa i.bara için aktif ve reaktif güç akışı eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle \theta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.10)$$

gerçek ve sanal kısımlar ayrılırsa

$$\begin{aligned}
P_i &= \sum_{j \neq i}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\
Q_i &= -\sum_{j \neq i}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Yukarıdaki (2.11) eşitlikleri Taylor serisine açılır ve yüksek mertebeden terimler ihmal edilirse aşağıdaki lineer denklem takımı elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \hline \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} \dots \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} \dots \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} \dots \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} \dots \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \hline \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} \dots \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} \dots \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} \dots \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} \dots \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \hline \Delta |V_2|^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^{(k)} \end{bmatrix}$$

Yukarıdaki eşitlikte 1 numaralı bara salınım barası olarak farzedilir. Jacobien matrisi aktif ve reaktif güçteki küçük değişimler ile gerilimin açısı ve büyüklüğü arasındaki değişimleri verir. Jacobien matrisinin elemanları aktif ve reaktif güçlerin $\Delta \delta_i^{(k)}$ ve $\Delta |V_i^{(k)}|$ 'deki değişimlerinin kısmi türevleridir. Kısaca aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

Gerilim kontrollü baralar için gerilimin büyüklüğü bilinmektedir. Böylece n baralı bir sistemde gerilim kontrollü bara sayısı m ise n-1 adet aktif güç ve n-1-m adet reaktif güç eşitliği yazılabilir. Buna göre jacobien matrisi $(2*n-2-m) * (2*n-2-m)$ boyutundadır. J_1 $(n-1)*(n-1)$, J_2 $(n-1)*(n-1-m)$, J_3 $(n-1-m) *(n-1)$ ve J_4 ise $(n-1-m) *(n-1-m)$ boyutludurlar. $\Delta P_i^{(k)}$ ve $\Delta Q_i^{(k)}$ terimleri hesaplanan değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki farktır.

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{(\text{tah min})} - P_i^{(k)} \quad (2.14)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{(\text{tah min})} - Q_i^{(k)} \quad (2.15)$$

Baralardaki gerilimlerin yeni değerleri de aşağıdaki gibi olur.

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k+1)} - \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.16)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.17)$$

2.3.2. Farklı salınım barası seçimi

Güç akışı çalışmalarında her analiz için daima çalışma şartları belirlenerek, bir bara hariç diğer bütün baralarda şebekeye giren aktif güç tarif edilmelidir. Ayrıca bu baraların her birinde sisteme akan reaktif güç veya gerilimin genliği de tarif edilmelidir. Yani, her barada reaktif güç akışı veya gerilimin genliğinden hangisinin sabit tutulacağına karar verilir. Bazen generatörler için reaktif güç tarif edilse bile, genel olarak yük baralarında reaktif güç ve generatör baralarında da gerilimin genliği tarif edilmektedir.

Pratikte çok yakın tahmin edilebilse de , şebekedeki bütün santrallerin aktif üretimlerini kesin olarak bilmek imkansızdır. Bunun sebebi hat kayıplarının bilinmemesidir. Bundan dolayı sistemdeki baralardan birinde aktif güç bilinmeyen seçilerek, bunu çözümün sonunda elde etmek gerekir. Bu yüzden üretim baralarından birinde aktif güç bilinmeyen seçilir ki bu baraya salınım barası denir. Salınım barası olarak üretim baralarından birinin seçilmesi mecburi olmamakla beraber çözüm için kolaylık sağlar [8, 16]. Bu bölümde güç akışı algoritmasında seçilecek salınım baralarının farklı olması durumlarında Jacobian matrisinin sınırlarında ne tür değişimler olacağı formülize edilmiştir. 4.Bölümde bu konu ile ilgili 5 baralı bir test sisteminde uygulamalar yapılmıştır.

n baralı bir güç sisteminde 1 numaralı baranın salınım barası seçilmesi durumunda aktif ve reaktif güçlere ait denklem setinin matrisel formunun 2.18a'da verilmiş olduğunu farzedelim. Buna göre 1 numaralı seçilen salınım barasının (n-1) numaralı bara olması durumunda güçlere ait denklem setinin matrisel ifadesi 2.18b'de

görüldüğü gibi olacaktır. Bu iki ifadede sınırlardaki değişikliklere dikkat edilmesi gerekmektedir [97].

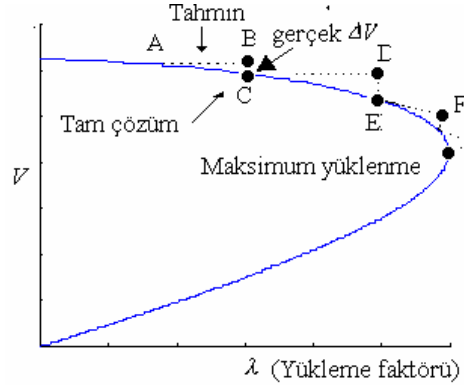
$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad (i \neq 1) \quad (2.18a)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad (i \neq n-1) \quad (2.18b)$$

2.4. Sürekli Güç Akışı

Geleneksel yük akışı ile yapılan çalışmalarda yüklenebilirlik sınırlarının bulunmasının bazı dezavantajları vardır. Bu nedenle çalışmada sürekli güç akışı metodu kullanılacaktır. Bu metod ile doğru sonuçların bulunmasının yanısıra sistemin yük artımı esnasında önemli bilgilerin elde edilmesi gerçekleşir. Metod iki adım tekniğine (tahmin etme ve düzeltme) dayanır ve sistemin sınırları çok kolay bir şekilde elde edilir. Bu metod özellikle büyük güç sistemlerinde hesaplama zamanı açısından oldukça elverişlidir. Yukarıdaki bilgilerden yola çıkarak bu metod gerilim çökmesi analizlerinde önemli bir rol oynar [80].

Bu metod bir güç sisteminin bir denge noktasından adım adım bir çatallaşma noktasına doğru yönelmesini izler. Çatallaşma noktasına iki adımla şu şekilde varılır. Temel yaklaşım sistemi bir denge noktasından diğer bir noktaya taşıyan bir sistem parametresi (λ) seçilmesi ve daha sonra tahmini bir değer seçilerek bu değer için güç akışı eşitliklerinin çözümünün yapılmasıdır. Daha sonra bir tanjant vektörü yardımıyla gerçek çözüme ulaşılır. Buna göre önce çözüm tahmin edilmekte daha sonra da düzeltilerek gerçek çözüme ulaşılmaktadır. kullanılır. PV eğrisi üzerinde bu adımlar Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Sürekli güç akışı tekniğinin gösterilmesi

Sistemin maksimum yüklenebilirlik sınırından sonra Newton-Raphson metodu ile çözüm yapılamayacak ve bu anda Jacobian matrisi tekil olmaya başlayacaktır. Bu durumda güç akışı eşitlikleri içerisinde bilinmeyenler için ilave eşitlikler yazılıp Newton-Raphson metodunun modifiye edilmesi suretiyle P-V eğrisinin kararsız olduğu bölgelerdeki değerlere ulaşılabilir.

Buna göre temel güç akışı eşitlikleri ve bilinmeyen λ değeri için ilave eşitlik aşağıdaki gibi verilsin;

$$\lambda K - f(\delta, V) = 0 \quad (2.19)$$

veya

$$F(\delta, V, \lambda) = F(x, \lambda) = 0 \quad (2.20)$$

$$e_k \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \mp 1 \quad (2.21)$$

burada x durum değişkeni vektörü $x = [\delta, V]$, K ise P ile Q arasındaki yüklenme profili, e_k seçilen parametreye bağlı olarak ∓ 1 diğer elemanları sıfır olan bir satır vektörüdür. İşaret, parametrenin artması veya azalmasına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin parametrenin (λ) işareti pozitif ise bu durumda yükün arttığı, eğer

parametrenin (V) işareti negatifse bu kez gerilimin aşağıya doğru azalmakta olduğu anlaşılır. (2.20) eşitliği lineerleştirilirse;

$$\frac{\partial F}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial F}{\partial V} dV + \frac{\partial F}{\partial \lambda} d\lambda = 0 \quad (2.22)$$

elde edilir. Bilinmeyen değerlerin tahmin edilmesi için aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}^{\text{tahmin}} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \varpi \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

burada $\begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ \dots \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} : \\ J : K \\ \dots : \dots \\ [e_k] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ : \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ şeklindedir.

Burada ϖ parametresi bir sonraki tahmin için adım uzunluğudur. Bu durumda x_k seçilen parametre olduğuna göre, $dx_k=1$ durumuna göre her adımda düzeltilmek suretiyle

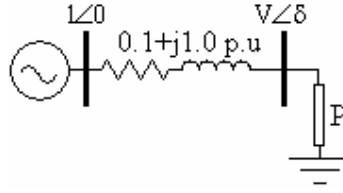
$$x_k^{\text{tahmin}} = x_{k0} + \varpi \quad (2.24)$$

$$x_k - x_k^{\text{tahmin}} = 0 \quad (2.25)$$

yazılabilir. Son olarak (2.20) numaralı denklem takımı çözümlenerek düzeltme adımı gerçekleştirilir ve tam çözüme ulaşılır [102].

2.4.1. İki baralı basit bir sistemde uygulanması

Şekil 2.4'de verilen sistemde bu metodun uygulaması yapılmış ve PV eğrisi çizdirilmiştir.



Şekil 2.4 İki baralı basit bir sistem

Yukarıdaki sistem için güç akışı eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$-P - 0.995V \cos(\delta - 95.7^\circ) - 0.995V^2 \cos(84.3^\circ) = 0$$

$$-0.995V \sin(\delta - 95.7^\circ) - 0.995V^2 \sin(84.3^\circ) = 0$$

ve Jacobian matrisi;

$$J = \begin{bmatrix} 0.995V \sin(\delta - 95.7^\circ) & -0.995V \cos(\delta - 95.7^\circ) - 1.99 \cos(84.3^\circ)V \\ -0.995V \cos(\delta - 95.7^\circ) & -0.995V \sin(\delta - 95.7^\circ) - 1.99 \sin(84.3^\circ)V \end{bmatrix} \text{şeklindedir}$$

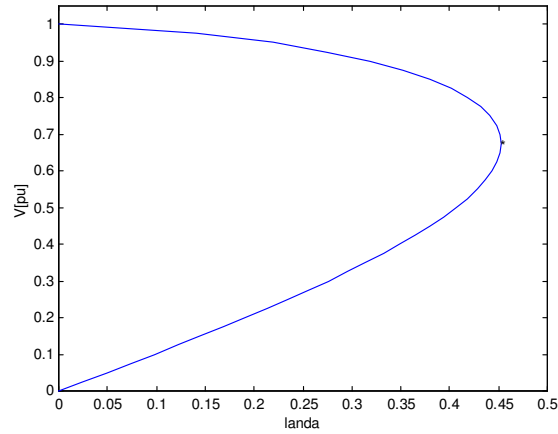
Sistemin yüklenme vektörü $\lambda K = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ve adım uzunluğu $\omega = 0.1$ için $e_k = [0 \ 0 \ 1]$;

çatallaşma noktasına yaklaşılan bölgelerde $\omega = 0.025$ için $e_k = [0 \ -1 \ 0]$ alınmıştır. Bu sisteme ait Tablo 2.1'de elde edilen değerler ve Şekil 2.5'de ise P-V eğrisi çizdirilmiştir.

Tablo 2.1 Örnek sistem için parametrik değerler

λ	0.1	0.2	0.3	0.4	.4174	.4405	.4511	.4525	.4517	.4487	.4371	.4288	.4190
V	.9847	.957	.9113	.8268	.8019	.7519	.7019	.6769	.6519	.6269	.5769	.5519	.5269

Tablo 2.1'de görüldüğü gibi örnek sistem için maksimum yüklenebilirlik noktası $\lambda_{\max} = 0.4525$ ve bu nokta için kritik gerilim değeri $V_{kr} = 0.6769$ p.u. olarak bulunmuştur. Buna göre P-V eğrisi aşağıdaki gibi çizdirilmiştir.



Şekil 2.5 Örnek sistem için P-V eğrisi

2.5. Duyarlılık Analizi

Elektrik enerji sisteminde, reaktif güç kompanzasyon kaynaklarının yerlerini belirlemek için mühendislik deneyimi ve çeşitli kriterlere göre yapılan duyarlılık analizlerine dayalı yöntemler vardır.

Bir güç sisteminde yapılan reaktif güç kompanzasyonunun kararlılık üzerindeki etkisine ilave olarak, sistem aktif güç kayıpları ve gerilim profilleri üzerinde de etkisi vardır. Bu nedenle reaktif güç kompanzasyonu için Savulescu, sürekli-hal kararlılığı, gerilim kontrolü ve aktif güç kaybı ile ilişkili üç sistem göstergesi amaçlamıştır [83]. Duyarlılık ilişkilerine dayalı bu göstergeler bazı düzeltmeler ile daha sonra, reaktif güç aygıtı yerleştirmek için aday baraların sıralamalarının belirlenmesinde kullanılmıştır [74, 76].

Gerilime göre reaktif gücün değişimini veren $\partial Q / \partial V$ terimi de sistemin kararlılığı hakkında bilgi verir. $\partial Q / \partial V$ 'nin sıfırdan geçişi, kararsızlığın başlangıcına işaret eder [84]. Bara güçleri için düğüm fark eşitliği matris formunda,

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P / \partial \delta & \partial P / \partial V \\ \partial Q / \partial \delta & \partial Q / \partial V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

olarak ifade edilir. Genel olarak ,ayrık (decoupled) yük akışı algoritmasında, $\partial P/\partial V = 0$ ve $\partial Q/\partial \delta = 0$ olduğu göz önüne alınır. Böylece,

$$\begin{aligned} [\Delta P] &= [\partial P/\partial \delta] [\Delta \delta] \\ [\Delta Q] &= [\Delta Q/\partial V][\Delta V] \end{aligned} \quad (2.27)$$

olur. ΔQ ve ΔV 'de ki küçük değişmeler için, köşegen elemanlar $\partial Q_i/\partial V_i$, sürekli-hal kararlılığı göstergeleridir. Eğer generatör baraları elimine edilirse

$$[\Delta Q] = [\Delta Q_L/\partial V_L][\Delta V_L] \quad (2.28)$$

olur. Burada, L indisi yalnızca yük baralarının göz önüne alındığını gösterir. Köşegen elemanlar $\partial Q_i/\partial V_i$ 'nin daha büyük değerine sahip olan baralar endüktif reaktif gücün daha fazla değişmesine karşı koyabilir. Buradan hareketle, $\partial Q/\partial V$ 'nin yük baraları için olan $\partial Q_{L_i}/\partial V_{L_i}$ köşegen elemanları küçükten büyüğe doğru sıralanır, sürekli-hal kararlılığı bakımından reaktif güç değişmesine en duyarlı bara sıralaması elde edilmiş olur [74].

Kapasitif reaktif güç yerleştirilecek aday bara sıralamasının elde edilmesi için yukarıda verilen yöntem ayrık(decoupled) yük akışı yöntemine dayanılarak elde edilebilir. Jacobian matrisinin tanımını kullanarak V-Q duyarlılığı ilişkisinden de sürekli-hal gerilim kararlılığı açısından aday bara sıralaması için bir gösterge elde edilir. Gerilim kararlılığı incelemelerinde Q-V eğrilerini tam olarak elde etme, sistemdeki başka problemler nedeniyle yük akışının ıraksaması yüzünden mümkün olmayabilir. Ayrıca bu eğrileri elde etmek oldukça zaman tüketici işlemlerdir. Bu yüzden gerilim kararlılığı incelemelerinde V-Q duyarlılığına dayalı yaklaşım kullanılabilir. Bir güç sistemi için Newton-Raphson yönteminden,

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

olup, burada ΔP bara aktif gücündeki, ΔQ bara reaktif gücündeki, $\Delta \delta$ bara gerilim açısındaki ve ΔV bara gerilim genliğindeki artımsal değişimlerdir.

Jacobian matrisinin elemanları ise yük akışı ve bara gerilim değişimleri arasındaki duyarlılığı verir. Sistem gerilim kararlılığı P ve Q'nun her ikisinden birden etkilenir. Bununla beraber, her bir işletme noktasında biz P'yi sabit tutabiliriz ve Q-V arasındaki artımsal ilişkiyi göz önüne alarak gerilim kararlılığını değerlendirebiliriz. Bu Q-V eğrisi yaklaşımına benzerdir. Formülasyonda, P'deki artımsal değişimlerin etkileri, farklı işletme koşullarında Q ve V arasındaki artımsal ilişki incelenerek göz önüne alınır. Yukarıdaki göz önüne almalara dayanan, denklem 2.29'da $\Delta P=0$ alınır,sa,

$$\Delta Q = [J_4 - J_3 \cdot J_1^{-1} \cdot J_2] \Delta V = J_R \Delta V \quad (2.30)$$

yazılabilir. Burada J_R sistemin indirgenmiş jacobian matrisidir. Eşitlik (2.30)'dan

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (2.31)$$

yazılabilir. O zaman J_R^{-1} matrisi, indirgenmiş V-Q jacobianıdır. J_R^{-1} 'in i nci köşegen elemanı, bara i deki V-Q duyarlılığıdır. Bir baradaki V-Q duyarlılığı, verilen işletme noktasında Q-V eğrisinin eğimini gösterir. Pozitif V-Q duyarlılığı ise kararlı bir işletimin göstergesidir. Buna göre daha küçük duyarlılık ise daha kararlı bir sistemdir. Kararlılık azaldığı zaman duyarlılığın genliği artar, kararlılık sınırında ise sonsuz olur. Tersine; bir negatif duyarlılık, kararsız işletimin göstergesidir. Buna göre küçük negatif duyarlılık ise çok kararsız bir işletim durumunu gösterir [2,16]. Böylece eğer biz kararlı bir işletim durumunda J_R^{-1} 'in köşegen elemanlarını büyükten küçüğe doğru sıralarsak, baraları da reaktif güç bakımından kararsızlığa yakınlıklarına göre sıralamış oluruz.

2.6. Çatallaşma Analizi

Bir çizgi üzerindeki vektör alanlarının dinamiği çok sınırlıdır; tüm çözümler ya bir dengeye oturur yada $\pm\infty$ 'a gider. Dinamiğin bu basitliği yanında tek boyutlu

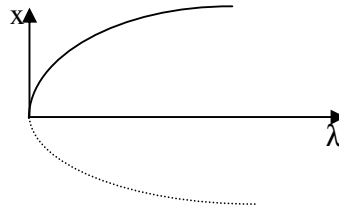
sistemlerin ilginçliği parametrelere olan bağlılıktır. Akışın nitel özellikleri parametrelerdeki değişime bağlı olarak değişebilir. Yani sabit noktalar yaratılabilir, veya yok edilebilir. Bu noktaların kararlılığı değişebilir. Dinamikteki bu değişmelere çatallaşma, değişimin görüldüğü parametre değerlerine de çatallaşma noktaları denir [30].

2.6.1. Eyer-Düğüm çatallaşması

Bu çatallaşma en temel çatallaşmadır. Eyer-düğüm çatallaşması sabit noktaların yaratılması veya yok edilmesini sağlayan temel mekanizmadır. Bir parametre değiştirilmedikçe iki sabit nokta birbirine doğru hareket eder, çarpışır ve birbirini yok eder.

$$\dot{x} = -x^2 - \lambda \quad (2.32)$$

$\lambda \geq 0$ için yukarıdaki eşitliğin denge noktaları bir parabol eğrisi formundadır. $\lambda > 0$ için iki adet denge noktası bulunabilir. $+\sqrt{\lambda}$ kararlı, $-\sqrt{\lambda}$ kararsız denge noktasıdır. $\lambda = 0$ için sadece bir çözüm mevcuttur ki, o çatallaşma noktasıdır.



Şekil 2.6 Çatallaşma diyagramı

Şekil 2.6 çatallaşma olayını göstermektedir. Kesiksiz çizgiler kararlı, kesikli çizgiler ise kararsız kolları göstermektedir. $(0,0)$ noktası çatallaşma noktasıdır ve bu noktada sistem sıfır özdeğere sahiptir. Bir sistemde çatallaşma şartları aşağıdaki gibi verilebilir [85].

$f_x(x_0, \lambda_0)$ bir tek basit özdeğere sahip olmak üzere v sağ özvektör w sol özvektörü gösterebilir,

$$D_x f_0^T w = D_x f_0 v = 0 \quad (2.33)$$

$$w^T \frac{df}{d\lambda} \Big|_0 \neq 0 \quad (2.34)$$

$$w^T [D_x^2 f_0 v] v \neq 0 \quad (2.35)$$

2.6.2. Hopf çatallaşması

Hopf çatallaşması, sistem kararlı bir denge noktasında çalışmakta iken yük artışına paralel olarak sistem matrisine ait bir çift özdeğerin kompleks düzlemin sol yarı bölgesinden sağ-yarı bölgesine geçmesiyle oluşmaktadır. Bu çatallaşma noktasında sistem sanal eksen üzerinde bulunan iki adet özdeğere sahiptir ve bu özdeğerler sistemde salınımlı kararsızlıkların oluşmasına sebep olmaktadır.

2.7. Güç Sistemlerinde Çatallaşma Analizi

Güç sistemlerinde çatallaşma, bir sistemin parametrelerinin değişimleri yüzünden dinamik davranışında ki değişimdir. Çatallaşma noktası aşağıdaki denklemlerle bulunabilir.

$$f(x, \lambda) = \dot{x} \quad (2.36)$$

Burada x durum değişkeni ve λ sistemi bir denge noktasından diğer bir noktaya taşıyan bir sistem parametresidir [85].

Güç sistemlerinde parametre değişimine bağlı olarak oldukça kompleks dinamikler gözlenebilmektedir. Bunlardan en yaygın olanı yük artışının bir sonucu olarak denge noktalarının çatallaşmasıdır. Çatallaşma teorisi güç sistemlerindeki açısallık ve gerilim kararlılığı gibi değişik sorunların analizinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir [63].

Bir eyer-düğüm çatallaşma noktasında genellikle biri kararsız bir diğeri kararlı olan noktalar eyer- düğüm noktasında birleşmeye başlarlar ve tam çatallaşma noktasında iki nokta kaybolur. Bu noktada Jacobian sıfır bir özdeğere sahiptir ve Jacobian'ın determinantı sıfırdır. Bu noktada seçilen parametre değeri çatallaşma değerini

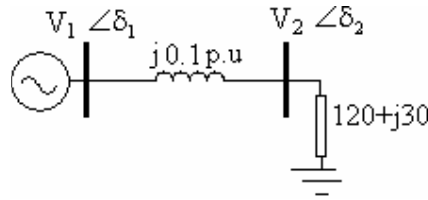
almıştır. Böylece eyer-düğüm noktası çatallaşması için gerekli şartlar aşağıdaki gibi olur.

$$f(x_0, \lambda_0) = 0 \quad , \quad \det \mathbf{J} (f(x_0, \lambda_0)) = 0 \quad (2.37)$$

Eyer-Düğüm Çatallaşması noktası (SNB) güç sistemlerinde gerilim çökmesi problemleriyle ilişkilendirilerek sistemin dinamik kararsızlığı için temel bir fikir verir [51,52,53].

2.7.1. İki baralı basit bir sistemde uygulanması

Şekil 2.7'de gösterildiği gibi iki baralı basit bir güç sistemi düşünelim.



Şekil 2.7. İki baralı örnek sistem

Bu sistemde yük barasına ait güçakışı denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= -1.2 * (1 + \lambda) - 10 * V_2 * \sin(\delta_2) = 0 \\ \Delta Q_2 &= -0.3 * (1 + \lambda) - 10 * V_2 * \cos(\delta_2) - V_2^2 = 0 \end{aligned}$$

$$F(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.38)$$

$$\text{burada } F'(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix} \text{ ve durum vektörü } \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$F'(X)$, $F(x)$ 'in Jacobienidir . Jacobien matrisi ;

$$F'(x) = \begin{bmatrix} 10*V_2 * \cos(\delta_2) & 10*V_2 * \sin(\delta_2) \\ -10*V_2 * \sin(\delta_2) & 10*\cos(\delta_2) - 20*V_2 \end{bmatrix} \text{şeklindedir.}$$

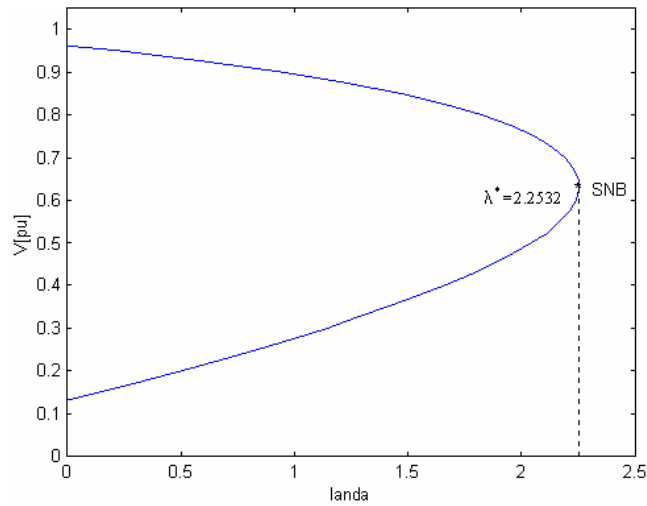
Çatallaşma noktasının bulunması için jacobien matrisinin tekil olduğu bir başka ifadeyle determinantının sıfır olduğu nokta araştırılmalıdır.

$$\det[F'(x^*)]=0 \quad (2.39)$$

2.38 ve 2.39 'da verilen nonlinear denklem sistemi çözümlenerek sistemin çatallaşma noktasına ulaşılır. Denklem sisteminin çözümü sonucunda elde edilen sonuçları Tablo 2.2'de verilmiştir. Buna göre çatallaşma parametresi (λ^*) 2.2532 ve çatallaşma noktasındaki gerilim değeri (V_2^*) 0.6343 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.2 Yük barasına ait çatallaşma noktasını gösteren sonuçlar

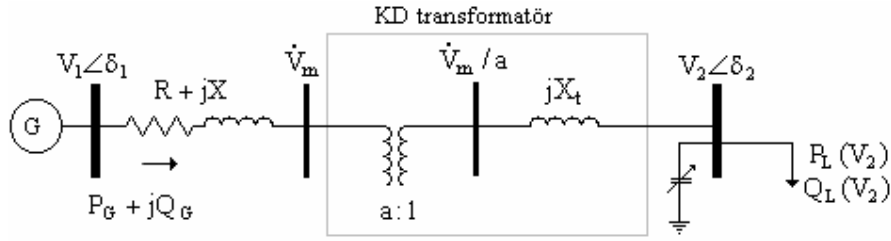
Yüklenme faktörü (λ^*)	[-1.] [2.2532350266850630727306352666397] [-6.3365683600183964060639685999730]
Bara gerilimi (V_2^*)	[0] [.63435238566545023108509076697931] [.81246356890666297258505584593943]
Bara açısı (δ_2^*)	[D] [-.66290883183401623252961960521424] [.90788749496088038670170208642551]



Şekil 2.8 Güç sistemine ait P-V eğrisi ve sistemin eyer düğüm noktası

BÖLÜM 3. GÜÇ SİSTEM MODELİ

Bir güç sisteminin kararlılık analizi için matematiksel modelleri generatör, transformator, baralar, iletim hatları, yükler ve FACTS kontrolörlerinden oluşan sistem bileşenlerini gösteren diferansiyel ve cebrik eşitliklerden oluşur. Sistemin dengeli bir sistem olduğu kabul edilmekte ve sistem modeli tek faz için oluşturulmaktadır. Şekil 3.1’de bu bileşenlerden oluşan bir güç sistemi gösterilmiştir. Bu bölümde sırasıyla bu bileşenlere ait modeller tanıtılarak kısa açıklamalar yapılacaktır.



Şekil 3.1 Bir güç sistemi gösterimi

3.1. Generatör Modeli

Enerji üretim sistemlerinde yapısı ve kontrolünün uygun olmasından dolayı senkron generatörler kullanılmaktadır. Bir senkron makinanın matematiksel modelleri temel klasik devre eşitlikleri kullanılarak elde edilir. Makinanın mekanik hareket denklemi iki kısmi diferansiyel eşitlik olarak elde edilir. Generatörün mekaniksel dinamiğini ifade eden durum denklemleri salınım eşitliklerinden faydalanılarak aşağıdaki gibi yazılırlar.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} (P_M - P_G - D_G \omega) \quad (3.1)$$

$$\dot{\delta} = \omega \quad (3.2)$$

burada δ generator açısı, ω açısal hız, sırasıyla M ve D_G generator eylemsizlik ve sönümlenme sabitleri, P_G generatörün elektriksel çıkış gücü, P_M generatör için mekanik giriş gücüdür [10]. Senkron makine modelleri geçici hal kararlılık analizlerinde oldukça fazla çalışılmıştır. Geçici hal ve alt-geçici hal davranışları gibi daha detaylı modeller [14-16]'da verilmiştir. Gerilim çökmesi senaryolarında alt-geçici hal olayı pek etkili olmadığından ihmal edilebilir.

3.2. Yük Modelleri

Elektrik güç sistemlerinde yüklerin karakteristikleri çeşitlilik göstermektedir. Yüklerin bu davranışlarından dolayı onlara ait çok sayıda çeşitli model yaklaşımları yazılmıştır. Bunlar statik yük modelleri (sabit empedans, sabit güç, sabit akım ve bu modellerin kombinasyonları ile) dinamik yük modelleri olarak iki ana gruba ayrılabilir [40]. Genellikle hem güç sistemleri mühendisleri ve hem de akademik araştırmacılar güç ve gerilim arasındaki ilişkiyi göstermek için sistem kararlılığı ve planlama çalışmalarını statik yük modellerinden yararlanarak yapmaktadırlar. Bu modeller, statik ve zamanla değişmeyen olduğu için, çeşitli çalışma durumlarında yük davranışları başarılı bir şekilde elde edilememektedir. Bazı yayınlarda bu statik yük modellerinin başarısından şüphelenilmekte ve yükün davranış düşüncesinin belirgin olmadığı gözlenmektedir. Üstelik yük davranışı çoğunlukla dinamiktir. Zamanın herhangi bir anında gerilim ve frekans değişimleri başladığında aktif ve reaktif güçlerde de değişim başlamaktadır. Bununla birlikte gerilim çökmesi dinamik bir olaydır. Bu sebepler yüzünden dinamik yük modelleri düşünülmelidir [45].

3.2.1. Gerilime bağlı yükler (Statik yük modelleri)

Yük talebi olarak adlandırdığımız aktif ve reaktif gücün gerilimin bir fonksiyonu olarak ifadesine yük karakteristiği adı verilir. z talep güç olmak üzere yük talebi ile tüketilen gerçek güç P, Q arasındaki farkı en açık bir şekilde açıklamak önemlidir. Bu fark temel kararsızlık mekanizmasını anlamak için gereklidir. Güç tüketimi azalması sonucu talep artmıştır [57].

3.2.1.1. Üstel yük modeli

Yaygın bir şekilde kullanılır ve üstel yük olarak bilinir.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{z_p} \quad (3.3.a)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{z_q} \quad (3.3.b)$$

burada z boyutsuz bir talep değişkenidir. V_0 referans gerilimi z_p ve z_q yük tiplerine bağlıdır (motor, ışık, ısı,...). P_0 ve Q_0 , V_0 referans gerilimine göre V gerilimi altında tüketilen aktif ve reaktif güçlerdir. Bunlar nominal güç yükleri olarak isimlendirilir. Burada $z_p = z_q = 2$ olduğunda sabit empedans yükü, $z_p = z_q = 1$ olduğunda sabit akım yükü ve $z_p = z_q = 0$ olursa sabit güç yükleri karakteristiğini verir.

Yük akışı çalışmalarında çeşitli test sistemleri dengeli bir çalışma noktasından başlayıp bir yüklenme faktörü (λ) ile arttırılmış ve güç akışı denkleminin tekil noktaya (Newton- Raphson iterasyonunun ıraksadığı) ulaşıncaya kadar devam edilerek P-V eğrileri elde edilmiştir. Bu durumda aşağıdaki gibi bir ifade yazılabilir.

$$P_i = P_0(1+\lambda) \quad (3.4)$$

$$Q_i = Q_0(1+\lambda) \quad (3.5)$$

burada P_0 ve Q_0 başlangıç anındaki güçlerdir. P_i ve Q_i i.barada λ ile belirlenen aktif ve reaktif güçlerdir [77].

3.2.2. Dinamik yük modelleri

Statik modeller sadece ± 10 'luk bir gerilim değişimleri için geçerli olabilir. Deşarj lambaları ve motorlarda büyük gerilim değişimleri için bu modeller yeterli değildir.

Üstel(exponansiyel) modellerle yapılan dinamik simülasyonlarda üs değerinin 1'den daha küçük olduğu durumlardan şüphelenilmelidir [2]. Gerilim çökmesi analizlerinde kullanılacak iyi bir yük modelinden büyük gerilim değişimlerinde bile çalışma noktasından çatallaşma noktasına kadar olan mesefade iyi sonuçlar vermesi beklenir. Bu tezde dinamik simülasyonlar yapılırken (3.1)- (3.2) denklemlerine ilave olarak aşağıda verilen aktif ve reaktif güçlere ait dinamik yük modeli kullanılmıştır [72].

$$\dot{\delta} = \frac{1}{D_L} (P_L - P_0 - P_V \left(\frac{V}{V_0}\right)^{z_p}) \quad (3.6.a)$$

$$\dot{V} = \frac{1}{\tau} (Q_L - Q_0 - Q_V \left(\frac{V}{V_0}\right)^{z_q}) \quad (3.6.b)$$

burada sırasıyla P_L ve Q_L çalışma noktasındaki, P_0 ve Q_0 başlangıçtaki aktif ve reaktif güçlerdir. V ve V_0 çalışma noktası ve başlangıç gerilim değerleridir. D_L ve τ sırasıyla dinamik yüke ait frekans ve gerilim zaman katsayısı, z_p ve z_q aktif ve reaktif yüklere ait üstel parametrelerdir. Son yıllarda, dinamik davranışlar gerilim kararsızlığında geniş bir şekilde çalışılmış ve gerilim kararlılığı analizlerinde oldukça geniş bir yer tutmaktadır. Böylece yükler, kademe değiştirici transformatörler, gerilim kontrol cihazları ve generatörler gibi cihazların dinamik gösterimleri bu modeller sayesinde oldukça uygun bir hal almıştır. Dinamik yük modellemesi araştırmacıların takip konusu olmuştur [4].

3.2.2.1. Basit bir dinamik yük modeli

Bir dinamik yük modeli yük davranışını bir takım diferansiyel eşitlikler kullanarak açıklamaya çalışır. Örneğin gerilimde meydana gelen bir adım azalması değişimine karşın yük toparlanarak eski haline dönmeye çalışır.

Bu tür yüklerin dinamik cevapları aşağıdaki birinci mertebeden diferansiyel denklemlerle ifade edilir.

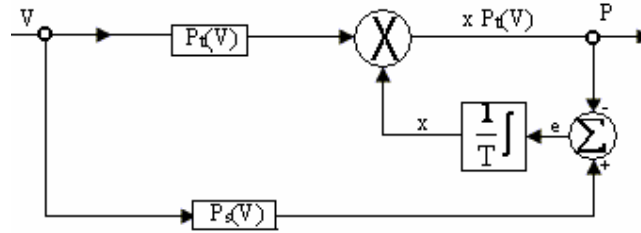
$$T_{Gi} \dot{G}_i = P_0 - G_i V_i^2 \quad (3.7.a)$$

$$T_{Bi} \dot{B}_i = Q_0 - B_i V_i^2 \quad (3.7.b)$$

burada sırasıyla T_{Gi} ve T_{Bi} konduktans ve suseptansa ait zaman sabitleri G_i ve B_i i.nci baraya bağlı yükün konduktans ve suseptans değeri, P_0 ve Q_0 başlangıçtaki aktif ve reaktif güçler V_i i.nci baradaki gerilimdir. Böylece herhangi bir anda çekilen toplam güç $P = GV^2$ olarak yazılabilir.

3.2.2.2. Genel dinamik yük modeli

Gerilimdeki adım değişimine karşı yük cevabını verecek genel dinamik yük modeli Şekil 3.2'de önerilmiştir.



Şekil 3.2 Bir genel dinamik yük modeli

Bu modelde, x durum değişkeni, $P_t(V)$ ve $P_s(V)$ geçici ve sürekli hal yük karakteristikleridir

$$P_t = V^{\alpha_t} \quad \text{veya} \quad P_t = c_2 V^2 + c_1 V + c_0 \quad (3.8)$$

$$P_s = P_0 V^{\alpha_s} \quad \text{veya} \quad P_s = P_0 (d_2 V^2 + d_1 V + d_0) \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada V yük geriliminin büyüklüğüdür. Sürekli halde modelin durum değişkeni x 'in sabit olduğu görülmektedir. İntegrasyon girişi $e = P_s - P_d$ sıfır olması durumunda modelin çıkışı sürekli, hal karakteristiği ile isimlendirilir ve $P_s = P_d$ olur. Gerilimde ani bir değişim olması halinde x bozucu etki öncesi başlangıç değerine dönmeye çalışır. Çünkü integrasyon bloğunun çıkışı ani bir şekilde değişemeyecektir. Geçici hal çıkışı geçici hal karakteristiği ile $P_d = x P_t$ şeklinde ifade edilir. Model çıkışı ile sürekli hal yük talebi arasındaki fark hata sinyalidir ve e ile gösterilir. Bu sinyal integrasyon bloğuna durum değişkeni x 'in değişmesiyle geri besleme yoluyla aktarılır. Bu süreç yeni bir sürekli hal değerine ulaşmaya dek

($e=0$) devam eder. Aktif (P_d) ve reaktif güç (Q_d) dinamiklerini de ihtiva eden yük modelinin analitik ifadeleri aşağıdaki gibidir [59].

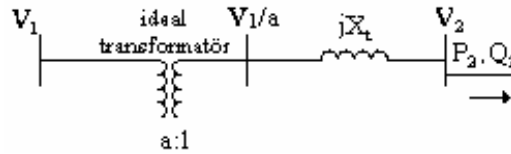
$$T_p \frac{dx}{dt} = P_s(V) - P_d, \quad P_d = xP_t(V) \quad (3.10)$$

$$T_q \frac{dy}{dt} = Q_s(V) - Q_d, \quad Q_d = yP_t(V) \quad (3.11)$$

burada $P_t(V) = V^{\alpha_t}$, $P_s(V) = V^{\alpha_s}$ ve $Q_t(V) = V^{\beta_t}$, $Q_s(V) = V^{\beta_s}$ şeklindedir.

3.3. Kademe Değiştirici Transformatörlerin (KDT) Modellenmesi

Bu bölüm de Ayrık ve Sürekli model olarak isimlendirilen iki tip kademe değiştirici modellenmesi anlatılacaktır. Sabit bir kaçak reaktansa (X_t) sahip transformatörün rezistansının ve magnetik reaktansının ihmal edilmiş olduğunu farzedelim. Şekil 3.3'de kademe değiştiricinin tek hat eşdeğer diyagramı çizilmiştir.



Şekil 3.3 Bir kademe değiştiricinin eşdeğer devresi

3.3.1. Ayrık kademe değiştirici modeli

Kademe değiştirici harekete geçtiği zaman transformatör oranı bir kademe adımı tarafından ani bir şekilde ya düşecek ya da yükselecektir. Her bir kademenin adım aralığını Δa ile göstereceğiz. $k=0,1,2,\dots$ olmak üzere t_k kademe değiştiricinin ayrık zamanda ani çalışmasını gösterebilir. Buna göre;

$$t_{k+1} = t_k + \Delta T_k \quad (3.12)$$

Dikkat edilmelidir ki ayırık zaman sistemleri birbirine benzememektedir. t_k bağımsız bir değişken değildir. ve ΔT_k 'nin sabit olması gerekmez. Genelde cihaz karakteristiklerine ve gerilim hatasına bağlıdır. Akıllı bir sayaç k 'dan $k+1$ 'e ilerleyecek, bu esnada zaman t_k 'dan başlayıp ilerleyerek ΔT_k 'ya ulaşacak ve ΔT_k 'yı geçecektir. ΔT_k ' sabitleyen ve ters zaman gecikmesi ile ilgili gelenekselleşmiş bir formül aşağıdaki gibidir.

$$\Delta T_k = T_d \frac{d}{|\dot{V}_2 - \dot{V}_2^0|} + T_f + T_m \quad (3.13)$$

burada V_2 kontrollü gerilim V_2^0 referans gerilimi d kademe değiştiricinin ayarlanan band genişliğinin alt yarısı T_d ise ters zaman karakteristiğinin maksimum zaman gecikmesi, T_f kasıtlı zaman geciktirmesi ve T_m ise kademe değiştirmek için geçen zamandır. Buna göre;

$$a_{k+1} = \begin{cases} a_k + \Delta_k & \text{şayet} & \dot{V}_2 > \dot{V}_2^0 + d & \text{ve} & a_k < a^{\max} \\ a_k - \Delta_k & \text{şayet} & \dot{V}_2 < \dot{V}_2^0 - d & \text{ve} & a_k > a^{\max} \\ a_k & \text{aksi takdirde} & & & \end{cases} \quad (3.14)$$

burada a^{\max} ve a^{\min} en düşük ve en yüksek kademe sınırlarıdır. k sayacı sıfıra ayarlanarak her bir t_0 anında hata gerilimi,

$$k=0 \text{ şayet } |V_2(t_0^+) - V_2^0| > d + \varepsilon \text{ ve } |V_2(t_0^-) - V_2^0| \leq d + \varepsilon \quad (3.15)$$

burada ε band genişliğinin genişlemesini ve daraltılmasını sağlayan bir terimdir. İlk kademe değiştirme işleminin zaman gecikmesi için denklem (3.8)'e göre

$$\Delta T_0 = T_{d0} \frac{d}{|\dot{V}_2 - \dot{V}_2^0|} + T_{f0} + T_m \quad (3.16)$$

burada T_{d0} , T_{f0} ters zaman değerleridir ve birinci kademe adımı için sırayla kasıtlı olarak sabitlenir. Sonradan gelen kademeler sabit bir zaman aralığında denklem (3.13)'e göre uygun performans gösterirler. Ardışık olmayan çalışma modunda

sonradan gelen kademeler ve zaman arasında bir farklılık yoktur. Zaman başlangıcından itibaren hata ayarlanan band sınırlarını ya aşar ya da kademe değiştirici harekete geçer. (3.13) denkleminde göre zaman gecikmesi bulunabilir.

3.3.2. Sürekli kademe değiştirici modeli

Bu model $a(t)$ 'nin sürekli bir şekilde değişimine dayanır. $a(t)$ a_{\min} ile a_{\max} arasındaki tüm gerçek değerleri alabilir. Genellikle sürekli kademe değiştirici modelde ayarlanan band sınırlarının etkisi ihmal edilir. Bu nedenle diferansiyel eşitlik aşağıdaki gibi [58] yazılabilir.

$$T_c \frac{da(t)}{dt} = \dot{V}_2 - \dot{V}_2^0 \quad a^{\max} \leq a \leq a^{\min} \quad (3.17)$$

Denklem (3.17) kullanıldığı zaman kademe değiştiricinin bir integral karakteristik kontrollü olarak modellendiğine dikkat edilmelidir. Sürekli kademe değiştirici modeli ayrık kademe değiştirici modellerinden daha az doğrudur, fakat faydalı bir yaklaşımdır. Özellikle analitik çözümler için elverişlidir. Zaman simülasyonlarında kullanımı sınırlıdır. Denklem (3.17) ile verilen model $T_f = T_m = 0$ alınarak ardışık olmayan sürekli bir kademe değiştiricinin yaklaşık modelidir. T_c ise;

$$T_c = \frac{T_d}{\Delta a} \quad (3.18)$$

şeklinde. Pratikte mekanik zaman gecikmesinin (T_m) önüne geçilemeyeceğine göre bunu kompanze etmek için daha büyük bir zaman sabitine ihtiyaç duyulur [12].

3.4. Şebekenin Modellenmesi

N baralı bir sistemde gerilim akım ilişkisi vektörel formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

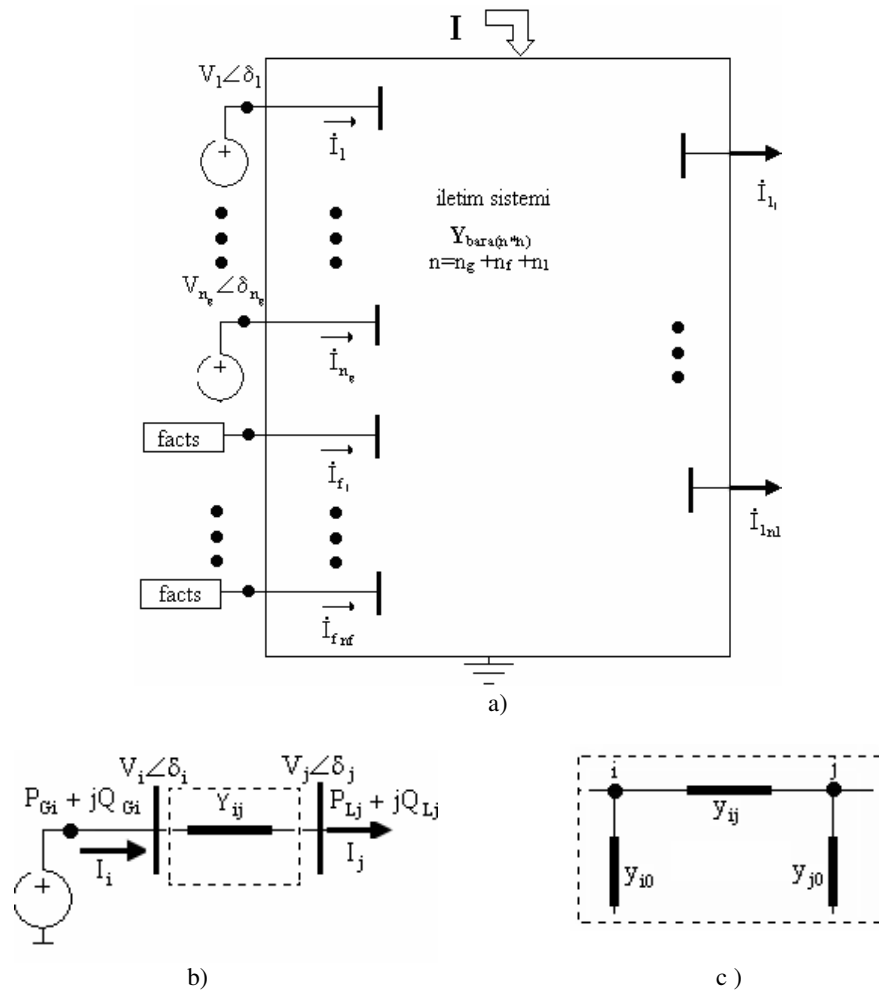
$$\bar{I} - \dot{Y}_{\text{bara}} \bar{V} = 0 \quad (3.19)$$

burada sırasıyla \bar{I} ve \bar{V} fazör olarak n boyutlu enjektörde akım ve gerilim vektörü, \dot{Y}_{bara} n*n boyutlu bara admitans matrisidir.

Bir güç sisteminin baraları ve bağlı düğümlerindeki güç injeksiyon değerleri güç akışı hesaplamaları sonucu elde edilen bilgilerle değerlendirilir. Admitans matrisi olarak adlandırılan \mathbf{Y}_{bara} tüm sistemin düğümleri arasındaki bağlantı matrisidir (Şekil 3.4a) [39]. Burada n , bara sayısı, n_g , generatör n_f facts cihazları ve n_l , yük baralarının sayısıdır.

3.4.1 İki kapılı şebekenin modellenmesi

Güç akışı eşitliklerini açıklamak için Şekil 3.4b'de verildiği gibi i ve j . nci baralar arasında bağlı iki kapılı devre modeli gerçekleştirilebilir. İki kapılı modellenen bu tür sistemlerin admitans matrislerinin simetrik olduğuna dikkat edilebilir.



Şekil 3.4. N baralı güç sisteminin a) Genelleştirilmiş gösterimi b) İndirgenmiş sistem c) İki kapılı indirgenmiş sistemin pi eşdeğer devresi

Buna göre $Y_{ij} = Y_{ji}$ yazılabilir. Şekil 3.4b'deki bu iki kapılı devrenin, pi eşdeğer devresi Şekil 3.4c'de görüldüğü gibidir.

İndirgenmiş iki kapılı sistemin admitans matrisi aşağıdaki formda yazılabilir.

$$Y_{\text{bara}_{\text{ind}}} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{ij} + y_{i0} & -y_{ij} \\ -y_{ji} & y_{ji} + y_{j0} \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

Şekil 3.4b'de gösterilen i ve j baraları arasında iki kapılı şebekenin denklem 3.20'de yazılan admitans matrisine bakılarak pi eşdeğer devre sabitleri bulunabilir. Buna göre güç akışı eşitliklerinden i. baraya ait aktif ve reaktif güç sırasıyla P_{gi} ve Q_{gi} aşağıdaki gibi bulunur .

$$P_{gi} = V_i V_j (c_1 \cos \delta + c_2 \sin \delta) + \frac{V_i^2 (d_1 b_1 + d_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} - \frac{V_i V_j}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) + (d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] \quad \dots(3.21)$$

$$Q_{gi} = V_i V_j (c_1 \sin \delta - c_2 \cos \delta) + \frac{V_i^2 (d_1 b_2 - d_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} - \frac{V_i V_j}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) - (d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] \quad \dots(3.22)$$

benzer şekilde **j.** bara için aktif ve reaktif güçler,

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) - V_j^2 (a_1 b_1 + a_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (3.23)$$

$$Q_{ij} = \frac{V_i V_j (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - V_j^2 (a_1 b_2 - a_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (3.24)$$

Burada iki kapılı indirgenmiş sistemin pi eşdeğer sabitleri $\dot{A} = a_1 + ja_2$, $\dot{B} = b_1 + jb_2$, $\dot{C} = c_1 + jc_2$, $\dot{D} = d_1 + jd_2$ şeklindedir.(EK B.1)

BÖLÜM 4. GERİLİM KARARLILIĞININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Bir elektrik enerji iletim sistemi, bara gerilimleri belirli sınırlar içerisinde kalacak şekilde enerjinin güvenli ve kaliteli bir şekilde iletimini sağlamalıdır. Sanayileşmeyle birlikte giderek artan elektrik enerjisi ihtiyacı, elektrik enerji iletim sistemlerinde kabul edilebilir gerilim profili oluşturmayı zorlaştırmaktadır [99].

Gerilim kararsızlığının birincil nedeni, normal olmayan sistem çalışmaları veya kontrolör davranışları altında, yük taleplerini karşılamaya çalışan belirli sistem baralarına yeterli reaktif gücün verilemeyişiştir.

Tezin bu bölümünde gerilimin kontrolü ve gerilim kararsızlığına ne den olan reaktif güç kontrolü üzerinde durularak gerilim kararlılığının iyileştirilmesi yönünde çalışma verilmiştir. Öncelikle gerilim düzenleyici transformatörler kullanılarak tüketici baralarındaki gerilimin ayarlanması ile aktif ve reaktif güç akışı kontrolünün gerçekleştirilmesi teori detayları ve ilgili matematiksel modelleri elde edilerek verilmiştir. Bu bölümün ikinci kısmında ise son yıllarda güç elektroniği endüstrisinde meydana gelen değişimler neticesinde iletim hatlarının kompanzasyonun da oldukça yaygın olarak kullanılan FACTS cihazlarının tanıtımı yapılarak SVC ile TCSC cihazlarının güç akışı modelleri verilmiştir. Bu bölümün sonunda Stag-El Abiad'ın 5 baralı güç sisteminde gerilim ve reaktif güç düzenleyici bu cihazların uygulaması anlatılacaktır. Gerilim kararlılığı analizi yapılırken ikinci bölümde teorisi anlatılan sürekli güç akışı tekniği kullanılarak P-V eğrileri çizdirilmiştir.

4.1. Gerilim ve Aktif Gücün Kontrolü

Güç sistemlerinde reaktif güç ve gerilimin kontrolü gerilim kararlılığı çalışmalarında çok önemli bir konudur. Gerilim kontrolünün hedefi iletim hatlarında meydana gelen

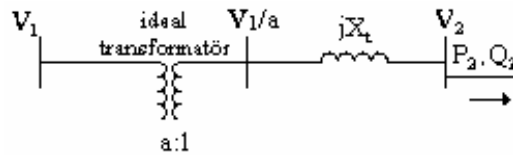
çeşitli yük değişimlerini kompanse etmek için tüketici barasında ki gerilimin belirli sınırlar içerisinde muhafaza edilmesidir.

Güç sistemlerinde gerilim düzenleyici transformatörler kullanılarak aktif ve reaktif güç akışı kontrolü sağlanmaktadır. Gerilim düzenleyici transformatörler içerisinde kademe ayarını değiştirerek bara gerilimini istenilen değerde tutup reaktif güç akışını düzenlemek için kademe değiştirici transformatörler ile hat sonundaki gerilimin faz açısını ayarlamak suretiyle aktif güç akışını düzenleyen Faz kaydırıcı transformatörler geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Son yıllarda FKT uygulamalarında devre elemanlarından geçen akımı kontrol etmek için kullanılan TCPST (thyristor -controlled phase- shifting transformers) adı verilen FACTS cihazları geliştirilerek, yük kademe değiştiricilerde tristör tetiklemesi ile anahtarlama hareketlerinde kullanılabilmektedir.

4.1.1. Kademe Değiştirici Transformatörler

KDT'ler önemli bir gerilim düzenleyici araçlardır ve otomatik olarak dönüştürme oranları vasıtasıyla yük barasındaki gerilimi istenilen değerlerde tutmaya yararlar [49]. KDT'ler orta süreli gerilim kararsızlığı probleminde önemli bir etkiye sahiptir. [48,95,96] numaralı referanslarda statik analiz kullanılarak KDT'lerin maksimum güç transferini artırmada ve gerilim kararlılığını iyileştirmede etkileri olduğu gösterilmiştir.

Sabit bir kaçak reaktansa (X_t) sahip transformatörün rezistansının ve magnetik reaktansının ihmal edilmiş olduğunu farzedelim. (Şekil 4.1)'de kademe değiştiricinin tek hat eşdeğer diyagramı çizilmiştir.

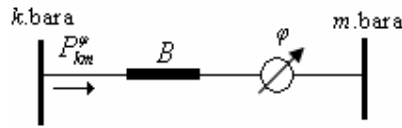


Şekil 4.1 Bir kademe değiştiricinin eşdeğer devresi

İlerleyen bölümde KDT'nin güç akışı çalışmalarında elverişli olan bir modeli çıkartılarak 5 baralı bir test sisteminde uygulaması yapılacaktır.

4.1.2. Faz Kaydırıcı Transformatörler

Bu cihazın temel fonksiyonu, faz açısını değiştirerek bir iletim hattı üzerindeki güç akışını kontrol etmektir. Bu faz kaydırma işlemi, hattın faz gerilimine bir değiştirilebilir gerilim bileşeni ilave edilerek veya çıkarılarak yapılır. Faz kaydırıcı transformatörün elektriksel eşdeğeri Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Burada φ faz kaydırıcı transformatörün açısı, B ise seri transformatörün suseptansıdır.



Şekil 4.2 Faz kaydırıcı transformatörün elektriksel eşdeğer devresi

İlerleyen bölümde faz kaydırıcı transformatör için bir güç akışı modeli açıklanmıştır.

4.2. Reaktif Güç Kontrolü

Üretim merkezlerinin tüketim merkezleri yakınında kurulmasından dolayı reaktif güç kompanzasyon yöntemi sistem gerilim kontrol etmek ve iletim kapasitesini arttırmak için tasarlanırlar. Bu yöntemler, şebeke geriliminin ve aktif yük akımının reaktif güç değerlerine karşı duyarlı olmasından dolayı etkilidir.

Bilindiği üzere, elektrik enerji iletim sistemlerinde enerji iletiminin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi için seri ve şönt kompanzasyon uygulanır. İletim şebekelerinde şönt ve seri elemanlar olarak seri kapasitör veya şönt kompanzatorler bir nevi amaçlar için kullanılırlar. Genellikle gerilimi nominal değere yakın tutmak, hat akımını azaltarak şebeke kayıplarını azaltmak ve böylece kararlılığa katkıda bulunmak bu amaçlardan bazılarıdır. Çoğu kompanzasyon, kapasitörler tarafından sağlanır ve indüktif yükü dengeler. Bir nevi reaktif gücü absorbe eder.

Reaktif güç sağlamanın oldukça ekonomik şekli yük yakınına yerleştirilen şönt kompanzatörlerdir. Şönt kompanzatörler, bağlı buldukları baraya reaktif güç verirler. Bu uygulama gerilim kontrolü için mükemmel bir yol olmasına rağmen kompanzasyonlu baraya bağlı tüm baralar etkileneceğinden sistemden akan yük için yeterli kontrolü sağlamaz. Kısacası bir kontrol şekli değildir. Bunun yanında seri kapasiteler, iletim sistemi davranışının kontrolüne olanak verir. Seri kapasiteler, iletim uygulamalarının esas sorunu olan, iletim hattının toplam reaktansının değerini düşürürler. Bu da sistem kararlılığını geliştirir ve iletim hattı boyunca gerilim düşümünün kontrolüne yardım eder.

Reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan seri ve şönt kompanzasyonun iletim kapasitesini artırmakta ve gerekli gerilim kontrolünü sağlamada ne şekilde kullanılabileceği bu bölümde incelenmektedir [99].

4.2.1 Şönt elemanlar

Genellikle uzak mesafelere reaktif güç taşınmadığı için tüketim bölgelerine yakın yerlerde kompanzasyon yapılmalıdır. Bunu başarmanın en basit ve en ucuz yolu bir şönt kompanzasyon sayesinde sağlanabilir. Burada bir kapasitör ve/veya bir indüktör ya direkt olarak baraya ya da bir transformatörün tersier sargısına bağlanabilir [23]. Şönt kapasitör bankları hatlara bağlanmaktan ziyade sürekli baralarda bulunurlar. İletim sistemlerinde şönt kompanzasyon yapımının birinci amacı yakın yük bölgelerinde gerilimin kontrolü ve yükün kararlılığının sağlanması içindir [2].

Şönt elemanlar iletim hattı boyunca gerilim düşümünü ve kayıpları minimize etmek içinde kullanılır. Genellikle statik şönt elemanlar ya manuel ya da röleler vasıtasıyla otomatik olarak devreye alınır veya çıkartılır. Mekanik anahtarlamalı şönt kapasitör bankları büyük yük bölgelerindeki istasyonlarda tesis edilir. Tristörlerin kullanılmasıyla modern çözümler geliştirilmiştir.

4.2.2 Seri elemanlar

Seri kompanzasyon tam olarak, uzak mesafelere taşınan gücün iletilmesini sağlayan iletim hattının empedansını azaltmak için yapılır. Gerilimin azalmasını sınırlamak, aktif ve reaktif güç kayıplarını azaltmak amacıyla gerilim kararlılığını geliştirmek yönünde eğilimlere sahiptir. Seri kapasitörler kullanılarak yapılan kompanzasyonla uzun iletim hatlarının birleştirilmesi ve geçici hal kararlılığının iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Ancak, günümüzde kısa hatlarda da kullanılmakta ayrıca gerilim kararlılığını iyileştirmektedir [3]. Mekanik anahtarlamalı şönt ve seri elemanlar güç sistemlerinde meydana gelen değişimlere hızlı ve etkili bir biçimde cevap verememektedirler. Yük barasına yeterli reaktif gücün verilemeyeşi gerilim çökmesinin birincil nedeni olduğundan hızlı ve tam olarak yapılacak bir reaktif güç kompanzasyonu sistemi gerilim çökmesi olayından uzaklaştıracaktır [101]. Son yıllarda iletim hatlarının kompanzasyonu güç elektroniği endüstrisinde meydana gelen değişimler neticesinde oldukça ileri boyutları varmıştır. Bunun neticesinde FACTS adı verilen cihazlar geliştirilmiş ve halende bu konuda yoğun bir çalışmalar mevcuttur.

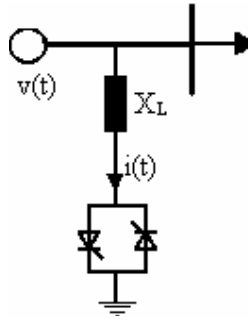
4.3. Facts Teknolojisi

Güç transferlerinin artması ile, güç sistemi ağır şartlar altında daha yüksek kayıplar vererek çalışmaya başlamıştır. Bununla birlikte düzenli olmayan yük akışı ile güvenilir olmaktan uzaklaşmaktadır. Bu bağlamda FACTS olarak isimlendirilen yeni bir teknoloji güç sistemlerinde yerini almaya başlamıştır. FACTS teknolojisinin ana hedefi sistemi kontrol altında tutarak güç transferinin düzenlenmesini ve ayrıca taşıma kapasitesinin belirli sınırlar dahilinde artırılmasını sağlamaktır. Günümüzün güç sistemleri büyük ve mekanik kontrollüdür. FACTS teknolojisi yüksek güç elektroniğine dayalı çeşitli tristör cihazlarından oluşmuş mikroelektronik, haberleşme ve ileri kontrol uygulamaları içeren bir teknolojidir. FACTS cihazları ile seçilen baradaki gerilimin büyüklüğü ve faz açısı kontrol edilebilir. Güç akışı, kontrol merkezi tarafından devamlı bir şekilde takip edilmektedir. Bilinen FACTS cihazları aşağıdadır [77].

- Static Var Compensators (SVC)
- Static compensators (STATCOM)
- Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC)
- Universal Power Flow Controllers (UPFC)
- High Voltage Direct Current Transmission (HVDC)

4.3.1. TCR

Şekil 4.3'de bir fazlı TCR yapısı görülmektedir. TCR alternatif akım kıyıcı ile buna seri bağlı bir bobinden oluşur.



Şekil 4.3 Basit bir TCR modeli

4.3.1.1 TCR modeli

Bir önceki bölümde verilen TCR yapısındaki her bir tristör yönlerine bağlı olarak alternansın birinde ilettime geçebilir. Tetikleme açısı α , her bir tristörün iletimde kalma süresi (açı miktarı) σ ile gösterilir ve tetikleme açısının başlangıcı gerilimin sıfırdan geçtiği nokta olarak alınır. Bir tristörün maksimum süre iletimde kalabilmesi için $\alpha=90^0$ seçilmelidir. Tetikleme açısı arttırıldıkça $i(t)$ akımında kesintiler oluşur. Eğer α değeri 0^0 ile 180^0 arasında seçilirse $i(t)$ asimetrik olacaktır. Bir tristörün doğru akım bileşeni de barındıracaktır. Bir tristörün akım iletme süresi (açısı) $\sigma=2(\pi-\alpha)$ olarak alınır, $i(t)$ iki farklı aralıkta farklı değerler alacaktır.

$$i(t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2V}}{X_L} (\cos \alpha - \cos wt) & \text{şayet} & \alpha < wt < \alpha + \sigma \\ 0 & \text{şayet} & \alpha + \sigma < wt < \alpha + \pi \end{cases} \quad (4.1)$$

$i(t)$ akımının Fourier analizi yapılır ise ana harmonik akımı etkin değeri;

$$I_1 = \frac{V}{X_L} \frac{\sigma - \sin \alpha}{\pi} \quad (4.2)$$

olarak bulunur. (4.2) ifadesinde V ; SVC bara gerilim etkin değeri, X_L ise bobinin ana frekanstaki reaktansıdır. Bu durumda görüldüğü gibi σ açısının azalması (dolayısı ile α açısının artması) durumunda ana harmonik akımı etkin değeri azalmaktadır. Bu durum tetikleme açısının artması olarak ta yorumlanabilir. Daha öncede belirtildiği gibi TCR suseptans değerini ayarlayan bir cihazdır [26]. (4.2) eşitliğinden etkin suseptans değeri (tetikleme açısının fonksiyonu olarak);

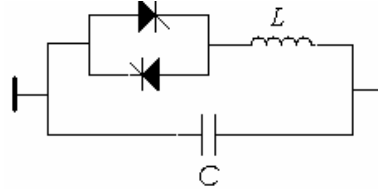
$$B(\alpha) = \frac{I_1}{V} = \frac{\sigma - \sin \alpha}{\pi - X_L} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad (4.3)$$

elde edilir. Bu suseptans tarafından üretilen reaktif güç değeri ise $Q(\alpha) = B(\alpha)V^2$ olur.

4.3.2. SVC

Bu şönt cihazların en popüler konfigürasyonu sabit bir kapasitör ile bir tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) ve tristör anahtarlamalı kapasitör ile tristör kontrollü reaktör (TSC-TCR)'dür. Tristörler simetrik bir şekilde ateşlenirler, α açısı 90^0 - 180^0 arasında kontrol edilerek kapasitör gerilimi ayarlanır. SVC genellikle iletim hattına kademe düşürücü transformatör üzerinden bağlanır [26].

Şekil 4.4 'de basit bir SVC'nin elektriksel eşdeğer devresi gösterilmektedir. Burada L ve C sırasıyla SVC'nin sahip olduğu endüktans ve kapasitans değerini göstermektedir.



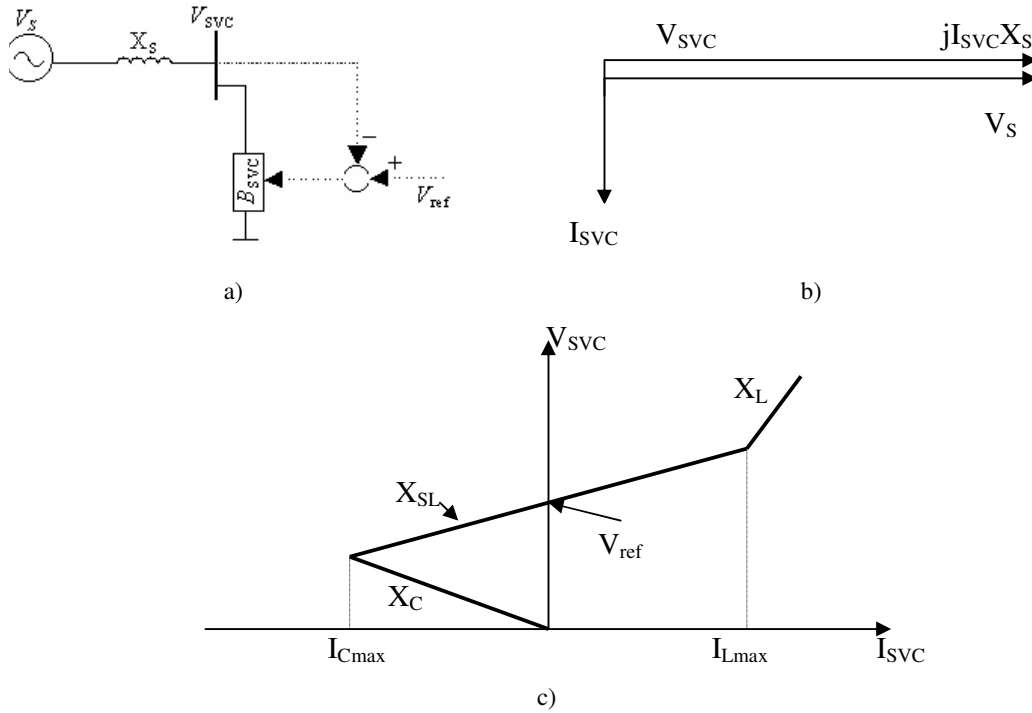
Şekil 4.4. Basit bir SVC modeli

4.3.2.1. SVC ile gerilim kontrolü

Şekil 4.5'a'da SVC bağlı örnek bir güç sistemi gösterilmiştir. SVC terminalinden görülen eşdeğer empedans X_S aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$X_S = \frac{V_b^2}{S_c} \cdot S_b \quad (4.4)$$

burada S_c SVC barasındaki üç faz kısa devre gücü, V_b Faz-faz arası baz gerilimi, S_b sistemin baz gücünü gösterir.



Şekil 4.5. SVC ile kontrol edilen güç sisteminin basit bir şeması b) endüktif SVC akımı için AC sistemin fazör diyagramı c) SVC'nin sürekli hal V-I karakteristiği

Eğer I_{SVC} SVC'nin reaktif akımı ise SVC bara gerilimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_S = V_{SVC} + X_S I_{SVC} \quad (4.5)$$

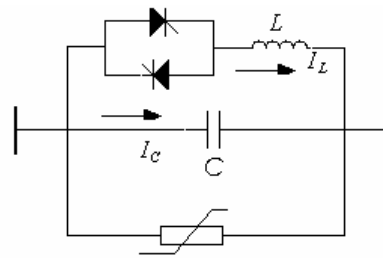
Bu eşitliğin anlamı zayıf AC sistemlerde (yüksek X_S) gerilim kontrolünde daha etkilidir. Lineer olarak gerilim kontrol davranışı aşağıdaki gibi ifade edilebilir [106].

$$V_{SVC} = V_{ref} + X_{SL} I_{SVC} \quad (4.6)$$

4.3.3. TCSC

TCSC Şekil 4.6'da gösterildiği gibi bir kapasitör bankıyla buna paralel bir tristör kontrollü endüktif koldan ibarettir. Kapasitör bankının karşısında Bir Metal-Oksit Varistör(MOV) mevcuttur. Şekilden de görüldüğü gibi sürekli hal perspektifi SVC cihazının yapısına eşdeğerdir. SVC cihazlarından ana farklılığı iletim hatlarına seri bağlı olmasıdır. Diğer farklılığı ise hatta direkt bağlı olmasıdır. TCSC'nin eşdeğer empedansı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$X_e = \frac{X_C X_L}{X_C / \pi[2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] - X_L} \quad (4.7)$$



Şekil 4.6. Basit bir TCSC modeli

burada $r_x = X_C / X_L$ 'dir. Bir ateşleme açısı değeri sistemi sürekli halde rezonansa sokabilir. Bu değer $r_x = X_C / X_L$ oranından bulunur. Böylece bu durumda ateşleme açısı için sürekli hal limitleri $\alpha_r < \alpha < 180^\circ$ olarak belirlenir. Böylece cihazın sürekli hal çalışması kapasitiftir [127].

4.4. Facts Cihazlarının Güç Akışı Denklemlerine Sokulması

AC güç sistemleri için güç akışı problemi diferansiyel cebirsel eşitliklerinin (DCE) denge noktalarının bulunmasıdır. Problem lineer olmayan cebrik eşitliklerin çözümü şekline formüle edilebilir .

$$f(x_{ac}) = 0 \quad (4.8)$$

AC güç sistemleri için Newton metodlarında kullanılan Jacobien matrisinin genel formu Şekil 4.7a'da verildiği gibi ise FACTS cihazlarının yukarıdaki gibi güç akışı denklemlerine katılması sonucu oluşacak olan Jacobienin genel yapısında Şekil 4.7b'de olduğu gibidir. Buna göre Jacobien matrisinin boyutları kullanılan FACTS cihazındaki durum değişkenlerin miktarına bağlı olarak artmaktadır[104]. Burada $r = [r_1, \dots, r_{n_f}]^T$ tüm facts elemanlarına ait değişkenler vektörü F ise facts cihazlarına ait eşitliklerin vektörüdür.

a) b)

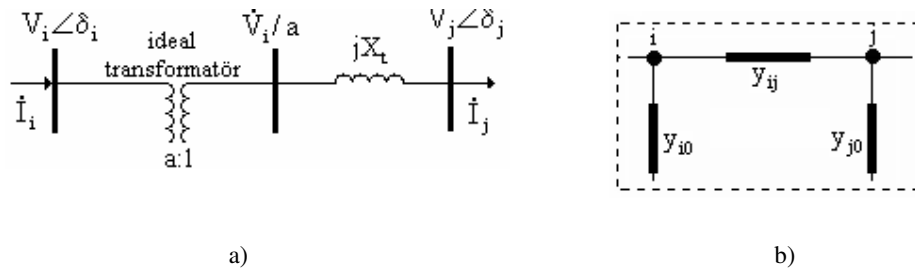
Şekil 4.7. Güç akışı jacobian matrisinin a)Facts cihazları yok iken b) Facts cihazları var iken genel formu

4.5. KDT ve FKT'nin Güç Akışı Modelleri

Kademe değiştirici ve faz kaydırıcı transformatörler güç akışı çalışmalarında düğüm gerilimlerinin büyüklüğünü ve aktif güç akışını düzenlemek için kullanılırlar. Bu bölümde bu iki cihazın elde edilmiş güç akışı modelleri verilmiştir.

4.5.1 KDT güç akışı modeli

Kademe değiştirici transformatörler Şekil 4.8a'da gösterildiği gibi i ve j.nci baralar arasına bağlı ideal bir transformatör ve sabit bir kaçak reaktansa (X_t) sahip bir devre elemanı olarak gösterilirler. Güç akışı çalışması yapılırken iki kapılı bir devre olarak modellenip akım ve gerilim bağıntuları elde edilerek orijinal bara admitans matrisininin içerisine katılabilir.



Şekil 4.8. i ve j. baralar arasına bağlı KDT'nin a) elektriksel eşdeğer devresi b) π eşdeğer devresi

Buna göre Şekil 4.8a'da verilen sistem için Kirşoffun akımlar yasası uygulanarak giriş akımı ;

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{I}_j}{a} = \frac{\dot{V}_i - a\dot{V}_j}{a^2} \dot{Y}_{KDT} \quad (4.9)$$

bulunur. Burada $Y_{KDT} = \frac{1}{X_t}$ olup KDT'nin kaçak admitans eğeridir. Şekil 4.8b'de

verilen iki kapılı sistemin şönt admitans değerleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
y_{ij} &= \frac{Y_{KDT}}{a} \\
y_{i0} &= Y_{KDT} \left(\frac{1-a}{a^2} \right) \\
y_{j0} &= Y_{KDT} \left(1 - \frac{1}{a} \right)
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Bu tezde güç akışı çalışması yapılırken baralar arasına yerleştirilen KDT'nin admitans değeri bara admitans matrisine katılarak her iterasyon sonunda kademe değiştirme oranı değiştirilerek bara admitans matrisinin modifiye edilmesi suretiyle arzu edilen reaktif güç aktarımının sağlanması ve bu şekilde bara geriliminin istenen değerde tutulması hedeflenmiştir. Bu durumda i ve j. baralar arasına bağlanan KDT'li sistemin modifiye edilmiş bara admitans matrisi aşağıdaki gibi olur.

$$\dot{Y}_{\text{BARA}_{\text{mod}}} = \begin{bmatrix} y_{ii} + y_{i0} + y_{ij} & -y_{ij} \\ -y_{ij} & y_{jj} + y_{j0} + y_{ij} \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

burada y_{ii} ve y_{jj} i ve j. düğümlerinin kendi admitans değeridir. Kademe değiştirici transformatörler kademe ayarını değiştirilerek bara gerilimini istenilen değerde tutup reaktif güç akışını düzenlemek için kullanılan gerilim kontrol cihazlarıdır. Kademe ayarı oranı sistemin ilave durum değişkeni bara geriliminin değerde ilave kontrol değişkeni olarak Jacobian eşitliklerine katılırsa Jacobian matrisinin boyutları artarak aşağıdaki formda gösterilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta Q_{ij}^{\text{ayr}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} & \frac{\partial P}{\partial a} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} & \frac{\partial Q}{\partial a} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial |V|} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \\ \Delta a \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

burada Q_{ij}^{ayr} ve k. iterasyon sonunda a,

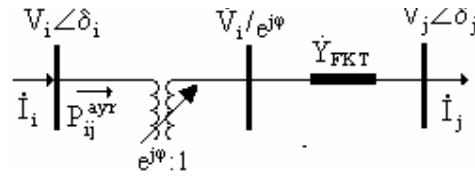
$$\Delta Q_{ij} = Q_{ij}^{ayr} - Q_{ij}^{hes} \quad (4.13)$$

$$a^{k+1} = a^k + \Delta a^k \quad (4.14)$$

bağıntıları yardımıyla bulunur

4.5.2 FKT güç akışı modeli

Faz kaydırıcı transformatör hat sonundaki gerilimin faz açısını ayarlamak ve değiştirmek için kullanılır. Bu model oluşturulurken kademe ayarlı kayıpsız bir transformatör modeli düşünülmüştür. Transformatörün primer ve sekonder taraflarının sırasıyla i ve j. baralara bağlandığını düşünelim. Kontrol değişkeni faz açısıdır. Newton algoritması kullanılarak ayarlanan aktif güç değerine ulaşılır. Faz kaydırıcı transformatörün elektriksel eşdeğeri Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Faz kaydırıcı transformatörün elektriksel eşdeğer devresi

Sürekli halde bir FKT, karmaşık sayı dönüştürme oranına sahip ideal bir transformatör ile $Y_{FKT} = \frac{1}{X_{FKT}}$ olan bir admittansın seri bağlantısından oluşur [16].

İdeal transformatörün dönüştürme oranı $e^{j\varphi} = \cos\varphi + j\sin\varphi$ olsun. Buna göre Şekil 4.9'da verilen sistem için Kirşoff akımlar yasası uygulanarak giriş akımı ;

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{I}_j}{(\cos\varphi + j\sin\varphi)^*} = [\dot{V}_i - (\cos\varphi + j\sin\varphi)\dot{V}_j] \dot{Y}_{FKT} \quad (4.15)$$

benzer şekilde çıkış akımı da

$$\dot{I}_j = (\cos\varphi + j\sin\varphi)^* \dot{I}_i = [(\cos\varphi - j\sin\varphi)\dot{V}_i - \dot{V}_j] \dot{Y}_{FKT} \quad (4.16)$$

şeklinde elde edilir. Burada φ faz kaydırıcı transformatörün açısıdır. Şekil 4.9'da verilen devrenin transfer admitans matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{\text{FKT}} & -\dot{Y}_{\text{FKT}}(\cos\varphi + j\sin\varphi) \\ -\dot{Y}_{\text{FKT}}(\cos\varphi - j\sin\varphi) & \dot{Y}_{\text{FKT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_i \\ \dot{V}_j \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

$\dot{Y}_{\text{FKT}} = G_{\text{FKT}} + jB_{\text{FKT}}$ olarak alınırsa faz kaydırıcının aktif güç transferi aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır.

$$P_{ij}^{\text{ayr}} = |V_i| |V_j| B_{\text{FKT}} \sin(\delta_i - \delta_j - \varphi) \quad (4.18)$$

Eğer faz kaydırıcı transformatör belirli bir değerde aktif güç akışını kontrol etmek için kullanılırsa Jacobian matrisinin boyutları artarak aşağıdaki formda gösterilir. Bu durumda φ ilave bir durum değişkeni olarak Jacobian eşitliklerine katılır.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_{ij}^{\text{ayr}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} & \frac{\partial P}{\partial a} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} & \frac{\partial Q}{\partial a} \\ \frac{\partial P_{ij}^{\text{ayr}}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}^{\text{ayr}}}{\partial |V|} & \frac{\partial P_{ij}^{\text{ayr}}}{\partial a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \\ \Delta \varphi \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

burada P_{ij}^{ayr} ve k. iterasyon sonunda φ ,

$$\Delta P_{ij} = P_{ij}^{\text{ayr}} - P_{ij}^{\text{hes}} \quad (4.20)$$

$$\varphi^{k+1} = \varphi^k + \Delta \varphi^k \quad (4.21)$$

bağıntıları yardımıyla bulunur [37,38].

4.6. Facts Cihazlarının Güç Akışında Modellenmesi

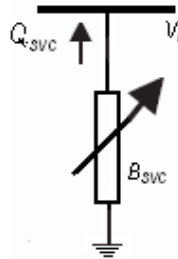
Güç sistemlerinde FACTS cihazlarının etkilerini incelemek için, bu cihazların matematiksel modellerinin elde edilmesi gereklidir. Bu bölümde FACTS cihazları içerisinde önemli bir yer tutan SVC ve TCSC'nin, sürekli durumda güç akışı ve gerilimler üzerinde etkileri inceleneceğinden öncelikle statik modelleri verilmiştir.

4.6.1. SVC güç akışı modeli

Burada amaç güç akış denklemlerine SVC denklemlerinin etkisinin incelenmesidir. SVC'ye ait durum değişkenleri matrisi $r_{SVC}=[Q_{SVC} \ B_{SVC} \ \alpha]^T$ olarak tayin edilir. Burada α tristörün tetikleme açısını göstermektedir. $F_{SVC}(r_{SVC}) = 0$ eşitliği ile kontrolörün jacobian matris formu oluşturulur. Bu kısımda çalışmada kullanılan ateşleme açısı modeli anlatılarak uygulaması verilmiştir.

4.6.1.1. Ateşleme açısı modeli

Alternatif bir SVC modeli olan bu modelde tristör kontrollü reaktörün ateşleme açısı α durum değişkeni olarak alınıp güç akışı denklemlerine katılır ve iteratif çözüm yapılır. Şekil 4.10'da k. baraya bağlı bir SVC'nin tek hat şeması gösterilmiştir. Burada V_k SVC bağlı baranın gerilimi Q_{SVC} ise SVC tarafından baraya aktarılan reaktif güç değeridir.



Şekil 4.10. k. baraya bağlı SVC'nin gösterimi

SVC'nin pozitif eşdeğer suseptans değeri aşağıdaki gibidir.

$$B_{SVC} = B_C - B_{TCR} = \frac{1}{X_C X_L} \left\{ X_L - \frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] \right\}, \quad (4.22)$$

$$X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$Q_{SVC} = Q_k = -V_k^2 B_{SVC} \quad (4.23)$$

(4.23) numaralı denklemde B_{SVC} değeri yerine konursa

$$Q_k = \frac{-V_k^2}{X_C X_L} \left\{ X_L - \frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha_{SVC}) + \sin 2\alpha_{SVC}] \right\}, \quad (4.24)$$

(4.24) eşitliği lineerleştirilerek k. baraya bağlı bir SVC için ek Jacobien matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{2V_k^2}{\pi X_L} [\cos(2\alpha_{SVC}) - 1] \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \delta_k \\ \Delta \alpha_{SVC} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (4.25)$$

(i). iterasyon sonunda ateşleme açısı 4.13 denkleminde göre güncellenir [37].

$$\alpha_{SVC}^{(i)} = \alpha_{SVC}^{(i-1)} + \Delta \alpha_{SVC}^{(i)} \quad (4.26)$$

4.6.2. TCSC güç akışı modeli

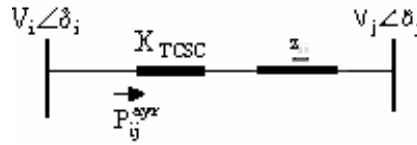
TCSC iletim hattına direkt bağlı bir reaktans olarak modellenenir. İletim hattının reaktansını endüktif veya kapasitif bir biçimde kompanze eder. Anma değeri yerleştirildiği iletim hattının reaktansının bir fonksiyonudur. TCSC'ye ait durum değişkenleri matrisi $r_{SVC} = [P \ Q_i \ Q_j \ X_{TCSC} \ \alpha]^T$ olarak tayin edilir. Burada α tristörün tetikleme açısı, X_{TCSC} TCSC'nin kontrol edilebilen eşdeğer reaktansını gösterir.

$F_{TCSC}(r_{TCSC}) = 0$ eşitliği ile kontrolörün jacobian matris formu oluşturulur. Bu kısımda çalışmada kullanılan eşdeğer reaktans modeli anlatılarak uygulaması verilmiştir.

4.6.2.1. Ayarlanabilen seri reaktans modeli

TCSC'nin eşdeğer devresi Şekil 4.11'de verilmiştir. Buna göre eğer hatta bir TCSC kompanzesi yapılmış ise i. baradan j. baraya aktarılan aktif güç ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$P_{ij}^{ayr} = \frac{|V_i||V_j|}{|X_{TCSC}|} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (4.27)$$



Şekil 4.11. i ve j. Baralar arasında bağlı TCSC'nin gösterimi

Aktif güç transferini ayarlayan kontrolörün sonuç olarak transfer ettiği güç ayarlanmış haliyle P_{ij}^{ayr} olur. Kapasitif çalışma için eşitliğin işareti ters çevrilir. Bu tezde güç akışı çalışması yapılırken baralar arasında yerleştirilen TCSC'nin admitans değeri bara admitans matrisine katılarak her iterasyon sonunda bara admitans matrisinin modifiye edilmesi suretiyle arzu edilen güç aktarımının sağlanması elde edilmiş olur. Sistemin modifiye edilmiş bara admitans matrisi aşağıdaki gibi olur.

$$\dot{Y}_{BARA_{mod}} = \begin{bmatrix} y_{ii} + \frac{1}{z_{ij} - j\Delta X_{TCSC}} & -\frac{1}{z_{ij} - j\Delta X_{TCSC}} \\ -\frac{1}{z_{ij} - j\Delta X_{TCSC}} & y_{jj} + \frac{1}{z_{ij} - j\Delta X_{TCSC}} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

burada y_{ii} ve y_{jj} i ve j. düğümlerinin kendi admitans değeridir. Bu durumda TCSC kontrolörü jacobian matrisine ilave edilecek güç akışı denklemleri aşağıdaki gibi

yazılabilir. TCSC'nin bağlı olduğu diğer baraya transfer edilen güç mutlak değerce eşit fakat refereransa göre ters işaretlidir. Hat kayıpları genellikle ihmal edilir [38].

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_{ij}^{ayr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} & \frac{\partial P}{\partial |X_{TCSC}|} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} & \frac{\partial Q}{\partial |X_{TCSC}|} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial |V|} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial |X_{TCSC}|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \\ \Delta |X_{TCSC}| \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Burada P_{ij}^{ayr} ve k. iterasyon sonunda X_{TCSC} ,

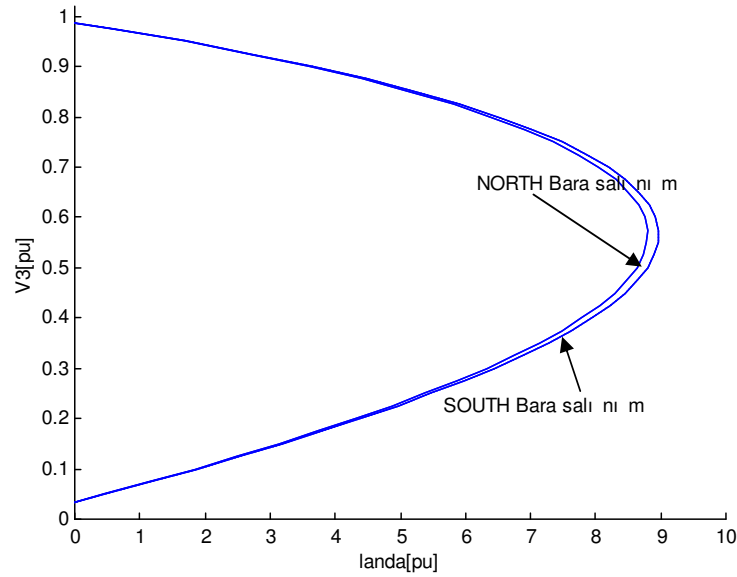
$$\Delta P_{ij} = P_{ij}^{ayr} - P_{ij}^{hes} \quad (4.30)$$

$$|X_{TCSC}|^{k+1} = |X_{TCSC}|^k + \Delta |X_{TCSC}|^k \quad (4.31)$$

bağıntıları yardımıyla bulunur.

4.7. Beş Baralı Test Sisteminde Sayısal Uygulama

Şekil C.1'de verilen 5 baralı 2 makinalı sistem test edilmiştir. North barası salınım, South barası PV barası seçilerek (Temel durum) generatorlerin kontrol büyüklükleri sırasıyla 1.06 p.u. ve 1.0 p.u. değerine ayarlanarak güç akışı yapılmıştır. Ardından South barası salınım barası olarak seçilerek güç akışı yapılmış ve Şekil 4.12'de görülen P-V eğrileri çizdirilmiştir. Bu şekle bakılarak farklı salınım barası seçiminde kritik noktalarda güç ve gerilim değerlerinin bir miktar değiştiği gözlenebilir. Çalışmanın ikinci aşamasında Lake barasındaki gerilim değerini yükseltmek, Lake ve Main baraları arasında aktif güç akışını düzenlemek amacıyla sırasıyla SVC, TCSC, KDT ve FKT uygulamaları yapılmıştır. Aynı işlemler salınım barasının değiştirilmesi suretiyle yeniden tekrarlanmış P-V eğrileri çizdirilerek sonuçlar karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



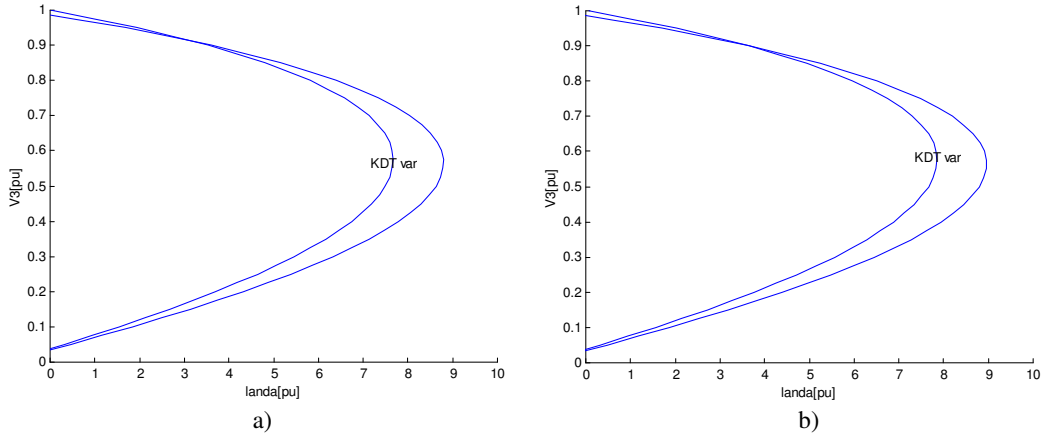
Şekil 4.12 Farklı salınım barası seçilmesi durumlarında Lake barasına ait P-V eğrileri ($\lambda_{\text{NorthSNB}} = 8.7884, \lambda_{\text{SouthSNB}} = 8.9578$)

4.7.1 KDT uygulaması

Lake ve Main baraları arasındaki iletim hattına aktif güç akışını kontrol etmek amacıyla bir Kademe değiştirici transformatör yerleştirilmiştir. Burada amaç Lake barası gerilimini 1.0 pu yapmak ayrıca Main barasına doğru reaktif güç akışını düzenlemektir. Sürekli güç akışı tekniği uygulanarak geliştirilen güç akışı programı sonucunda güç sistemine ait analiz sonuçları elde edilmiştir. Lake barasına ait KDT'li ve KDT'siz durumlar için P-V eğrileri çizdirilmiş (Şekil 4.13a) ardından farklı salınım barası seçilerek aynı baraya ait eğriler her iki durum için çizdirilmiştir (Şekil 4.13b).Yük baralarına ait açı ve gerilim genlik değerleri farklı salınım barası seçilmesi durumları için Tablo 4.1'de verilmiştir

Tablo 4.1 KDT bağlanması durumunda bara gerilim ve açı değerleri

Sistem baraları		Lake		Main		Elm	
		KDT yok	KDT var	KDT yok	KDT var	KDT yok	KDT var
North barası salınım	δ^0	-4.63	-4.4051	-4.95	-5.3933	-5.76	-5.9975
	V	0.9872	1.0005	0.9841	0.9686	0.9717	0.9663
South barası salınım	δ^0	-3.6388	-3.5172	-3.7458	-3.8549	-3.9849	-4.0376
	V	0.9875	1.0016	0.9842	0.9676	0.9658	0.9718



Şekil 4.13 KDT uygulaması durumunda Lake barasına ait P-V eğrileri a) North barası salinim barası ($\lambda_{SNB}^{KDT} = 7.6735$) b)South barası salinim barası ($\lambda_{SNB}^{KDT} = 7.8511$)

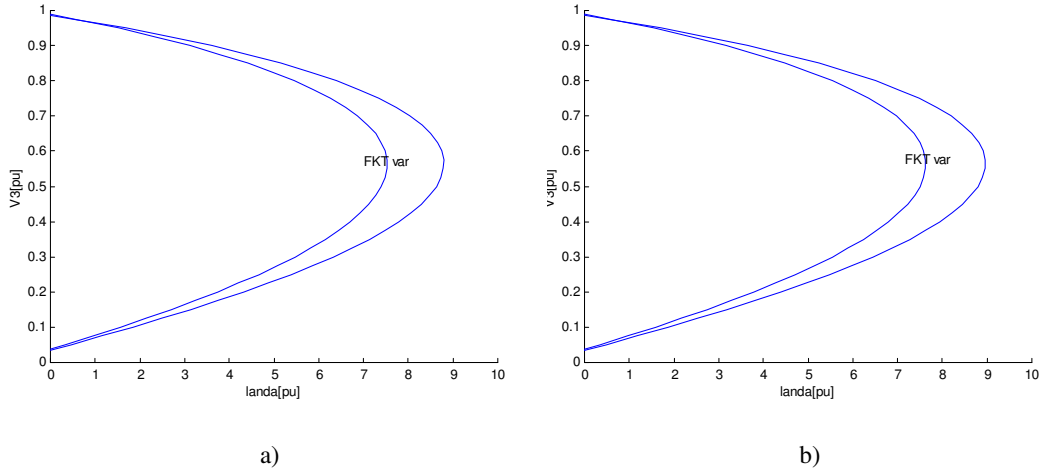
Temel durum için kaçak reaktansı $X_f = 0.1$ pu olan KDT'nin başlangıçta dönüştürme oranı 1.0 olarak alınmıştır. Lake ve Main barası arasında tesis edilen TCSC $a = 1.04$ dönüştürme oranı değerinde Lake barası gerilimini 1.0 pu değerine getirmiştir. Bu durumda Main barasına doğru 10 MWAR'lık bir rektif güç akışı söz konusudur. Şekil 4-13a ve b karşılaştırıldığında farklı salinim barası seçilmesi durumunda kritik güç değerlerinde bir miktar değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre North barasının salinim barası olması durumunda $P_{max} = 390.3$ MWAR South barasının salinim barası olması durumunda $P_{max} = 398.2995$ MWAR olarak bulunmuştur

4.7.2. FKT uygulaması

Lake ve Main baraları arasındaki iletim hattına aktif güç akışını kontrol etmek amacıyla bir Faz kaydırıcı transformatör yerleştirilmiştir. Main barasına doğru 40 MW'lık bir güç akışı sağlanması amaçlanmaktadır. Sürekli güç akışı tekniği uygulanarak geliştirilen güç akışı programı sonucunda güç sistemine ait analiz sonuçları elde edilmiştir. Lake barasına ait FKT'li ve FKT'siz durumlar için P-V eğrileri çizdirilmiş (Şekil 4-14a) ardından farklı salinim barası seçilerek aynı baraya ait eğriler her iki durum için çizdirilmiştir (Şekil 4-14b).Yük baralarına ait açı ve gerilim genlik değerleri farklı salinim barası seçilmesi durumları için Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2 FKT bağlanması durumunda bara gerilim ve açı değerleri

Sistem baraları		Lake		Main		Elm	
		FKT yok	FKT var	FKT yok	FKT var	FKT yok	FKT var
North barası salınım	δ^0	-4.63	-5.845	-4.95	-3.0745	-5.76	-4.9348
	V	0.9872	0.9904	0.9841	0.9869	0.9717	0.9729
South barası salınım	δ^0	-3.6388	-5.3533	-3.7458	-1.9444	-3.9849	-3.3867
	V	0.9875	0.9908	0.9842	0.9859	0.9658	0.9725



Şekil 4.14 FKT uygulaması durumunda Lake barasına ait P-V eğrileri a) North barası salınım barası ($\lambda_{SNB}^{FKT} = 7.5194$) b) South barası salınım barası ($\lambda_{SNB}^{FKT} = 7.6253$)

Başlangıçta FKT reaktansı 0.1 pu ve faz açısı 0^0 olarak alınmıştır. Belirlenen güç miktarını elde etmek için FKT'nin faz açısı -5.83^0 olarak bulunmuştur. Şekil 4-14a ve b karşılaştırıldığında farklı salınım barası seçilmesi durumunda kritik güç değerlerinde bir miktar değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre North barasının salınım barası olması durumunda P_{max} 383.373 MVAR South barasının salınım barası olması durumunda P_{max} 388.1385 MVAR olarak bulunmuştur

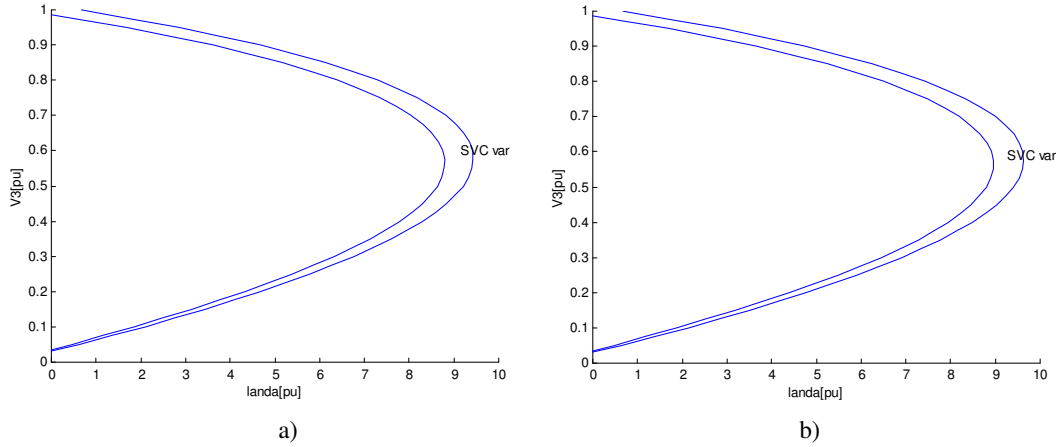
4.7.3. SVC uygulaması

Çalışmanın bu aşamasında Lake barasına reaktif güç desteği sağlamak ve bara gerilimini 1.0 pu değerine getirmek amacıyla 20.47 MVAR'lık bir SVC tesis edilmiştir. Sürekli güç akışı tekniği uygulanarak geliştirilen güç akışı programı

sonucunda güç sistemine ait analiz sonuçları elde edilmiştir . Kullanılan güç akışı programında SVC'ye ait ateşleme açısı modeli kullanılmıştır. Lake barasına ait SVC'li ve SVC'siz durumlar için P-V eğrileri çizdirilmiş (Şekil 4.15a) ardından farklı salınım barası seçilerek aynı baraya ait eğriler her iki durum için çizdirilmiştir (Şekil 4-15b). Yük baralarına ait açı ve gerilim genlik değerleri farklı salınım barası seçilmesi durumları için Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3 SVC bağlanması durumunda bara gerilim ve açı değerleri

Sistem baraları		Lake		Main		Elm	
		SVC yok	SVC var	SVC yok	SVC var	SVC yok	SVC var
North barası salınım	δ^0	-4.63	-4.837	-4.95	-5.107	-5.76	-5.797
	V	0.9872	1.0000	0.9841	0.9944	0.9717	0.9752
South barası salınım	δ^0	-3.63	-3.845	-3.74	-3.9038	-3.98	-4.0273
	V	0.9875	1.0002	0.9842	0.9944	0.9715	0.9750



Şekil 4.15 SVC uygulaması durumunda Lake barasına ait P-V eğrileri a) North barası salınım barası ($\lambda_{SNB}^{SVC} = 9.4328$) b)South barası salınım barası ($\lambda_{SNB}^{SVC} = 9.6358$)

Lake barasına tesis edilen SVC'nin endüktif ve kapasitif reaktans değerleri sırasıyla 0.288 pu ve 1.07 pu değerindedir. Güç akışı sonunda ateşleme açısı değeri ($\alpha_{SVC} = 124^0$) olarak bulunmuştur. . Lake barasına tesis edilen SVC bara gerilimini 1.0 pu değerine getirmiştir. Şekil 4-15a ve b karşılaştırıldığında farklı salınım barası seçilmesi durumunda kritik güç değerlerinde bir miktar değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre North barasının salınım barası olması durumunda

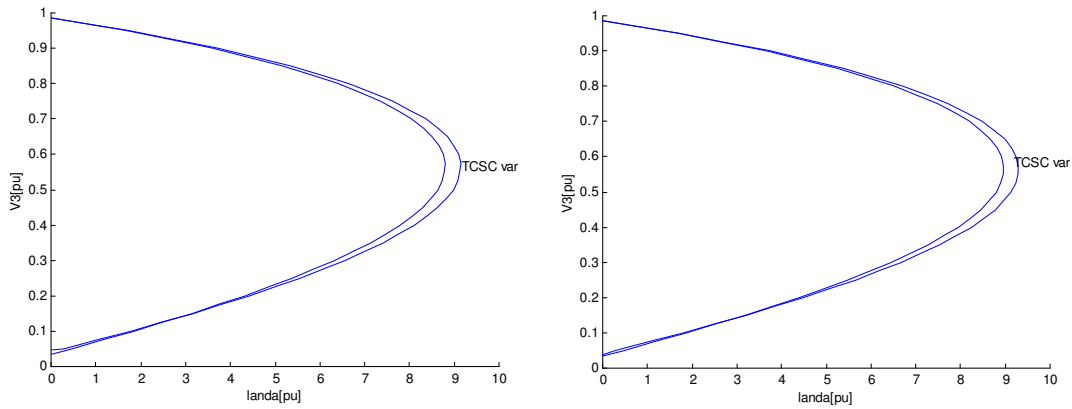
maksimum güç (P_{max}) (3.4)denklemine göre 469.476 MVAR South barasının salınım barası olması durumunda P_{max} 478.611 MVAR olarak bulunmuştur.

4.7.4. TCSC uygulaması

Lake ve Main baraları arasındaki iletim hattına aktif güç akışını kontrol etmek amacıyla bir TCSC yerleştirilmiştir. Main barasına doğru 21 MW'lık bir güç akışı sağlanması amaçlanmaktadır. TCSC'ye ait ayarlanabilen suseptans modeli kullanılarak Sürekli güç akışı tekniği ile güç sistemine ait analiz sonuçları elde edilmiştir. Lake barasına ait TCSC'li ve TCSC'siz durumlar için P-V eğrileri çizdirilmiş (Şekil 4.16a) ardından farklı salınım barası seçilerek aynı baraya ait eğriler her iki durum için çizdirilmiştir (Şekil 4-16b). Yük baralarına ait açı ve gerilim genlik değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4 TCSC bağlanması durumunda bara gerilim ve açı değerleri

Sistem Baraları		Lake		Main		Elm	
		TCSC yok	TCSC var	TCSC yok	TCSC var	TCSC yok	TCSC var
North barası salınım	δ^0	-4.63	-4.7246	-4.95	-4.8154	-5.76	-5.7024
	V	0.9872	0.9869	0.9841	0.9845	0.9717	0.918
South barası salınım	δ^0	-3.6388	-3.6897	-3.7458	-3.6919	-3.9849	-3.9662
	V	0.9875	0.9868	0.9842	0.9850	0.9715	0.9718

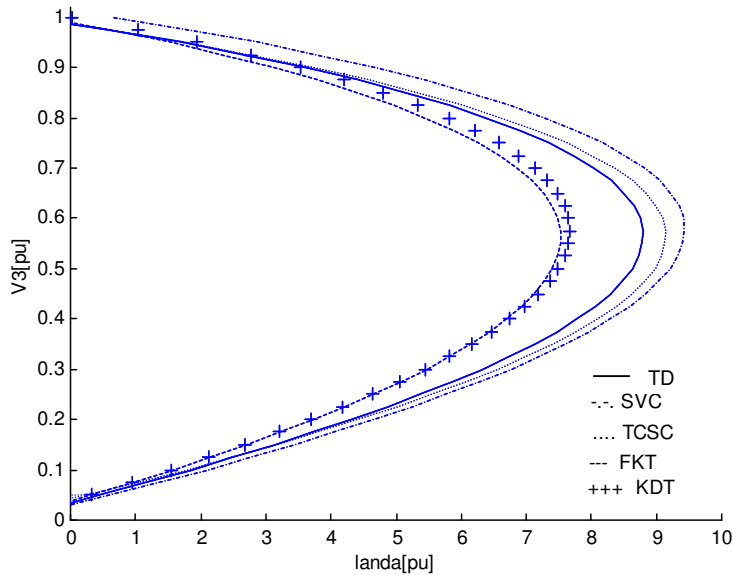


b)

Şekil 4.16 TCSC uygulaması durumunda Lake barasına ait P-V eğrileri a) North barası salınım barası ($\lambda_{SNB}^{TCSC} = 9.1398$) b)South barası salınım barası ($\lambda_{SNB}^{TCSC} = 9.2389$)

Başlangıçta TCSC endüktif reaktansı $X_L = 0.37$ pu ve kapasitif reaktansı $X_C = 1.07$ ve ateşleme açısı 140° olarak alınmıştır. Belirlenen güç miktarını elde etmek için TCSC'nin kapasitif çalışma modunda hattı %70 kompanze edecek şekilde $X_{TCSC} = 0.021$ pu olarak bulunmuştur. Şekil 4-16a ve b karşılaştırıldığında farklı salınım barası seçilmesi durumunda kritik güç değerlerinde bir miktar değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre North barasının salınım barası olması durumunda P_{max} 3.4 denklemine göre 456.291 MVAR South barasının salınım barası olması durumunda P_{max} 460.75 MVAR olarak bulunmuştur

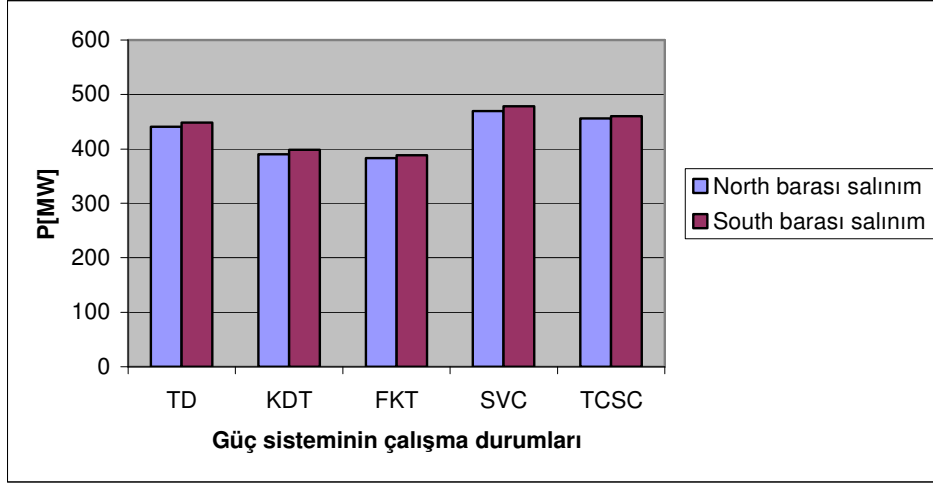
Bulunan sonuçlar değerlendirildiğinde gerilim kararlılığı açısından en iyi durumun SVC uygulamasında olduğu söylenebilir. Şekil 4.17'de North barasının salınım barası seçilmesi durumunda tüm uygulamaların sonuçlarını toplu halde görmek mümkündür. Burada Lake barasına ait P-V eğrileri çizdirilmiştir.



Şekil 4.17 Temel durum için Lake barasına ait P-V eğrileri (Düz çizgi temel durumu göstermektedir)

Şekil 4.18'de test sisteminin farklı salınım barası seçilmesi durumları için Lake barasına ait maksimum yüklenebilirlik değerlerini gösteren bir çizelge verilmiştir. Bu çizelgede en iyi çalışma durumunun SVC uygulamasında olduğu söylenebilir. Orta süreli gerilim kararlığında iyileştirici etkileri bulunan KDT ve benzer olarak FKT

uygulamalarında temel duruma göre daha az güç transferinin olduğu görülebilir. Bunun temel sebebi KDT ve FKT'nin sahip olduğu ve güç akışı analizi boyunca 0.1 pu değerinde sabit olarak kabul edilen kaçak reaktanslarıdır.



Şekil 4.18 Farklı salınım barası seçilmesi durumları için Lake barasına ait maksimum güç değerleri

BÖLÜM 5. ÇATALLAŞMA ANALİZİ İLE GERİLİM KARARLILIĞI İYİLEŞTİRİCİLERİN DİNAMİK ANALİZLERİ

Son zamanlarda çoğu büyük elektrik güç sistemlerinin devre dışı kalması sistemin hatalara vermiş olduğu dinamik cevap tarafından sebep olmaktadır. Böylece güç sistemlerinin dinamik değerlendirilmesi hızla önem kazanmaktadır.

Bir güç sisteminin dinamik davranışı bir parametre değişimiyle değiştirildiği zaman güç sistemlerinde çatallaşmalar doğmaktadır [70]. Güç sistemlerinde parametre değişimine bağlı olarak oldukça kompleks dinamikler gözlenebilmektedir. Bunlardan en yaygın olanı yük artışının bir sonucu olarak denge noktalarının çatallaşmasıdır.

Gerilim çökmesi analizlerinde , hesaplama metodları kullanılarak güç sistemlerinin çatallaşma noktalarına ulaşılır. Geçmiş yıllarda güç sistemlerinin kararlılığı ve özellikle gerilim kararlılığı ile ilgili olarak bazı şirketler ciddi şikayetleri içeren raporlar sunmuş ve sistemlerinde bu konuda meydana gelen bazı olayları dile getirmişlerdir [72].

Çatallaşma teorisi güç sistemlerindeki açısız kararlılık ve gerilim kararlılığı gibi değişik sorunların analizinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir [63]. Sistemdeki anlık değişiklikler, sistemi kararlı normal durumundan artarak uzaklaştırmakta, bu da elektrik güç sisteminde gerilim çökmesini ve kaos olaylarını beraberinde getirmektedir.

Kaotik olay deterministik sistemlerde var olan deterministik osilasyonların bir tipidir. Kaotik olaylardaki çalışmalar güç sistemleri kararlılık çalışmalarının önemli bir kısmıdır. İlk çalışmalarda, Ajarapu ve Lee , Chiang [55] , Wang ve Tan , temel olarak güç sistemlerinde kaotik olayların davranışlarını yorumlamaya odaklanmışlardır. Daha sonraki çalışmalarda ise Wu , Rajesh, Yu ve Jia, Srivastava ve Abed kaotik hareket ve sistem dinamik bileşenlerinin karşılıklı olarak birbirlerini

nasıl etkiledikleri ile ilgili çalışmalara başlanmış ve güç sistem kararlılık bölgesinde kaotik osilasyonların elimine edilip önlenmesi ile ilgilenmişlerdir [54].

Kaos kısaca düzensizliğin düzeni şeklinde tanımlanan doğrusal olmayan bir bilim dalıdır. Kaosun ve kaotik işaretlerin başlıca önemli özellikleri; zaman boyutunda düzensizliği, başlangıç şartlarına hassas bağıllığı ve gürültü benzeri geniş güç spektrumuna sahip olmalarıdır. Ele alınan örnek bir güç sistemi modelindeki “Tuhaf çekici” olarak ta adlandırılan kaotik davranışlar bilgisayar simülasyonları yardımıyla gözlemlenmektedir. Bilimdeki temel bir inanış, deterministik sistemlerin önceden belli olmasıdır. Verilen deterministik model, bir başlangıç şartı ve çalışma altındaki bir sistemi tanımlar ise, sistem davranışı bütün zamanlar için önceden bilinebilir.

Periyodik durumların uygulanan güç sistemlerinde var olduğu bilinmektedir. Örneğin; subsenkron rezonans ve düşük frekanslı salınımlar üretim ve iletim sistemlerinde oluşan periyodik durumlardır. Periyodik bir çözümün kararlılığı, bir denge noktasında öz değerlerin bir genelleştirmesi yapıldığında, kendi karakteristik çarpanları tarafından belirlenir. Yaklaşık periyodik olan bir çözüm, periyodik fonksiyonların bir toplamı olarak sunulabilen bir ifadedir. Çekici üzerindeki bu hareket soyut olmasına rağmen, gerçek sistemin hareketi hakkında bir fikir vermektedir.

Bu bölümde, kaosun genel bir düşüncesini açıklamak için nonlinear dinamik sistemlerin sürekli hal davranışlarını incelemek faydalı olacaktır. Bir nonlinear sistem, n boyutlu uzayda aşağıdaki gibi bir dinamik diferansiyel denklem takımı halinde düşünülebilir.

$$\dot{x} = f(x) \quad (5.1)$$

$$\dot{x} = f(x, \lambda) \quad (5.2)$$

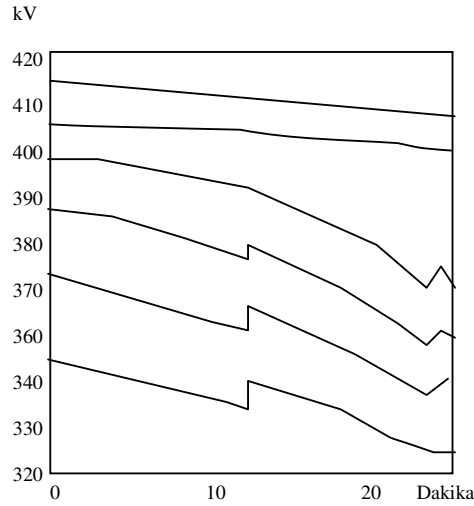
burada x durum vektörü genellikle generator açısı (δ), generator açısal hızı (ω), yük gerilimi büyüklüğü (V), v.b büyüklüklerden oluşur. λ parametresi aktif veya reaktif güç veya generatör gücü olabilir. Sabit bir noktada (bir denge noktası veya sürekli hal çalışma noktasında) $x(\lambda_0)$, böylece (5.2) numaralı denklemin sağ tarafı sıfıra

eşitlenirse, $x(\lambda_0)$, $J=\partial f / \partial x$ da yerlerine konduğunda Jacobianın özdeğerleri ile kararlılık açıklanabilir [62].

5.1. Kararlılık ve Gerilim Çökmesi

Güç sistemleri gittikçe daha karmaşık hale gelmesi ve daha güçlü yüklenmesi nedeniyle, Gerilim çökmesi olayı gittikçe daha ciddi problem olmaya devam etmektedir. Güç kesilmesiyle ilgili olarak gerilim çökmesi, şu an ki hazır güç sistemlerinde meydana gelmektedir.

Bir gerilim çökmesinin başlangıç anlarında, alt istasyonlardaki gerilim genlikleri giderek azalmaktadır. Kontrol elemanları sebebiyle gerilimde geçici bir toparlanma olabilir fakat gerilimler çok kısa süre içinde (Şekil 5.1)'de gözüktüğü gibi çok düşük seviyelere inmektedir.



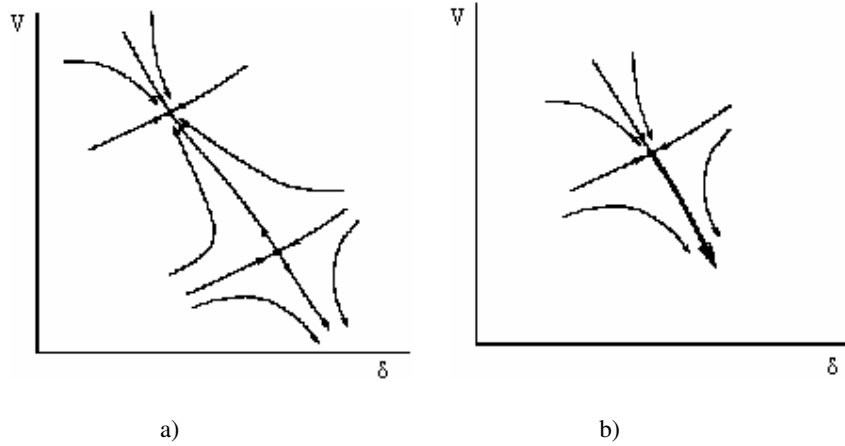
Şekil 5.1. 400 kV'luk bir güç sisteminde gerilim çökmesi olayları

Gerilim çökmesi konusunda ilk önemli konu modelleme, ikincisi ise analitik metotların geliştirilmesidir. Geleneksel güç sistemi kararlılık analizleri rotor ve frekansı osilasyonları problemleri ile ilgilidir. Bu yüzden generatör geriliminin kontrolünün modellenmesi ve yük dinamikleri basitleştirilebilir.

Bir elektrik güç sisteminin güç akışı eşitlikleri, sürekli halde Kirchhoff'un kanunlarından elde edilmektedir. Basit olarak gerilim çökmesi sürekli haldeki durumunu kaybetmesi ve sistem parametrelerinin yavaşça değişim göstermesi ile açıklanabilir. Gerilim çökmesinin tam olarak analiz edilebilmesi için önemli dinamik mekanizmaları ele alınmalıdır.

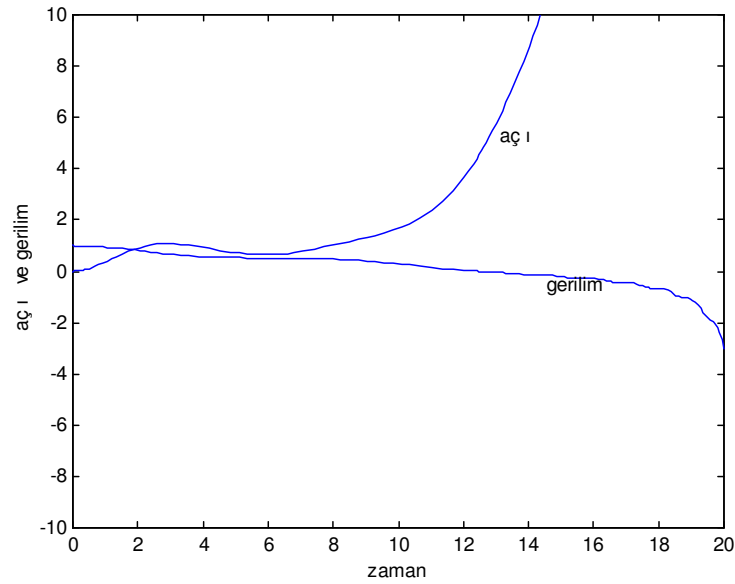
2. Bölümde basit bir güç sisteminin statik gerilim kararlılığı analizleri gerçekleştirilmiş çatallaşma analizi hakkında kısaca bilgi verilerek sistemin eyer noktası(SNB) bulunmuştu. P-V eğrileri üzerinde kritik noktaya kadar olan yüklenmelerde iki adet denge çözümleri mevcut olup kritik noktada sadece bir tek değere ulaşılmaktaydı. Bu değer sistemin eyer noktası olarak bilinen kritik güç değeridir. Eğer yük daha da artacak olursa kararsız bölgeye girileceğinden çözümün olmayacağı aşikardır (Bkz. Şekil 2.2) .

Farklı yüklenme noktalarında gerilimin büyüklüğü V ve açısı δ arasındaki V - δ grafikleri sistemin durum uzayını göstermesi açısından son derece faydalıdır. Bu grafikler üzerinde sistem dinamikleri açıkça görülebilmektedir. Şekil 5.2a'da üst bölgedeki okların denge noktasına doğru yönelmekte olduğu görülmektedir. Bu nokta bir denge noktasıdır ve burada yüksek değerdeki gerilimden başlayan okların denge durumuna yöneldikleri söylenebilir. Bu durumda sistemin kararlı çalışma bölgesinde olduğu ve P-V eğrisinin üst kısmındaki yörüngeyi izlediği söylenebilir. Alt bölgedeki oklar için ise bunun tam tersi bir durum söz konusudur. Yani oklar burada denge noktasından hızla uzaklaşarak gerilimin hızla azalmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla gerilimin kararsız çalışma bölgesinde kaldığı yani P-V eğrisinin alt kısmındaki yörüngeyi izlediği Şekil 5.2b'de ise sistemin çatallaşma noktasında olduğu ve okların denge noktasından uzaklaşarak sistemi kararsızlığı götürdüğü söylenebilir. Bu durumda açı (δ) artmakta gerilim ise (V) hızla azalmaktadır. Bu dinamik hareket gerilim çökmesi mekanizmasını açıklamaktadır.



Şekil 5.2. Durum uzaylarının gösterimi a) yüklenmenin değişimine göre b) çatallaşma anında

Şekil 5.3'de yavaş bir şekilde yüklenen bir sistemde zamanla gerilim ve açı değişimi görülmektedir. Çatallaşma noktasından itibaren gerilim ve açının izlediği yörünge çökme mekanizmasının anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır.



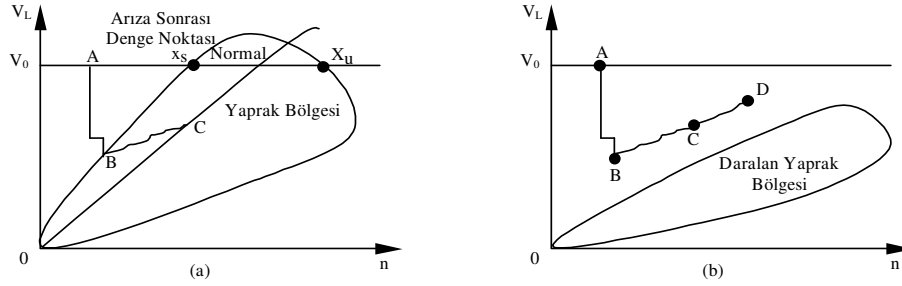
Şekil 5.3. Gerilim çökmesi esnasında gerilim ve açının zamanla değişimi

5.1.1. Generatör limitleri

Generatör normal çalışması normal yazılı eğrinin üzerindeki bölgeyle ilgilidir. Stator veya rotor akımları gibi generatör limitlerinden en az biri normal eğrisinin altına geçtiği zaman generatör düşük gerilimde çalıştırılıyor anlamına gelmektedir.

Sistemin ilk önce, kararlı bir nokta olan A noktasında çalıştığı farz edilirse, bir iletim hattının ani bir anahtarlama olayı gibi bir bozucu durum olduğu zaman bu bozucunun bir sonucu olarak yeni bir yaprak oluşur (Şekil 5.4a).

Çalışma noktası olan A noktası yaprağın dışında olduğu için, düşük bir V_L değerine sahip olunur ve sistem grafik üzerinde aşağıya doğru düşer.



Şekil 5.4. Gerilim çökmesi olayının oluşumu

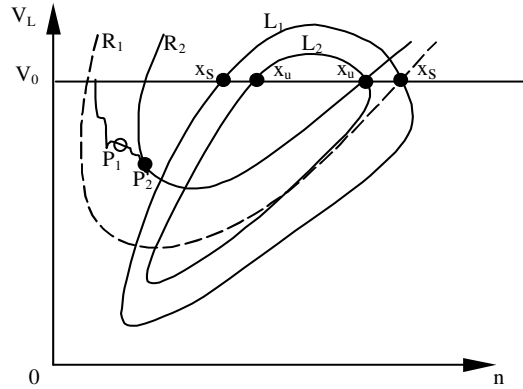
Düşen bu gerilim kademe değiştiricinin çalışmasını başlatır. Sistem durumu dikeylik yörüngesini B noktasına gelerek değiştirir. B noktasında sistem durumu yaprağın içine girer, yaprağın içerisinde V_L artış gösterir. Eğer sistem durumu normal limit eğrisine yönelmez ise, B noktasından bir yörünge izlemektedir. Bu durumda sistem yeni bir denge noktasına yerleşmektedir. Diğer yandan eğer, sistem durumu normal limit eğrisinde bir C noktasına doğru yönelirse, generatör gerilimi E düşer. E gerilimindeki bu azalma yaprakta daralmaya sebep olur ve bu daralma yörüngesinin yaprağın dışına çıkmasına kadar devam eder (Şekil 5.4.b).

Sistem durumu yaprağın dışındaki D noktasına ulaşana kadar, yük gerilimi V_L devamlı düşmekte ve buda gerilim çökmesine yol açmaktadır. Sistemde oluşan bir bozucu x_s ve x_u denge noktalarının yaprağın daralmasıyla birbirlerine doğru yaklaşırlar. Bu da kararlılık bölgesinin de değiştiğini göstermektedir.

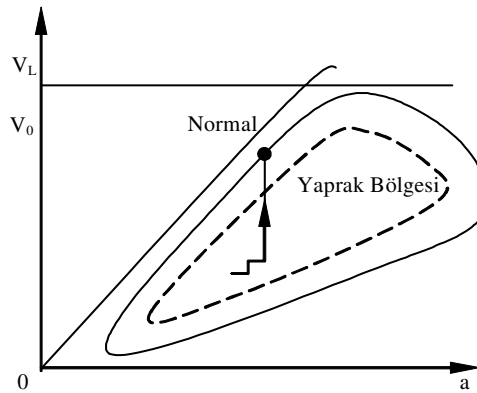
Sistem durumu yaprağın içinde iken, gerilim artışı, sistem generatörün normal çalışmasına doğru hareket ettiğini göstermektedir (Şekil 5.4a). Buna karşın kademe değiştiricisinin devam eden hareketinden sağa doğru hareketi tekrar toparlanma

geriliminden generatörün zarar görmesini önler. Bu hareket, E generatör geriliminin artması ve bunun sonucunda yaprağın bölgesinin genişlemesi sağlansın diye kademe değiştiricisinin kilitletlenmesini yada arızalanmasını önlemektedir.

Kararlı bölgenin içinde başlayan bir yörünge, sonunda kararlı denge noktasına ulaşır. Sistem durumu P_1 noktasına ulaştığı zaman yaprak bölgesi L_1 'dir ve kararlılık bölgesi R_1 'dir. Sistem durumu P_2 'ye ulaştığı zaman, yaprak bölgesi L_2 'dir ve kararlılık bölgesi R_2 'dir. P_1 noktası, R_1 kararlılık bölgesinin bölgesinin içinde olduğu buna karşılık P_2 noktasının R_2 kararlılık bölgesi dışında olması sebebiyle bu iki denge durumu nihayet üst üste çakışır (çatallaşma olayı) ve bütün kararlılık bölgesi boyunca ortadan kaybolur (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Daralan bir kararlılık bölgesi



Şekil 5.6. Yaprak bölgesindeki sistem, gerilimin tekrar toparlanmasına izin verirken kademe değiştiricisinin kilitletlenmesi

Sistem (Şekil 5.6)'da görüldüğü gibi dikey olarak yukarı doğru devam eder ve yeni bir kararlı hal durumunu ulaştığı yaprağın sınırına ulaşır. Buna rağmen yük gerilimi için final değer arzu edilen değerden daha az olabilir. Büyük ölçekli bir güç sistemi modeli için dinamik etkileşimlerin analizi, durum uzayındaki gerilim çökmesi bölgesinin varlığını göstermektedir.

Kademe değiştirici düşük gerilim düzeltmeye başladığında, generatörler kendi limitlerine daha yakın çalışmaya başlarlar. Eğer kendi limitlerine ulaşırsa, kararlılık bölgesi daralmaya gerilim çökmesi bölgesi de genişlemeye başlar. Sistemin durumu genişleyen bir gerilim çökmesi bölgesi içerisine girdiğinde “Gerilim Çökmesi” meydana gelir. Sistemin denge durumunu kaybeder çataşmalar ve kaos olayları yaşanır.

Çataşmadan önce statik eşitlikler statik gerilim kararlılığını analiz edebilir. Ancak, çataşma noktasında bu eşitlikler yeterli olamaz. Bu nedenle dinamik modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde gerilim çökmesi mekanizmasının nasıl gerçekleştiği gözlemlenecektir. Hopf ve çift periyot çataşmalarını içeren dinamik çataşmalar, son zamanlarda araştırılan gerilim çökmesi çalışmalarında, bir güç sistem dinamik modelinde meydana geldiği bulunmuştur. Dinamik çataşmaların meydana gelişi, gerilim çökmesinin başlangıcıyla bağlantılı olarak parametre ve durum uzayları bölgesinde araştırılmaktadır.

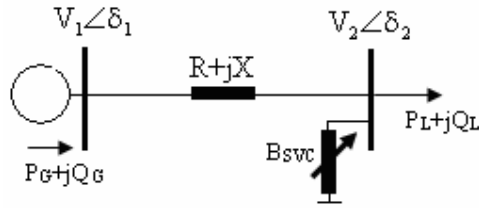
Çataşmalar ve kaos gibi doğrusal olmayan olaylar güç sistemi modellerinde gerilim çökmesinin algılanmasında önemli faktörler olduğu araştırılacağı için, bu doğrusal olmayan olayların varlığında kontrol edilen gerilim çökmesinin problemi açıklanmıştır.

Bu bölümde öncelikle basit bir güç sistemi ele alınarak sistemin kararlılık analizi ve çataşma noktası bulunarak sistemin kaotik osilasyonları elde edilmiştir. Ardından güç sisteminin kararlılığını artırmak için reaktif güç destekleyicileri ve gerilim düzenleyici elemanlarla analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir durum için sistemin

dinamik modelleri oluşturularak kaotik osilasyonlar gözlemlenmiştir. Son kısımda N baralı sistem incelemeleri yapılmıştır.

5.2. Basit Bir Güç Sisteminde Çatallaşma Analizi ve Kaos

Şekil 5.6'da iki baralı basit bir sistem gösterilmiştir. Bu sistem için temel generator modeli dinamik bağıntıları kullanılarak generator modeli, yük için frekans ve gerilime bağımlı dinamik eşitlikler Bölüm 3 de ayrıntılı olarak verildiğinden burada açıklanmaya gerek duyulmamıştır.



Şekil 5.7 İki baralı hat sonunda SVC olan basit bir güç sistemi

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} (P_M - P_G - D_G \omega) \quad (5.3)$$

$$\dot{\delta} = \omega \quad (5.4)$$

$$\dot{V}_2 = \frac{1}{\tau} (Q_L - Q_D) \quad (5.5)$$

burada sırasıyla M ve D_G generator eylemsizlik ve sönümlenme sabitleri, D_L ve τ sırasıyla dinamik yüke ait frekans ve gerilim zaman sabitleridir.

Denklemler (5.2)'ye göre sistemin durum değişkenleri vektörü $\dot{x} = [\omega; \delta; V_2; P_d]$ olarak üç boyutlu haldedir.

5.2.1 SVC uygulaması

Şekil 5.7'de verilen sistem için yük barası gerilimini $V_2 = 1.0$ p.u değerine yükseltmek amacıyla hattın sonuna 0.2935 p.u değerinde bir SVC tesis edilerek analizler gerçekleştirilecektir. SVC temel dinamik modeli aşağıdaki gibidir [115].

$$\dot{B}_{\text{ref}} = \frac{1}{T_R} [-B_{\text{ref}} + K_R (V_{\text{ref}} - V_2)] \quad (5.6)$$

$$\dot{B}_{\text{SVC}} = \frac{1}{T_B} (-B_{\text{SVC}} + B_{\text{ref}}) \quad (5.7)$$

burada T_R ve K_R sırasıyla gerilim regülatörüne ait zaman ve kazanç sabitleri T_B ve B_{ref} sırasıyla SVC'ye ait zaman sabiti ile referans suseptans değeridir.

Bu durumda sisteme ait güç akışı eşitlikleri de aşağıdaki gibi olur. Denklemlerin elde edilmesi ile ilgili ayrıntılar EK B.1'de verilmiştir.

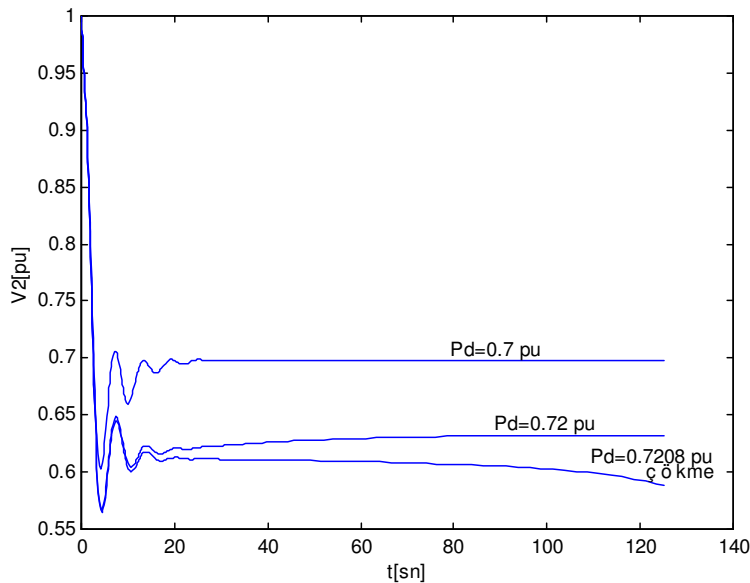
$$P_G = V_1 V_2 (c_1 \cos \delta + c_2 \sin \delta) + \frac{V_1^2 (d_1 b_1 + d_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} - \frac{V_1 V_2}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) + (d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] \quad \dots(5.8)$$

$$Q_L = \frac{V_1 V_2 (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - V_2^2 (a_1 b_2 - a_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} + V_2^2 B_{\text{svc}} \quad (5.9)$$

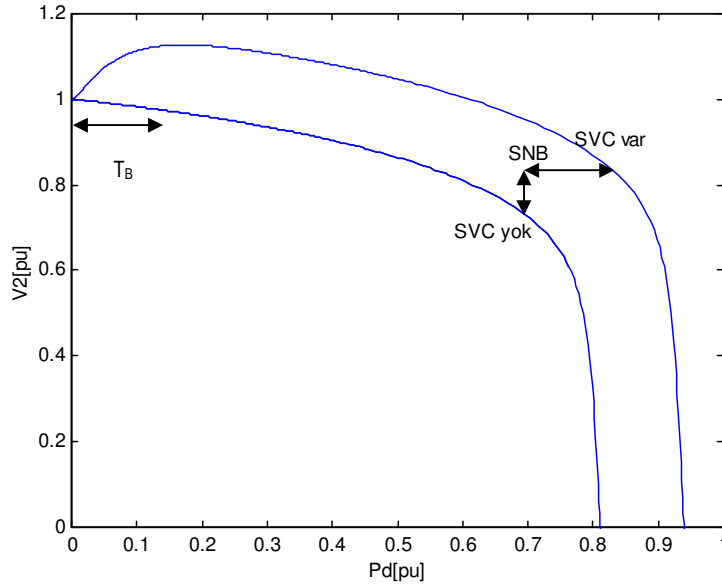
Sabit güç faktörü altında ($k = \tan \Phi$) Sürekli halde yük talebi (P_d) reaktif talep gücüyle orantılı olacak şekilde $Q_d = k \cdot P_d$ olarak alınmıştır. Hattın parametrik değerleri $X = 0.5$ p.u olarak alınmıştır. Generatör barasından üretilen ve yük barasından talep edilen güç sırasıyla $P_G + jQ_G$ ve $P_d + jQ_d$ şeklindedir. Kararlılık analizini basitleştirmek için tüm simulasyonlar boyunca hattın direnci ihmal edilmiş ($R=0$), ve mekanik güç talep güce eşit alınmıştır $P_m = P_d$. Yük barasından $0.6 + j0.2$ p.u değerinde yük çekildiği farzedilmiştir. SVC'ye ait zaman sabiti $T_B = 10$ s dir.

Generatöre ait zaman sabitleri p.u olarak $M = 1$, $D_G = 0.1$, $\tau = 2$ s, Q_G generator reaktif sınırları içerisinde kalacak şekilde ($Q_{G_{\min}} \leq Q_G \leq Q_{G_{\max}}$), generator gerilimi V_1 bir gerilim regülatörü veya AVR tarafından kontrol edilerek $V_1 = V_{10} = 1$ gibi sabit bir değerde tutulmaya çalışılır.

Sisteme SVC'nin eklenmesiyle denklem (5.2)'deki sistemin durum değişkenleri vektörünün boyutu artacak ve $\dot{x} = [w; \delta; V_2; B_{SVC}; P_d]$ olmak üzere 4 boyutlu diferansiyel denklem seti haline gelecektir. Çatallaşma teorisine göre yapılan analizler sonucu SVC'siz sistemin çatallaşma parametresi ($\lambda=1.2011$) bulunmuştur. Buna göre sistemin maksimum yüklenme değeri $P_d^{\max} = 0.7207$ p.u aynı zamanda sistemin çatallaşma noktasıdır. Buna göre sistemin durum değişkenleri vektörünün limit noktalarına ait değerler $\dot{x}^* = [0.0; 0.6245; 0.6163; 0.7207]$ olarak bulunmuştur. Benzer şekilde SVC'li sistem içinde çatallaşma parametresi ($\lambda_{SVC}=1.3712$) bulunmuştur. Buna göre sistemin maksimum yüklenme değeri $P_d^{SVC\max} = 0.82272$ p.u olarak belirlenmiştir. Bu değerler yardımıyla sistemin kararlılık analizlerini gerçekleştirmek mümkündür. Burada SVC'siz ve SVC'li olmak üzere iki durum incelenecektir. İlk durum için (SVC yok) sistemi çökmeye götüren yüklenme noktası civarında yüklendiğini farzederek üç çalışma noktası belirleyelim. Bunlardan ilk ikisi sistemin sürekli halde $\lambda=1.167$ yük artımı ile yani $P_d^1 = 0.70$ p.u değerinde ve $\lambda=1.2$ ile yani $P_d^2 = 0.72$ p.u değerinde olsun. Bu durumda $P_d^1 < P_d^2 < P_d^{\max}$ olduğundan sistem kararlı bir davranış gösterecektir. Üçüncü çalışma noktası olarak bu kez $\lambda=1.201$ yük artımı ile yani $P_d^3 = 0.7208$ p.u olsun. Bu durumda $P_d^3 > P_d^{\max}$ olduğundan sistem kararsız bir davranış gösterecektir Her üç çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimi Şekil 5.8'de görülmektedir.



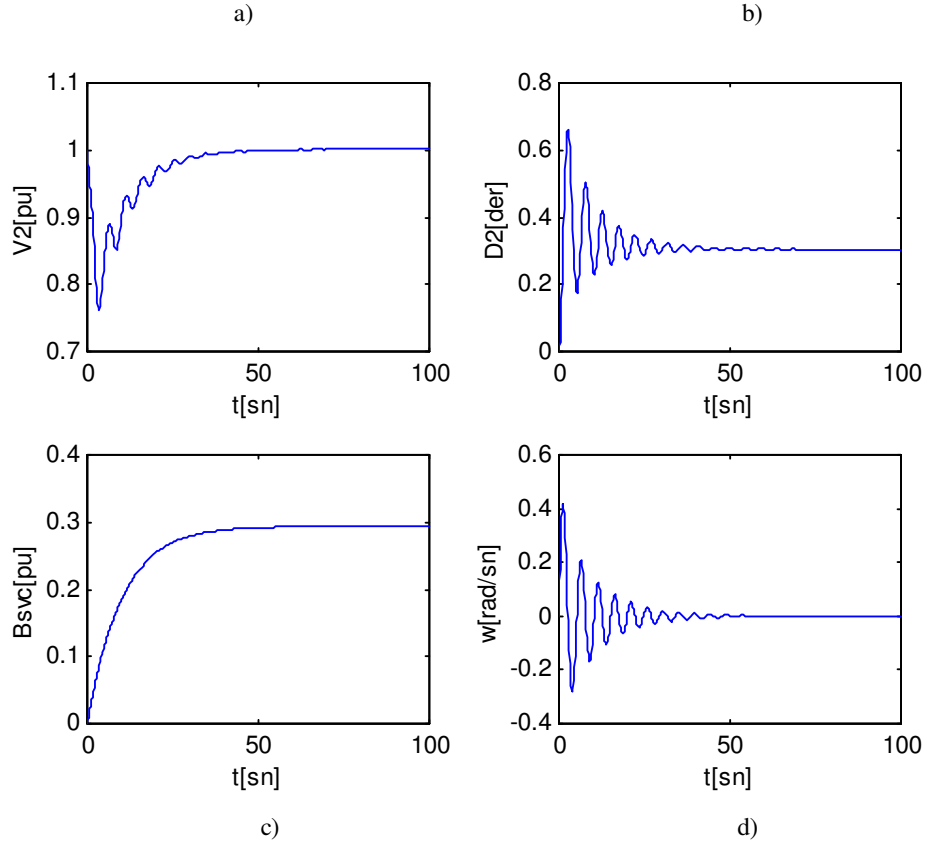
Şekil 5.8. Kritik yüklenme seviyesi civarında üç farklı çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimi



Şekil 5.9 Her iki durum için güç sisteminin P-V eğrileri

Şekil 5.9'da her iki durum için yük barasına ait P-V eğrisi çizdirilmiştir. SVC'nin gerilim kararlılığında iyileştirici etkisi bu şekilden açıkça görülmektedir. Bu grafikte SVC'nin dinamik analizi gerçekleştirildiğinden gerilimin başlangıçtan belli bir süre sonra artması SVC'nin kullanılan dinamik modelindeki zaman sabitinin geciktirici etkisindedir. Dolayısıyla analiz gerçekleştirilirken bu değere dikkat edilmelidir.

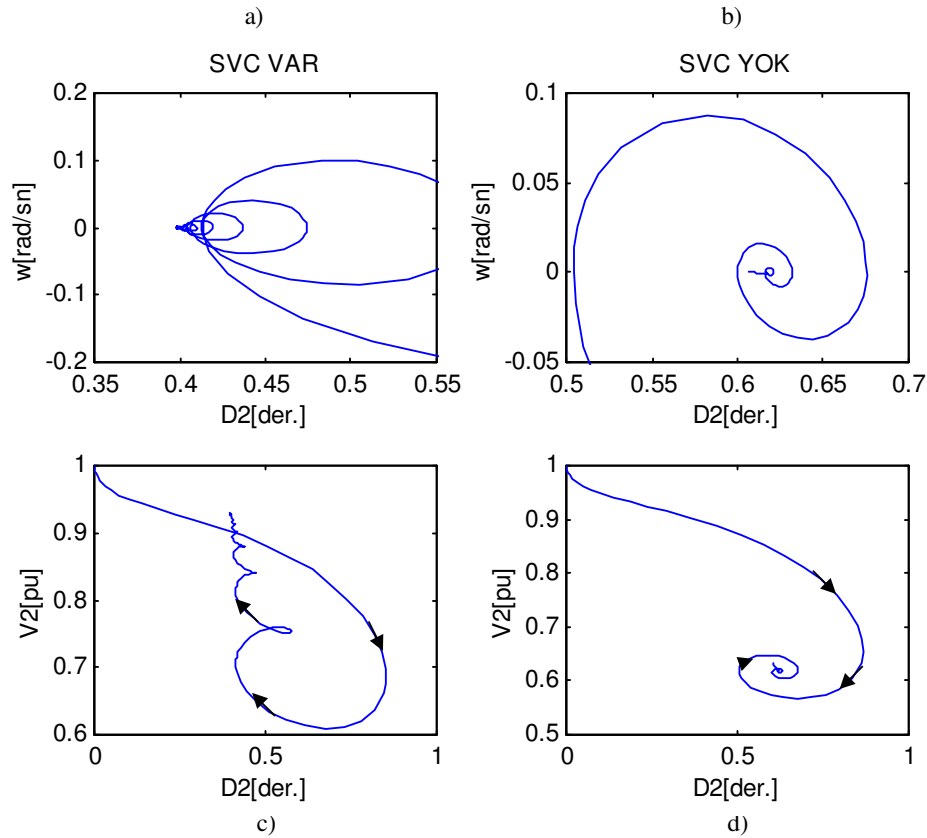
Şekil 5.10c'de SVC'nin suseptans değerinin değişimi bu süreyle ilgilidir. Şekil 5.10' da yük barasına ait gerilim ve açının normal çalışma şartlarında değişimleri görülebilir. Daha önce de belirtildiği gibi SVC V_2 gerilimini 1.0 p.u değerine getirmektedir. (Şekil 5.10a) Sistemin bu çalışma şartlarında kararlı bir davranış gösterdiği açıkça görülmektedir. Nitekim yük açısı bir denge noktasına çekilmekte (Şekil 5.10b) aynı zamanda generatörün açısal hızı da sürekli halde senkronizma da kalmaktadır (Şekil 5.10d) .



Şekil 5.10. $0.6 + j0.2$ p.u yük kararlı kalan sistemin zamanla a) gerilim (V_2) b) açığı (δ_2) c) SVC suseptansı (B_{SVC}) d) generatörün açısal frekansı (w) değişimleri

5.2.1.1. Güç sisteminin durum uzayında davranışı

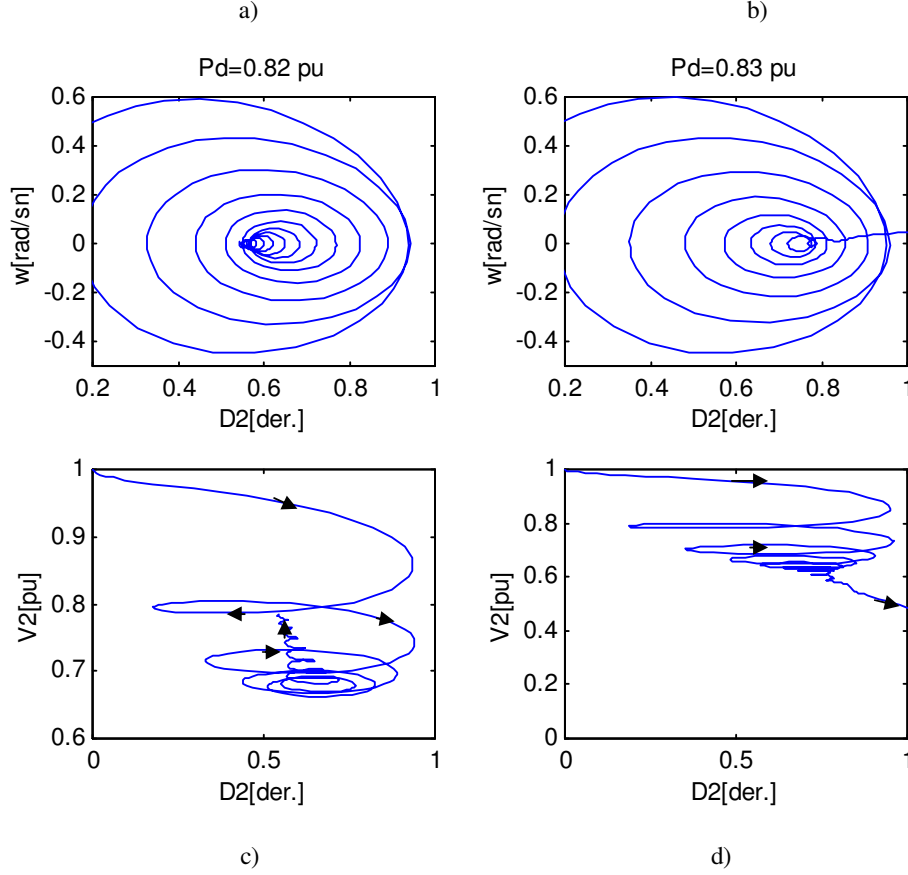
Gerilim kararlılığı mekanizmasının incelenmesi amacıyla sistemin $P_d^2 = 0.72$ p.u ile sürekli yüklendiğini farzedelim $P_d^2 \cong P_d^{\max}$. Bu durum SVC desteği olmayan güç sistemi için kritik değerdir. Sistem çatallaşma noktasına yakın çalışmakta, hat kayıpları artmakta ve reaktif güç desteği alamamaktadır. Bu durum sistemi önce kaosa sürükleyecek gerilim çökmesi tetiklenecektir. Bu durumu faz uzayında görmek için Şekil 5.11d çizdirilmiştir. Dikkat edilirse gerilim yüksek bir değerden aşağıya inmekte ve denge noktasından hızla uzaklaşmaya başlanmıştır. Aynı durum açı oku içinde söylenebilir. Bu çalışma noktası SVC'li sistem için kritik yüklenme seviyesinden düşük olduğundan $P_d^2 < P_d^{SVC\max}$ sistemin bir denge noktasına doğru ilerlediği açı ve gerilim oklarından anlaşılmaktadır (Şekil 5.11c).



Şekil 5.11 $P_d=0.72$ p.u yük değerinde her ikidurum için sistemin faz portreleri zamanla a) SVC'li $(w)-(\delta_2)$ b) SVC'siz $(w)-(\delta_2)$ c) SVC'li $(V_2)-(\delta_2)$ d) SVC'siz $(V_2)-(\delta_2)$

İkinci durum için (SVCvar) sistemi çökmeye götüren yüklenme noktası civarında yüklendiğini farzedelim. Bunun için iki çalışma noktası belirleyelim. Bunlardan ilki sistemin sürekli halde $\lambda=1.367$ yük artımı ile yani $P_d^4=0.82$ p.u değerinde ve $\lambda=1.383$ ile yani $P_d^5=0.83$ p.u değerinde yüklendiğini varsayalım. Bu çalışma noktalarında $P_d^4 < P_d^{SVCmax}$ olduğundan sistem kararlı $P_d^5 > P_d^{max}$ olduğundan sistem kararsız bir davranış gösterecektir. Faz uzayında her iki çalışma noktası için sistemin davranışlarını incelemek amacıyla Şekil 5.12 çizdirilmiştir. Şekil 5.12c'de sistemin yüklenme değeri $P_d^4 < P_d^{SVCmax}$ olduğundan sistemin bir denge noktasına doğru ilerlediği açı ve gerilim oklarından anlaşılmaktadır Benzer şekilde Şekil 5.12a ve c'de her iki durum için sistemin kaotik osilasyonları gözlemlenebilir. Ancak 5.12b'de sistemin yüklenme değeri $P_d^5 > P_d^{max}$ olduğundan bu durum sistemi önce kaosa sürükleyecek ve ardından gerilim çökmesi tetiklenecektir. Dikkat edilirse

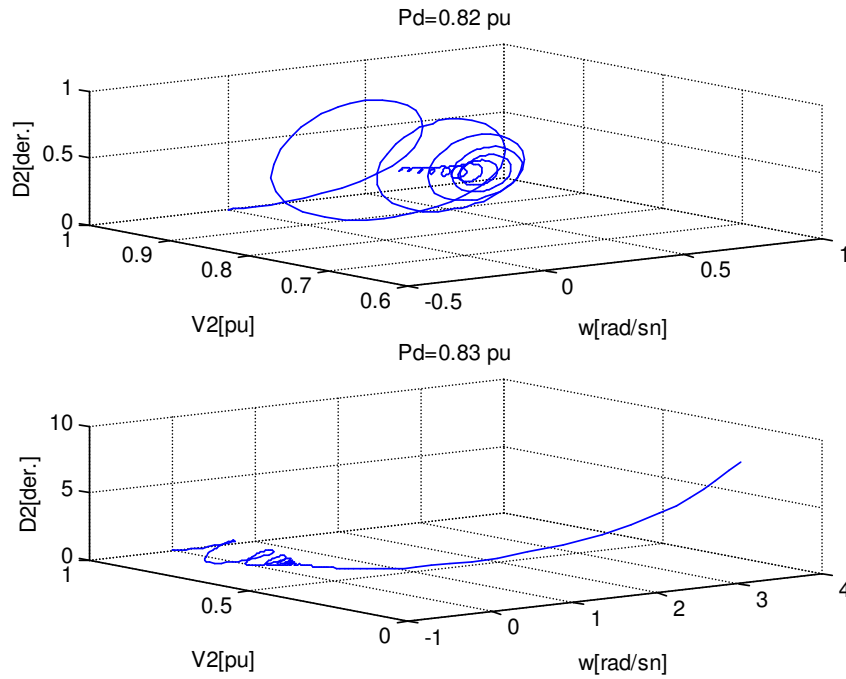
gerilim yüksek bir değerdan aşağıya inmekte ve denge noktasından hızla uzaklaşmaya başlanmıştır. Aynı durum açı oku içinde söylenebilir.



Şekil 5.12 SVC'li sistem için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri a) $(w) - (\delta_2)$ b) $(w) - (\delta_2)$ c) $(V_2) - (\delta_2)$ d) $(V_2) - (\delta_2)$

Şekil 5.11d ve Şekil 5.12d her iki durumda sistemin ağır yüklenme şartları altında faz uzayında davranışını göstermektedir. Dikkat edilirse SVC'li sistemlerde osilasyonun SVC'siz sistemlerdeki nazaranda daha fazla olduğu söylenebilir. Bu da güç sistemlerinde FACTS cihazlarının olumsuz etkilerinden birisi olarak karşımıza çıkmaktadır.

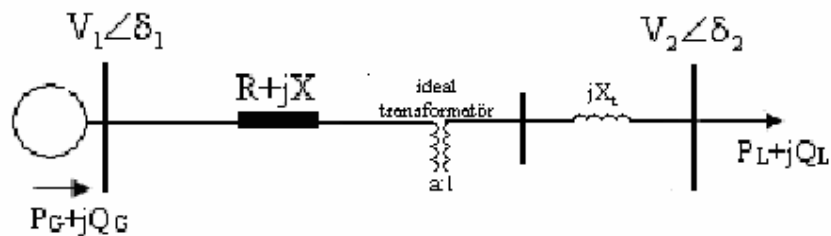
Sistemin yukarıda verilen çalışma şartları için 3 boyutlu faz uzayı grafikleri Şekil 5.13'de verilmiştir. Burada da kararlı ve kararsız durumlar gözükmektedir.



Şekil 5.13. SVC'li sistem için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri (üstte kararlı,altta kararsızlık görülmekte)

5.2.2. KDT uygulaması

Şekil 5.14'de hattın sonuna KDT eklenen iki baralı basit bir sistem gösterilmiştir. Bu sistem için Denklem (5.3-5.4- ve 5.5)'de verilen temel generator modeli dinamik bağıntıları kullanılarak generator modeli, yük için frekans ve gerilime bağımlı dinamik eşitliklerin yanı sıra aşağıda verilen KDT'nin sürekli hal modeli eklenince sistemin durum değişkenleri vektörü $\dot{x} = [w; \delta, V_2, P_d, a]$ şeklini alarak 4 boyutlu hale gelecektir.



Şekil 5.14. İki baralı hat sonunda KDT olan basit güç sistemi

KDT'nin bu modeli $a(t)$ 'nin sürekli bir şekilde değişimine dayanır. $a(t)$ a_{\min} ile a_{\max} arasındaki tüm gerçek değerleri alabilir. Genellikle sürekli kademe değiştirici modelde ayarlanan band sınırlarının etkisi ihmal edilir. Bu nedenle diferansiyel eşitlik aşağıdaki gibi [57] yazılabilir.

$$T_c \dot{a} = -V_2 + V_2^0 \quad a^{\max} \leq a \leq a^{\min} \quad (5.10)$$

Denklem (5.10) kullanıldığı zaman kademe değiştiricinin bir integral karakteristik kontrollü olarak modellendiğine dikkat edilmelidir. Sürekli kademe değiştirici modeli ayrık kademe değiştirici modellerinden daha az doğrudur, fakat faydalı bir yaklaşımdır. Özellikle analitik çözümler için elverişlidir. Hat sonuna KDT ilave edilmesi durumunda Şekil 5.13'de verilen sistem için güç akışı eşitlikleri de aşağıdaki gibi olur. Denklemlerin elde edilmesi ile ilgili ayrıntılar EK B.3'de verilmiştir.

$$P_G = \frac{B_L \xi X + \zeta^2}{a^2 X_t \zeta + X} a V_1 V_2 \sin \delta \quad (5.11)$$

$$P_L = \frac{1}{a^2 X_t \zeta + X} a V_1 V_2 \sin \delta \quad (5.12)$$

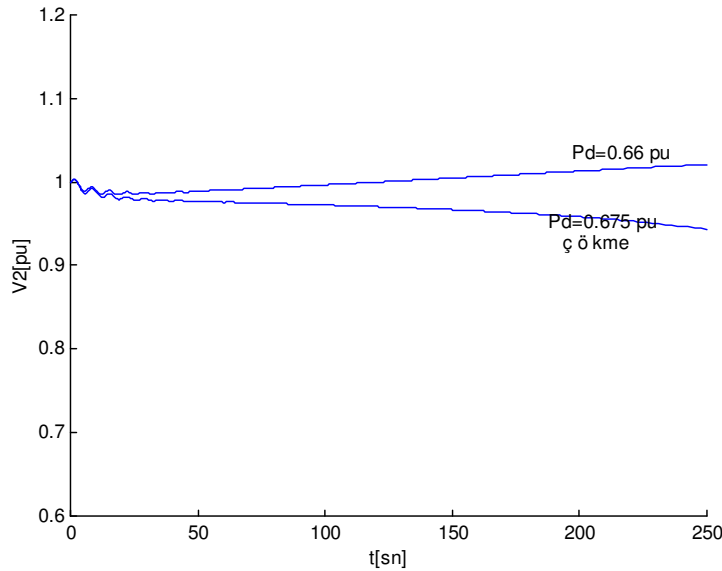
$$Q_L = \frac{a V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2 a^2 \zeta}{a^2 X_t \zeta + X} \quad (5.13)$$

Burada B_L hattın toplam şönt kapasitesini göstermektedir ve simülasyon boyunca ihmal edilmiştir ($B_L = 0$). Ayrıca hattın reaktansı $X = 0.5$ p.u., $\xi = \zeta = 1$ olmak üzere hattın sabit parametrik değerleridir. Sabit güç faktörü altında ($k = \tan \Phi$) Sürekli halde yük talebi (P_d) reaktif talep gücüyle orantılı olacak şekilde $Q_d = k \cdot P_d$ olarak alınmıştır. Generatör barasından üretilen ve yük barasından talep edilen güç sırasıyla $P_G + jQ_G$ ve $P_d + jQ_d$ şeklindedir. Kararlılık analizini basitleştirmek için tüm simülasyonlar boyunca hattın direnci ihmal edilmiş ($R = 0$), ve mekanik güç talep güce eşit alınmıştır. $P_m = P_d$. Yük barasından $0.6 + j0.2$ p.u değerinde yük çekildiği farz edilmiştir. KDT'nin kaçak reaktansı $X_t = 0.1$ p.u olarak alınmıştır. KDT'ye ait zaman sabiti $T_C = 120$ s dir.

5.2.2.1. Çatallaşma analizi

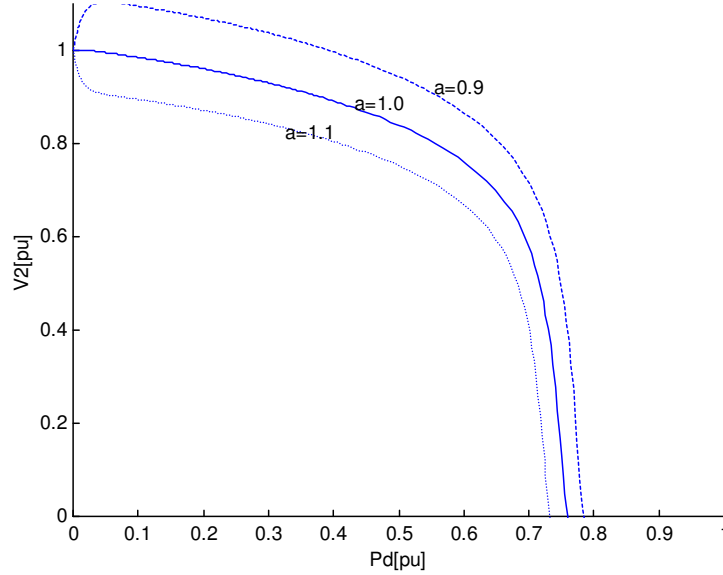
Şekil 5.14'de verilen güç sisteminin durum değişkenleri vektörü $\dot{x} = [w; \delta; V_2; P_d; a]$ şeklini alacaktır. Çatallaşma Teorisine göre yapılan analizler sonucu sistemin çatallaşma parametresi ($\lambda_{KDT}=1.12$) bulunmuştur. Buna göre sistemin maksimum yüklenme değeri $P_d^{KDT\max} = 0.672$ p.u aynı zamanda sistemin çatallaşma noktasıdır. Burada yük barasındaki gerilimin KDT kademe oranının değişimiyle 1.0 pu değerine getirilmesi amaçlanmıştır. Bu durumda sistemin durum değişkenleri vektörünün limit noktalarına ait değerler $\dot{x}^* = [0.0; 0.6573; 1.0; 0.672; 0.588]$ olarak bulunmuştur. Bu değerler yardımıyla sistemin sürekli halde kararlılık analizlerini gerçekleştirmek mümkündür.

Yapılan çalışmanın bu bölümünde sistemi çökmeye götüren yüklenme noktası civarında yüklendiğini farzederek iki çalışma noktası belirleyelim. Bunlardan ilki sürekli halde $\lambda^1 = 1.11$ yük artımı ile yani $P_d^1 = 0.66$ p.u değerinde ve $\lambda^2 = 1.125$ ile yani $P_d^2 = 0.675$ p.u değerinde yüklendiğini varsayalım. Bu durumda $P_d^1 < P_d^{KDT\max} < P_d^2$ olduğundan sistemin kararlı ve kararsız bir davranış göstereceği bu değerlerden anlaşılmaktadır. Simulasyon sonuçları da bekleneni göstermiştir. Her iki çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimini izlemek amacıyla Şekil 5.15 çizdirilmiştir .



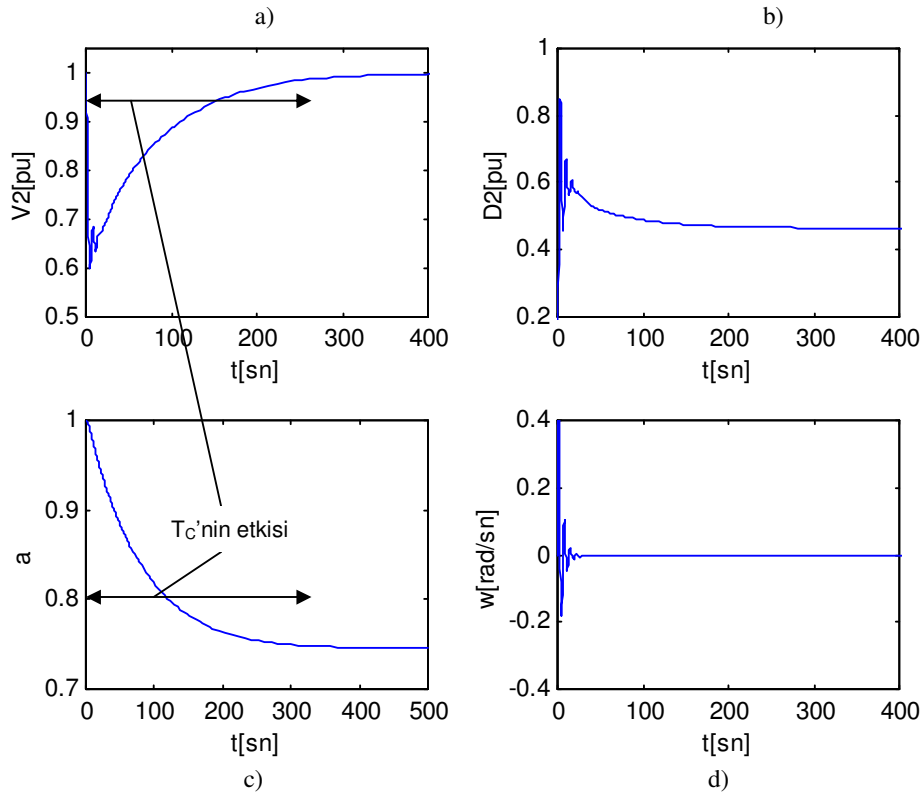
Şekil 5.15. Kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için gerilim -zaman değişimi

KDT'nin dönüştürme oranı değerinin sürekli hal gerilim kararlılığı analizinde nasıl bir rol oynadığını görmek için üç farklı dönüştürme oranı seçilerek bir çalışma yapılmıştır. Kademe oranlarındaki değişimlerin maksimum güç transferindeki etkileri oldukça açıktır. Her üç değer için yük barasına ait P-V eğrisi Şekil 5.16'da çizdirilmiştir.



Şekil 5.16. Farklı dönüştürme oranı (a) değerleri için P-V eğrileri

Şekil 5.17' de yük barasına ait gerilim ve açının normal çalışma şartlarında değişimleri görülebilir. Daha önce de belirtildiği gibi KDT V_2 gerilimini 1.0 p.u değerine getirmektedir (Şekil 5.17a). Sistemin bu çalışma şartlarında kararlı bir davranış gösterdiği açıkça görülmektedir. Nitekim yük açısı bir denge noktasına çekilmekte (Şekil 5.17b) aynı zamanda generatörün açısal hızı da sürekli halde senkronizma da kalmaktadır (Şekil 5.17d). Şekil 5.17c'de KDT'nin değiştirme oranının zamanla değişimi görülmektedir. Bu grafiklerde KDT'ye ait dinamik modelde kullanılacak zaman sabiti (T_C)'nin etkisini görmek mümkündür. Hassas modellemelerde bu sürenin dikkate alınması gerekebilir. Zira KDT'ler yavaş dinamikleri nedeniyle orta süreli gerilim kararsızlığı probleminde önemli bir etkiye sahiptir. T_C daha düşük alındığı zaman gerilimin daha kısa bir zamanda dengeye oturacağı aşıkardır. Bu da kararlılık çalışmalarında dikkate alınması gereken önemli bir husustur.



Şekil 5.17 0.6 +j0.2 p.u yüklenme değerinde kararlı kalan sistemin zamanla a) gerilim (V_2) b) açığı (δ_2) c) KDT dönüştürme oranı (a) d) generatörün açılmal frekansı (w) değişimleri

5.2.2.2 Yük karakteristiklerinin etkisi

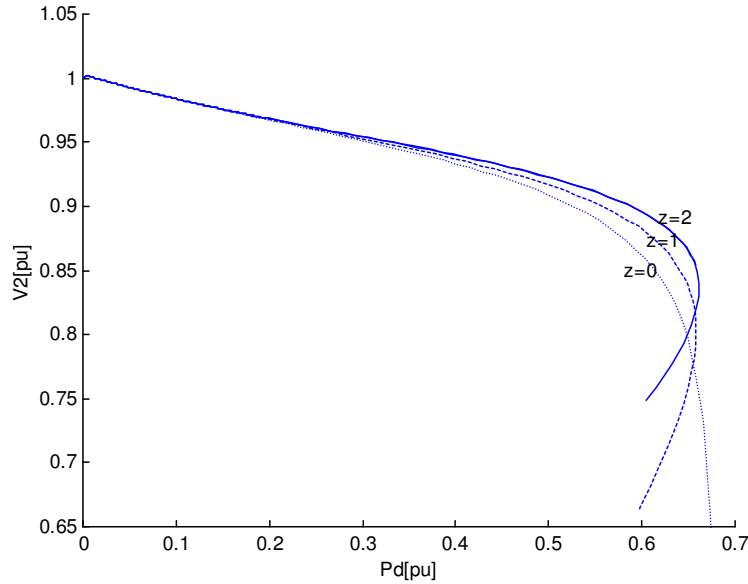
Yük talebi olarak adlandırdığımız aktif ve reaktif gücün gerilimin bir fonksiyonu olarak ifadesine yük karakteristiği adı verilir. Yaygın olarak üstel yük modeli olarak bilinen ve simülasyon çalışmasında kullanılan model Denklem 5.10'da verilmiştir. (Ayrıntılı bilgi için Bölüm 3.2'ye bakılabilir)

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{z_p} \quad (5.14)$$

Benzer bir ifade reaktif güç içinde yazılabilir (Bkz. Denklem 3.3b). Burada başlangıçta $P_0=0.6$ p.u, P yük tarafından talep edilen aktif güç (P_d), V ise yük tarafından talep edilen gerilimin büyüklüğüdür ($V=V_2$).

Yapılan simülasyon çalışmalarının ilk bölümünde yük barasında sabit güç yükü karakteristiğinde ($z_p = z_q = z = 0$) yüklerin baskın olduğu bir durum düşünülmüştür. Elektriksel yüklerin çeşitlilik göstermeleri ve farklı karakteristik yapıda olmaları nedeniyle yük barasında bu tür yapıda yükler oluşturularak kararlılık analizleri yapılmıştır. Bu simülasyonlar yapılırken yukarıda verilen parametreler aynen kullanılmış bu kez yük barasında sabit empedans ($z_p = z_q = z = 2$), ve sabit akım ($z_p = z_q = z = 1$) yükleri olmak üzere iki farklı tiplerde yükler olduğu farzedilmiştir.

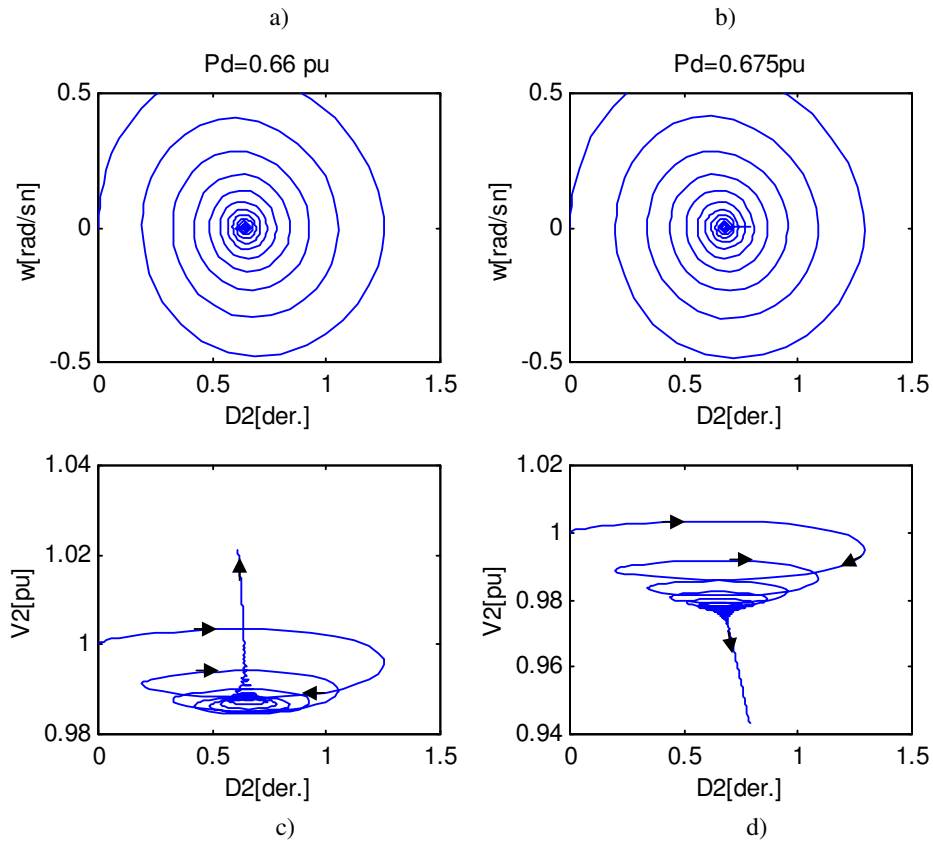
Tüm yük durumları için elde edilen sonuçlar Şekil 5.18' de gösterilmiştir. Buna göre yük barasında sabit empedans karakteristikli ($z=2$) yüklerin gerilim kararlılığı açısından daha iyi sonuçlar verdiği açıkça görülmekte sabit güç yüklerinde ise ($z=0$) bu tür yüklerin gerilim kararlılığı açısından en olumsuz tür olduğu görülmektedir. Bu tür yüklerin kararsızlığa daha meyilli olduğu ve daha çabuk çökme sürecine girdiği gözlenmiştir. Bu nedenle kademe değiştirici transformatörlü güç sistemlerinde çökme sürecine daha hızlı giren bu tip yüklerde kararlılığın iyileştirilmesi için müdahale (reaktif güç desteği, kademe değiştirici transformatörlerin kademe oranı değişimi, bozucu etkinin ortadan kaldırılması v.b) diğerlerine nazaran daha erken yapılmalıdır.



Şekil 5.18. (Şekil 5.14)'de verilen güç sisteminde $z=0, z=1, z=2$ için P-V eğrileri

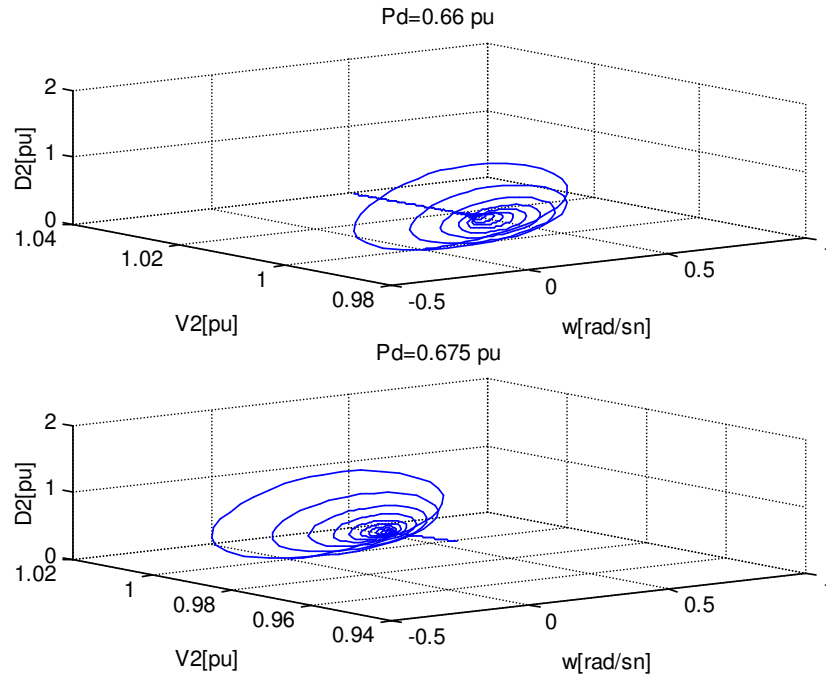
5.2.2.3. Güç sisteminin durum uzayında davranışı

Faz uzayında her daha önce belirlenen her iki çalışma noktası için sistemin davranışlarını incelemek amacıyla Şekil 5.19 çizdirilmiştir. Şekil 5.19c’de sistemin yüklenme değeri $P_d^1 < P_d^{KDT\ max}$ olduğundan sistemin bir denge noktasına doğru ilerlediği açı ve gerilim oklarından anlaşılmaktadır . gibi sistemin yüklenme değeri $P_d^2 > P_d^{KDT\ max}$ olduğunda bu durum, sistemi önce kaosa sürükleyecek ve ardından gerilim çökmesi tetiklenecektir (Bkz.Şekil 5.19d). Dikkat edilirse gerilim yüksek bir değerden aşağıya inmekte ve denge noktasından hızla uzaklaşmaya başlanmıştır. Aynı durum açı oku içinde söylenebilir.



Şekil 5.19 KDT’li sistem için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri a) $(w) - (\delta_2)$ b) $(w) - (\delta_2)$ c) $(V_2) - (\delta_2)$ d) $(V_2) - (\delta_2)$

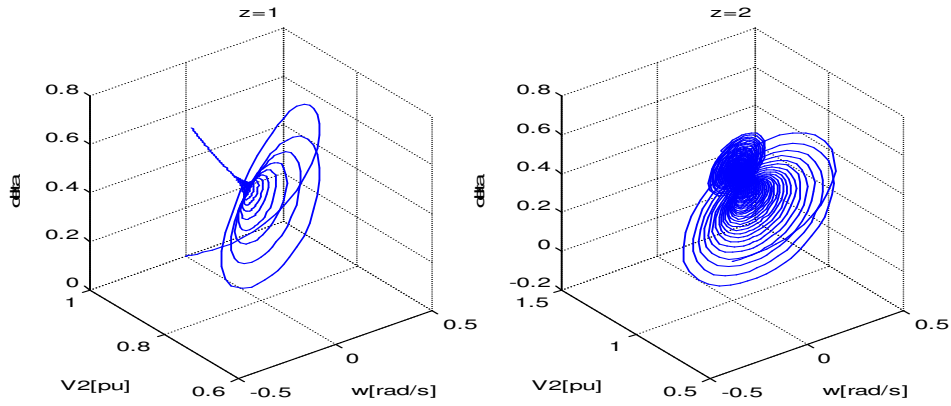
Şekil 5.20 sistemin ağır yüklenme şartları altında faz uzayında davranışını göstermektedir. Sistemin bu çalışma şartları için 3 boyutlu durum uzayındaki yörüngelerin davranışı bu şekilde görülmektedir. Burada da kararlı ve kararsız durumlar gözükmemektedir.



Şekil 5.20. ($z=0$) için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri (üste kararlı, alta kararsızlık görülmekte)

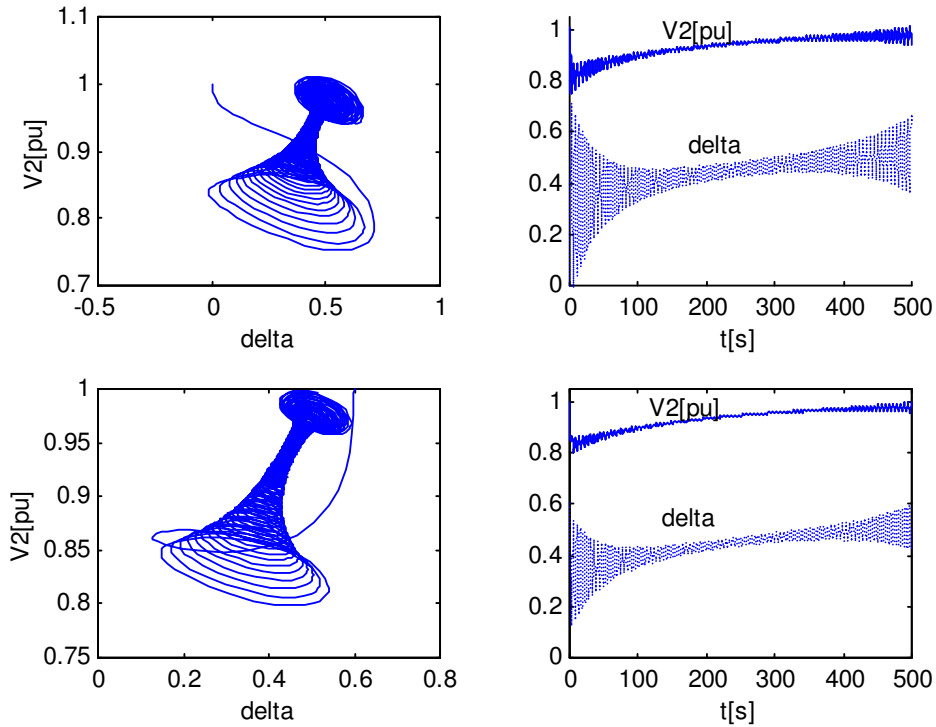
Yukarıda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde sistemin $\lambda^1=1.1$ miktarında yük artımı ile sürekli yüklenmesi hali için sabit akım ve sabit empedans karakteristikli yüklerin gerilime bağımlılık derecelerine göre bozucu etki sonrası kararlı kalmaları yüklenme şartlarına ve bozucu etkinin ortadan kaldırılması süresine göre değişmektedir. Yani bu durumlarda kademe değiştirici transformatörlerin yavaş dinamikleri sistem kararlılığında oldukça önemli bir rol oynayacaktır. Sistemin özellikle sabit empedans karakteristikli yükler için kararlı kalması beklenirken uzun süren ve genliği gitgide artan salınımlar sonucu bu tür yükler için sistem kaotik bir yapıya dönüşmekte ve bu osilasyonlar kararsızlığa taşımaktadır.

Bu çalışmaya ait üç boyutlu faz portreleri Şekil 5.21'de çizdirilmiştir. Buradan rahatlıkla sabit empedans karakteristikli yüklerin ağır çalışma şartlarında kaotik osilasyonlar yaptığı söylenebilir.



Şekil 5.21. $P_{d=}$ 0.66 p.u için sabit akım ve sabit empedans, yük karakteristiğinde yüklerin karşılaştırmalı faz portreleri

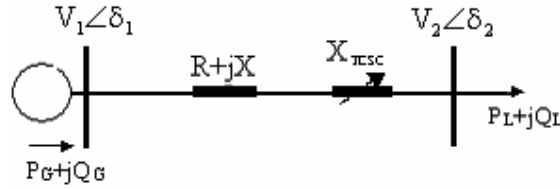
Kaotik yapılar başlangıç şartlarına hassas bağımlı olduklarından özellikle bu tür yükler için başlangıç şartlarında değişimlerin etkilerini gözlemlemek amacıyla Şekil 5.22'deki eğriler çizdirilmiştir. Bunun için generator ve yük açısı farkı olan (δ) açısının değeri $\delta_0 = 0^0$ ve $\delta_0 = 0.6^0$ gibi farklı başlangıç değerleri olarak analizler yapılmıştır.



Şekil 5.22. (δ) açısının iki farklı başlangıç değeri için faz portreleri ve açı ve gerilimin zamanla değişimi (üstte $\delta_0 = 0^0$, altta $\delta_0 = 0.6^0$)

5.3. TCSC uygulaması

Şekil 5.23'de hattın sonuna TCSC eklenen iki baralı basit bir sistem gösterilmiştir. Bu sistem için (5.3-5.4- ve 5.5)'de verilen temel generator modeli dinamik bağıntıları kullanılarak generator modeli, yük için frekans ve gerilime bağımlı dinamik eşitliklerin yanı sıra aşağıda verilen TCSC'nin sürekli hal modeli eklenince sistemin durum değişkenleri vektörü $\dot{x} = [w; \delta; V_2; P_d; X_{TCSC}]$ şeklini alarak 4 boyutlu hale gelecektir.



Şekil 5.23 İki baralı hat sonunda TCSC olan basit güç sistemi

Hat sonuna TCSC ilave edilmesi durumunda Şekil 5.23'de verilen sistem için güç akışı eşitlikleri de aşağıdaki gibi olur. Denklemlerin elde edilmesi ile ilgili ayrıntılar EK B.2'de verilmiştir.

$$P_G = \frac{B_L \zeta X + \xi^2}{X - X_{TCSC} \xi} a V_1 V_2 \sin \delta \quad (5.15)$$

$$P_L = \frac{1}{X - X_{TCSC} \xi} V_1 V_2 \sin \delta \quad (5.16)$$

$$Q_G = \frac{V_2^2 \xi - \xi^2 V_1 V_2 \cos \delta - B_L X \zeta V_1 V_2 \cos \delta + V_1^2 X_{TCSC} B_L \zeta}{X - X_{TCSC} \xi} \quad (5.17)$$

Burada B_L hattın toplam şönt kapasitesini göstermektedir ve simulasyon boyunca ihmal edilmiştir ($B_L = 0$). Ayrıca hattın reaktansı $X = 0.5$ p.u., $\xi = \zeta = 1$ olmak üzere hattın sabit parametrik değerleridir. Sabit güç faktörü altında ($k = \tan \Phi$) Sürekli halde yük talebi (P_d) reaktif talep gücüyle orantılı olacak şekilde $Q_d = k \cdot P_d$ olarak alınmıştır.

Generatör barasından üretilen ve yük barasından talep edilen güç sırasıyla $P_G + jQ_G$ ve $P_d + jQ_d$ şeklindedir. Kararlılık analizini basitleştirmek için tüm simülasyonlar boyunca hattın direnci ihmal edilmiş ($R=0$), ve mekanik güç talep güce eşit alınmıştır $P_m = P_d$. Yük barasından 0.6 +j0.2 p.u değerinde yük çekildiği farzedilmiştir.

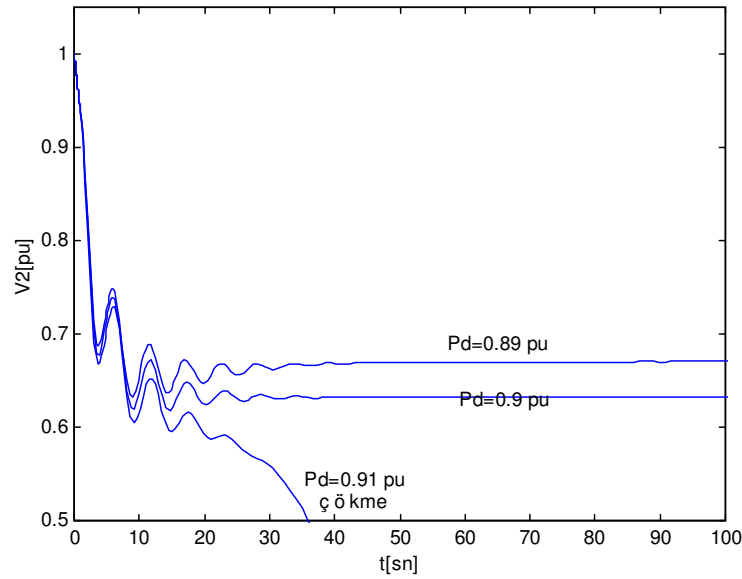
5.3.1 Dinamik gerilim kararlılığı analizi

Bölüm 4.3.3’de anlatıldığı gibi TCSC ayarlanabilen suseptans değerine göre istenilen aktif güç akışını sağlayan ve iletim hattına seri bağlı FACTS cihazıdır. Bu analiz gerçekleştirilirken TCSC’nin güç akışı kontrol stratejisi aşağıdaki denklemle verilmiştir.

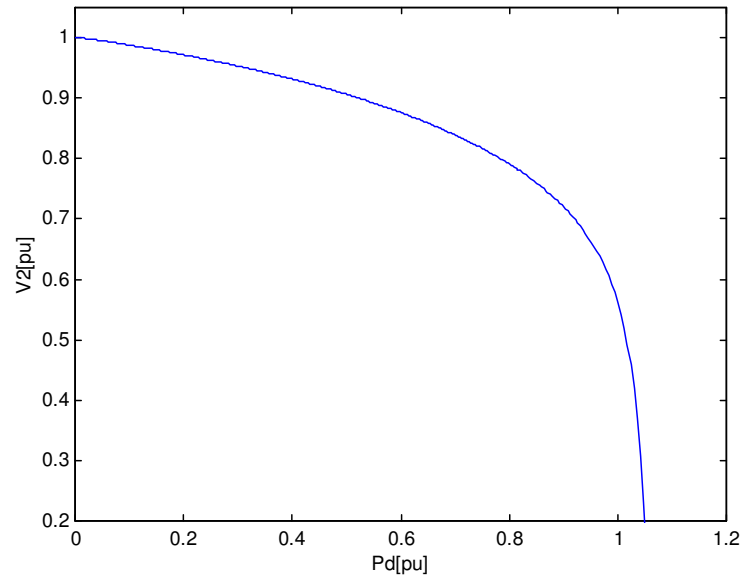
$$\Delta \dot{X}_{TCSC} = -\frac{2I^2}{X - \underbrace{(X_C(0) - \Delta X_{TCSC})}_{X_{TCSC}}} \left[\frac{\Delta X_{TCSC}}{K_C} + \dot{I}^2 \right] \quad (5.18)$$

Burada $X_C(0)$ TCSC’nin sahip olduğu kapasite değeridir ve simülasyon boyunca 0.1 pu alınmıştır. K_C ise kontrol kazanç sabitesi olarak 100 değerinde alınmıştır. I ise yük barasından çekilen akım değeridir.

Şekil 5.23’de verilen güç sisteminin durum değişkenleri vektörü $\dot{x} = [w; \delta; V_2; P_d; \Delta X_{TCSC}; \dot{I}^2]$ şeklini alacaktır. 0.1 pu değerinde kapasitif reaktansa sahip TCSC sürekli halde sistemin maksimum yüklenme sınırını artırarak 0.9 pu’e kadar yükseltmiştir. Yapılan çalışmanın bu bölümünde sistemi çökmeye götüren yüklenme noktası civarında yüklendiğini farzedelim. Bunun için üç çalışma noktası belirleyelim. Bunlardan ilk ikisi sistemin sürekli halde $\lambda=1.4833$ yük artımı ile yani $P_d^1 = 0.89$ p.u değerinde ve $\lambda=1.5$ ile yani $P_d^2 = 0.9$ p.u değerinde yüklendiğini varsayalım. Bu durumda $P_d^1 < P_d^2 < P_d^{TCSC \max}$ olduğundan sistem kararlı bir davranış gösterecektir. Üçüncü çalışma noktası olarak bu kez $\lambda=1.5083$ yük artımı ile yani $P_d^3 = 0.905$ p.u değerinde yüklendiğini varsayalım. Bu durumda $P_d^3 > P_d^{TCSC \max}$ olduğundan sistem kararsız bir davranış gösterecektir. Bu durumları izlemek amacıyla Şekil 5.24 çizdirilmiştir. Her üç çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimi görülmektedir.



Şekil 5.24 Kritik yüklenme seviyesi civarında 3 farklı çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimi

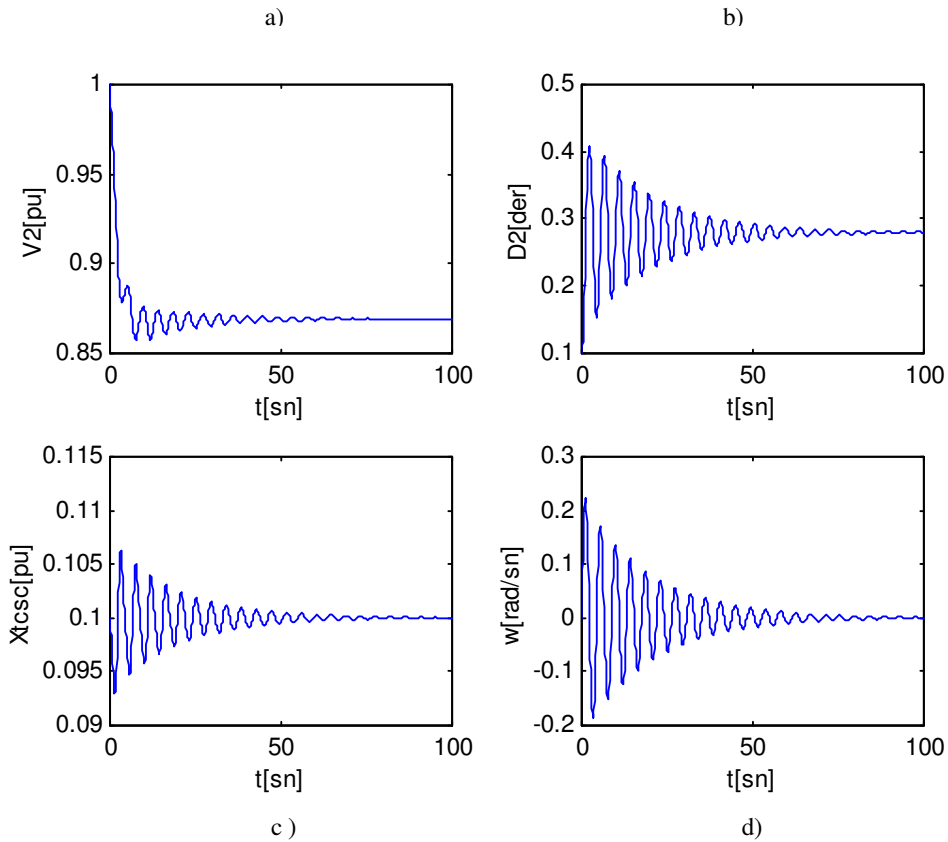


Şekil 5.25. TCSC ilaveli güç sisteminin P-V eğrisi

Şekil 5.25’de TCSC’ li sistem için P-V eğrisi çizdirilmiştir. Maksimum güç transferi açısından burada elde edilen sonuç daha önce yapılan SVC ve KDT uygulamalarına nazaran daha iyidir. Buna göre sistemin kritik yük değerleri arasında $P_d^{TCSC_{max}} > P_d^{SVC_{max}} > P_d^{max} > P_d^{KDT_{max}}$ bir sıralama yapılabilir. Ancak burada önemli bir noktaya dikkat edilmesinde fayda vardır. Zira bu sonuçlar SVC’nin TCSC’den daha kötü sonuç verdiği anlamına gelmemelidir. Bu sonuç tamamen kullanılan

elemanların kapasitif miktarlarından kaynaklanır. Yani bu değerler yükseldikçe bu sıralama değişebilir. Ancak KDT için bunu söylemek zordur. Çünkü kaçak reaktansları nedeniyle hattın empedansını yükselten bu cihazlar maksimum güç iletimi de nispeten azalmaktadır.

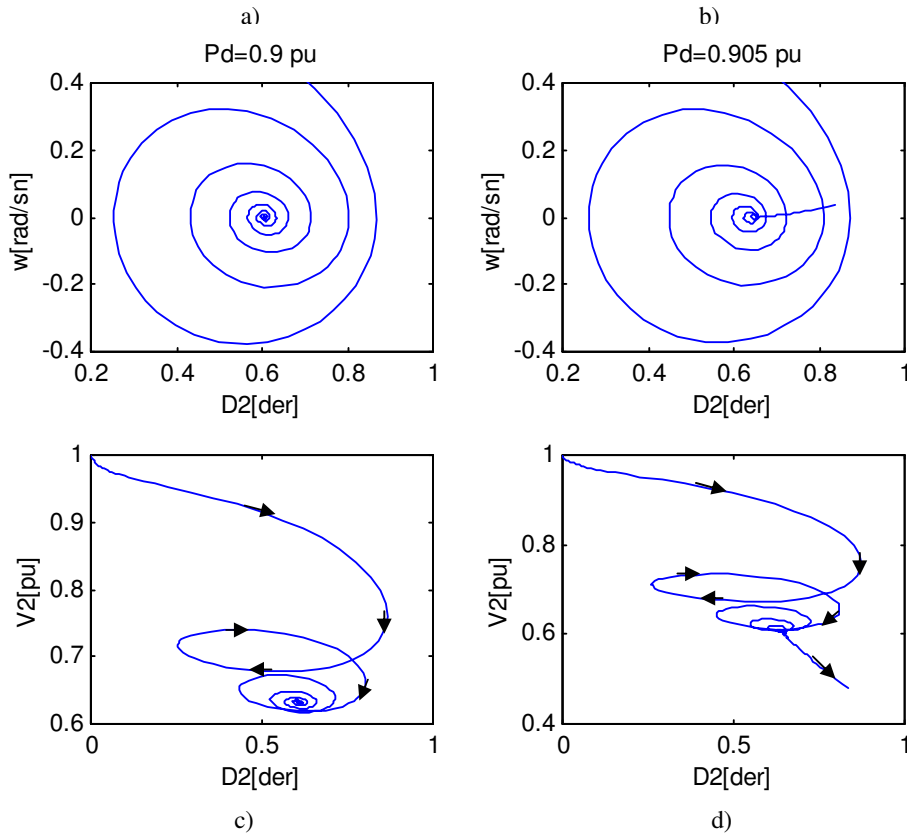
Şekil 5.26' da yük barasına ait gerilim ve açının normal çalışma şartlarında değişimleri görülebilir. Bunun için sistemin $P_d = 0.6$ pu' te yüklendiğini farzedelim. Sistemin nominal çalışma şartlarında sürekli halde V_2 geriliminin 0.88 p.u civarında dengeye oturduğu söylenebilir. (Şekil 5.26a) Sistemin bu çalışma şartlarında kararlı bir davranış gösterdiği açıkça görülmektedir. Nitekim yük açısı bir denge noktasına çekilmekte aynı zamanda generatörün açısal hızı da sürekli halde senkronizma da kalmaktadır(Şekil 5.26b ve d). Şekil 5.26c'de TCSC'nin reaktans değerinin zamanla değişimi görülmektedir. Başlangıçta 0.1 pu kapasitif değere sahip olan TCSC Denklem 5.18'de verilen kontrol stratejisine göre zamanla bu değere oturmaktadır. Burada geçen sürede modelde kullanılan kazanç faktörü etkili olmaktadır.



Şekil 5.26. $0.6 + j0.2$ p.u yükte kararlı kalan sistemin zamanla a) gerilim (V_2) b) açısı (δ_2) c) TCSC reaktansı (X_{TCSC}) d) generatörün açısal frekansı (w) değişimleri

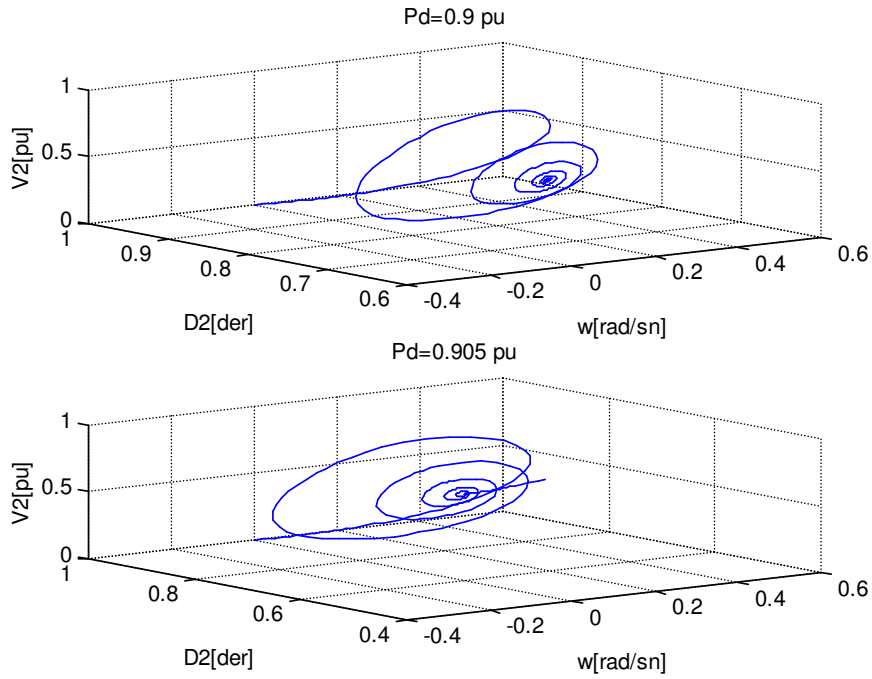
5.3.2. Güç sisteminin durum uzayında davranışı

Faz uzayında kritik nokta civarında $P_d^2 = 0.9$ p.u ve $P_d^3 = 0.905$ olmak üzere iki çalışma noktası belirleyelim. Bu durumda $P_d^2 < P_d^{TCSC\max}$ olduğundan sistem kararlı bir davranış gösterecektir. İkinci çalışma noktası durumunda $P_d^3 > P_d^{TCSC\max}$ olacağından sistem çatallanma noktasına doğru periodik olmayan salınımlar yaparak durum uzayında davranış sergileyecektir. Sistemin bu çalışma şartlarında durum uzayındaki davranışları Şekil 5.27'de çizdirilmiştir. Şekil 5.27c'de sistemin yüklenme değeri $P_d^2 < P_d^{TCSC\max}$ olduğundan sistemin bir denge noktasına doğru ilerlediği açı ve gerilim oklarından anlaşılmaktadır. Şekil 5.27d'de ise sistemin yüklenme değeri $P_d^3 > P_d^{TCSC\max}$ olduğunda bu durum, sistemi önce kaosa sürükleyecek ve ardından gerilim çökmesi tetiklenecektir. Dikkat edilirse gerilim yüksek bir değerden aşağıya inmekte ve denge noktasından hızla uzaklaşmaya başlamaktadır. Aynı durum açı oku içinde söylenebilir.



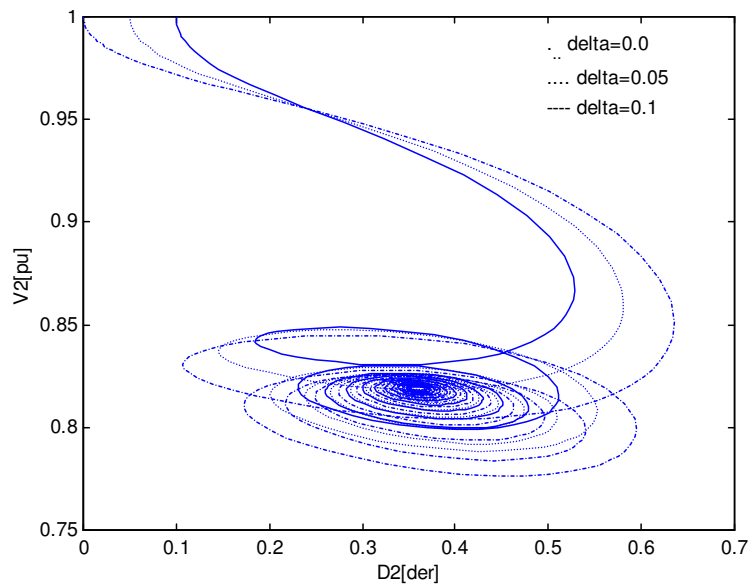
Şekil 5.27. TCSC'li sistem için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri a) $(w) - (\delta_2)$ b) $(w) - (\delta_2)$ c) $(V_2) - (\delta_2)$ d) $(V_2) - (\delta_2)$

Şekil 5.28 sistemin P_d^2 ve P_d^3 gibi ağır yüklenme şartları altında faz uzayındaki yörüngelerin kararlı ve kararsız davranışını izlemek için oldukça faydalıdır.



Şekil 5.28. P_d^2 ve P_d^3 yüklenme değerleri için faz portreleri (üstte kararlı, altta kararsızlık görülmekte)

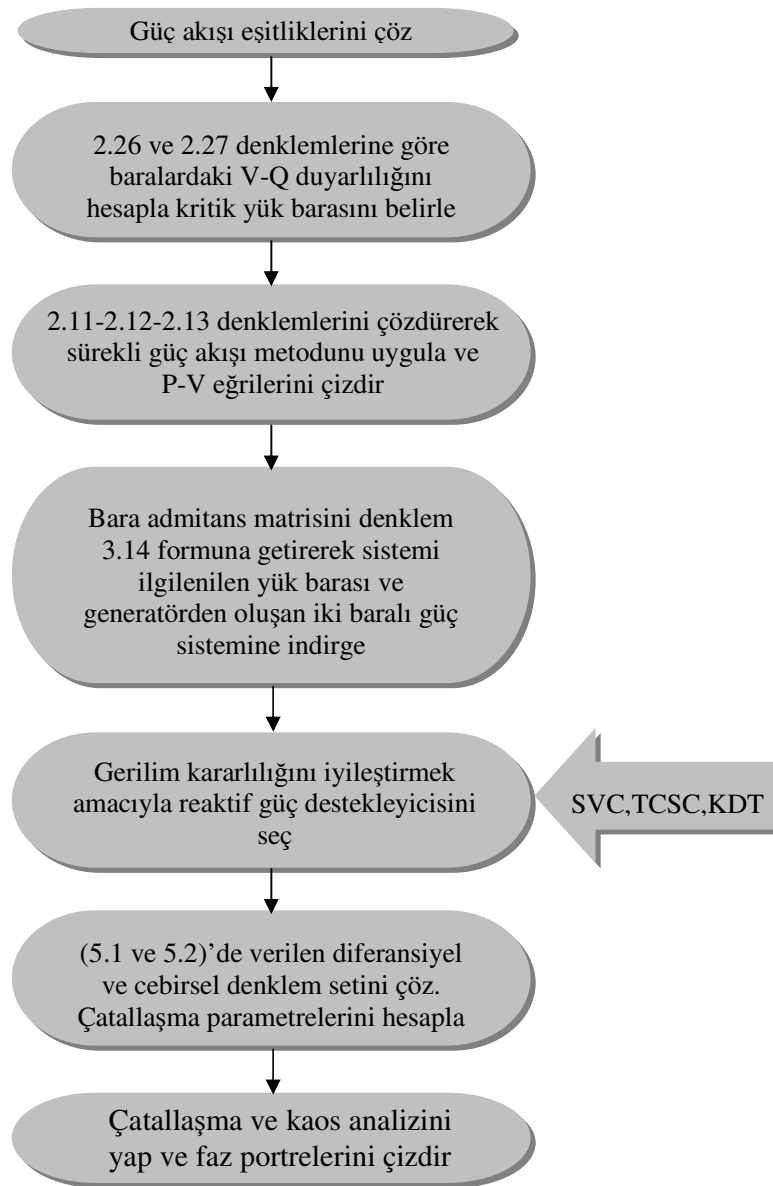
Şekil 5.29'da güç sisteminin aynı yüklenme değerinde fakat değişen ilk koşullarda $\delta_1(0) = 0^\circ$, $\delta_2(0) = 0.05^\circ$ ve $\delta_3(0) = 0.1^\circ$ olmak üzere sistemin durum uzayında davranışı incelenerek V- δ yörüngelerinin değişimleri gözlemlenmiştir.



Şekil 5.29. (δ) açısının üç farklı başlangıç değeri için faz portreleri

5.4. N Baralı Güç Sistemlerinde Çatallaşma ve Kaos Analizi

Şu ana kadar yapılan çalışmalarda iki baralı basit bir güç sistemi incelenmiştir. Ancak, gerek bir ülke içinde gerekse ülkeler arasında iletim sistemleri yaygın olarak enterkonnekte yapıda olduğundan, iki baralı sisteme dayalı temel çalışmaların N baralı sisteme yayılması gerekir. Çalışmanın bu bölümünde 9 baralı 3 makinalı WSCC [92] sistemi ele alınıp analiz edilecektir. Bu sisteme ait veriler EK C.2’de verilmiştir. Analizin gerçekleştirilmesi ile ilgili akış şeması aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.30. N baralı güç sisteminde çatallaşma ve kaos analizi için akış şeması

Şekil 5.30’da verilen akış şemasına göre 9 baralı WSCC sistemi için gerilim kararlılığı açısından kritik yük baraları için çatallaşma ve kaos analizi gerçekleştirilmiştir. Bu sistem için güç akışı hesaplamaları sonucunda elde edilen değerler Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. 9 baralı (WSCC) sisteminin güç akışı sonunda bara gerilim ve açı değerleri (SVC yok)

Bara no	Bara tipi	V (pu)	δ (der)	Bara güç değerleri	
				P(MW)	Q(MVar)
1	salınım	1.0400	0.0	71.641	27.045
2	PV	1.0250	9.280	163.00	6.6536
3	PV	1.0250	4.664	85.00	-10.8597
4	PQ	1.0258	-2.216	0.00	0.00
5	PQ	0.9956	-3.988	-126.01	-50.44
6	PQ	1.0127	-3.6875	-87.76	-29.25
7	PQ	1.0258	3.7197	0.00	0.00
8	PQ	1.0159	0.7275	-96.9	-33.91
9	PQ	1.0324	1.9667	0.00	0.00

5.4.1 Duyarlılık analizi

Burada yapılan hesaplamalar Bölüm 2.5’de anlatılan matematiksel teori ve metodlara dayalıdır. Buna göre 9 baralı güç sistemimizin normal çalışma koşullarında elde edilen güç akışı sonuçlarına göre V-Q duyarlılığında kullanılan J_R^{-1} matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$J_R^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0431 & 0.0341 & 0.0325 & 0.0098 & 0.0097 & 0.0089 \\ 0.0333 & 0.0907 & 0.0265 & 0.0230 & 0.0183 & 0.0105 \\ 0.0325 & 0.0270 & 0.0910 & 0.0109 & 0.0157 & 0.0213 \\ 0.0093 & 0.0225 & 0.0104 & 0.0434 & 0.0309 & 0.0112 \\ 0.0093 & 0.0180 & 0.0152 & 0.0310 & 0.0715 & 0.0243 \\ 0.0086 & 0.0103 & 0.0208 & 0.0114 & 0.0246 & 0.0410 \end{bmatrix}$$

Burada görüldüğü gibi J_R^{-1} 'in köşegen elemanları büyükten küçüğe doğru sıralanırsa V-Q duyarlılığı en fazla olan baranın 6 numaralı bara olduğu (0.0910) olduğu görülür. Tablo 5.2' de köşegen elemanlarının sıralanmış hali görülmektedir.

Tablo 5.2. V-Q duyarlılık matrisi J_R^{-1} 'in köşegen elemanlarına göre elde edilen sıralama

Sıra No	Bara	J_R^{-1} 'in köşegen değeri
1	6	0.0910
2	5	0.0907
3	8	0.0715
4	7	0.0434
5	4	0.0431
6	9	0.0410

5 ve 6 numaralı baraların V-Q duyarlılık indis değerleri birbirine eşit denebilecek kadar yakındır. Bu nedenle gerilim kararlılığı açısından 5 numaralı bara kritik bara olarak seçilmiştir. 5 numaralı bara geriliminin değeri Tablo 5.1' den görüldüğü gibi 1.pu ten az olduğu için çalışmanın bu bölümünde 5 numaralı baranın gerilimini 1.p.u'e yükseltmek amacıyla buraya 4.8 MVar'lık bir SVC tesis edilecektir. Bu durumda elde edilen güç akışı sonuçları Tablo 5.3'de verilmiştir.

Bu tablodan 5 numaralı bara gerilimi SVC ilave edilmesi durumunda 1.0 p.u değerine yükselmiştir. Daha yüksek reaktif güç desteklemesi sonucunda bu gerilim değerinin daha da artacağı mümkündür.

Tablo 5.3. Dokuz Baralı WSCC sisteminin güç akışı sonunda bara gerilim ve açı değerleri (SVC var)

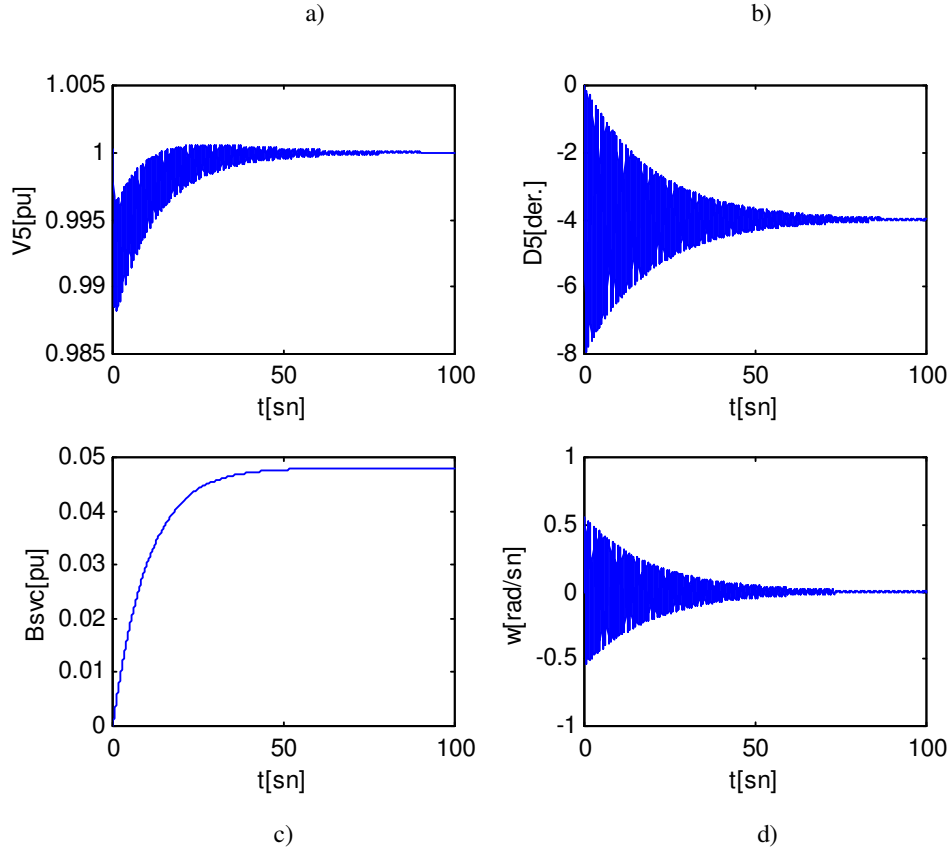
Bara no	Bara tipi	V (pu)	δ (der)	Bara güç değerleri	
				P(MW)	Q(MVar)
1	salınım	1.0400	0.0	71.605	24.103
2	PV	1.0250	9.272	163.00	4.8784
3	PV	1.0250	4.672	85.00	-11.7189
4	PQ	1.0274	-2.212	0.00	0.00
5	PQ	1.0000	-3.988	-125.01	-45.20
6	PQ	1.0139	-3.6762	-87.54	-29.18
7	PQ	1.0268	3.7176	0.00	0.00
8	PQ	1.0167	0.7338	-96.73	-33.86
9	PQ	1.0328	1.9754	0.00	0.00

5.4.2. Bara indirgeme yöntemi

Sayısal simülasyonlar ve analizler Bölüm 3.4 ve Bölüm 3.4.1’de anlatılan esaslara dayanmaktadır. Güç akışı sonucunda elde edilen sonuçlara göre bara indirgeme yöntemi kullanılarak sistem 1 ve 5 numaralı baralardan oluşan iki baralı basit güç sistemine dönüştürülmüştür. Bu durumda elde edilen $Y_{bus_{red}}$ aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$Y_{bus_{red}} = \begin{bmatrix} 0.6649 - j7.5136 & -0.5304 + j7.5640 \\ -0.5304 + j7.5640 & -0.1526 - j7.3574 \end{bmatrix}$$

Buradan bu iki kapılı sistemin pi eşdeğer parametreleri de $\dot{A} = 0.9665 - j.0879$, $\dot{B} = 0.0092 + j0.1316$, $\dot{C} = -0.5486 + j0.2436$, $\dot{D} = 0.9946 + j0.0182$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.31 1.25 +j0.5 p.u yükte kararlı kalan sistemin zamanla a)gerilim(V_2) b)açı(δ_2) c)SVC suseptansı(B_{SVC}) d) generatörün açısal frekansı (w) değişimleri

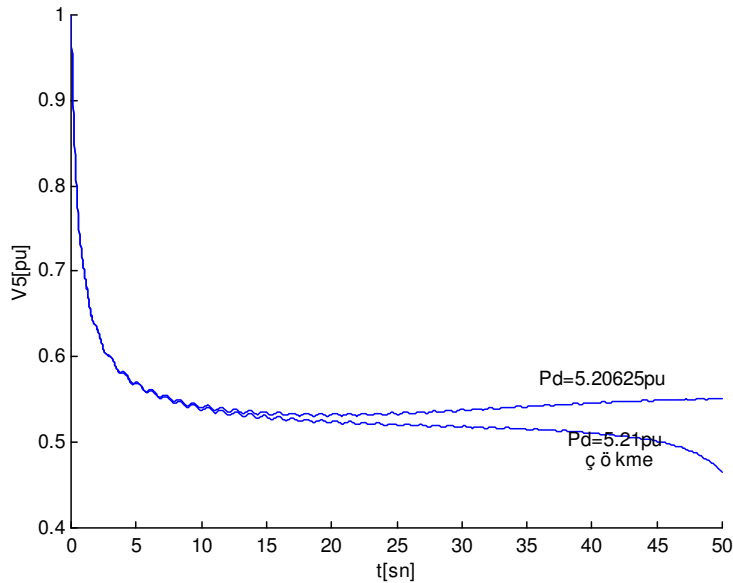
Şekil 5.31’de sistemin kararlı çalışma noktaları için 5.baradaki gerilim ve açının değişimleri görülebilir. Sistemin nominal çalışma şartlarında 4.8 Mvar’lık SVC’ nin sağladığı reaktif güç desteği sayesinde V_5 geriliminin 1.00 p.u’ye yükseldiği görülmektedir. (Şekil 5.30a)’da Sistemin bu çalışma şartlarında kararlı bir davranış gösterdiği açıkça görülmektedir. Nitekim yük açısı bir denge noktasına çekilmekte (Şekil 5.31b) aynı zamanda generatörün açısal hızıda sürekli halde senronizma da kalmaktadır(Şekil 5.31d) Şekil 5.31c’de SVC’nin suseptans değerinin zamanla değişimi görülmektedir. Bulunan sonuçlar güç sisteminin güç akışı sonucunda bulunan ve Tablo 5.3’de verilen değerlerle benzerlik göstermektedir.

5.4.3 Hopf ve Eyer-düğüm çatallaşması

Bu bölümde P_d bir çatallaşma parametresi olarak alınmış ve eşitlik (5.3-5.4-5.5 ve 5.7) kullanılarak kararlılık ve çatallaşma analizi yapılmıştır. Dengeli çalışma anında

Jacobian matrisi sanal kısımda bulunan iki özdeğere sahiptir. Bölüm 2.6.3’de anlatılan teori esaslarına göre Hopf çatallaşmasının varlığından sözedilebilir. Sistemin özdeğerleri $\{ -0.041825 \pm j7.93505, -3.391173, -0.10000 \}$ şeklindedir. Burada iki adet karmaşık eşlenik özdeğerler bulunmakta ayrıca diğer özdeğerlerin imajiner kısımlarının olmadığı söylenebilir. Sistemin limit noktalarına ait değerler $f(x^*) = [w^*; \delta^*; V^*; B_{svc}^*; P_d^*]^T$ durum değişkenleri vektörünü göstermek üzere $[-0.0000 ; -0.0695484 ; 0.534193; 0.047999; 5.213386]^T$ olarak elde edilmiştir. $P_d^{SVCmax} = 5.213386$ p.u.’de , bir eyer-düğüm çatallaşması meydana gelmektedir. Burada Jacobian sıfır bir özdeğere sahiptir.

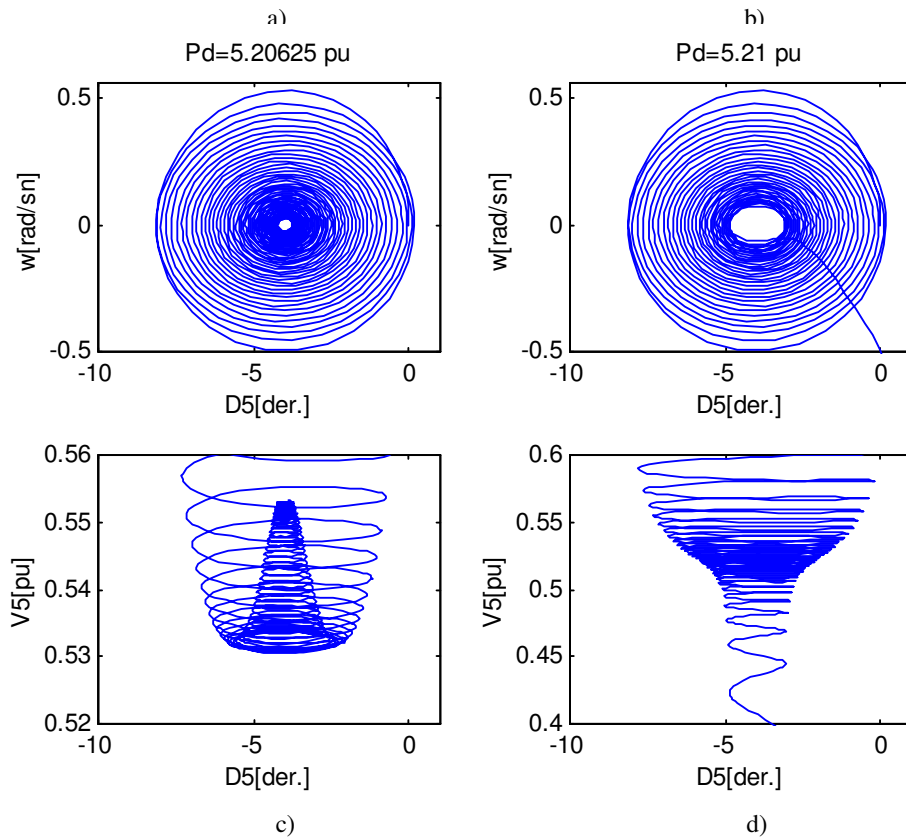
Yapılan çalışmanın bu bölümünde sistemi çökmeye götüren yüklenme noktası civarında yüklendiğini farzedelim. Bunun için iki çalışma noktası belirleyelim. Bunlardan ilki sistemin sürekli halde $\lambda=4.165$ yük artımı ile yani $P_d^1 = 5.20625$ p.u değerinde ve $\lambda=4.168$ ile yani $P_d^2 = 5.21$ p.u değerinde yüklendiğini varsayalım. Bu durumda $P_d^1 < P_d^{SVCmax}$ olduğundan sistem kararlı bir davranış gösterecektir. İkinci çalışma noktasında ise $P_d^2 \leq P_d^{SVCmax}$ olduğundan sistem kararsız bir davranış gösterecektir. Bu durumları izlemek amacıyla Şekil 5.32 çizdirilmiştir. Her iki çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimi görülmektedir.



Şekil 5.32. Kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimi

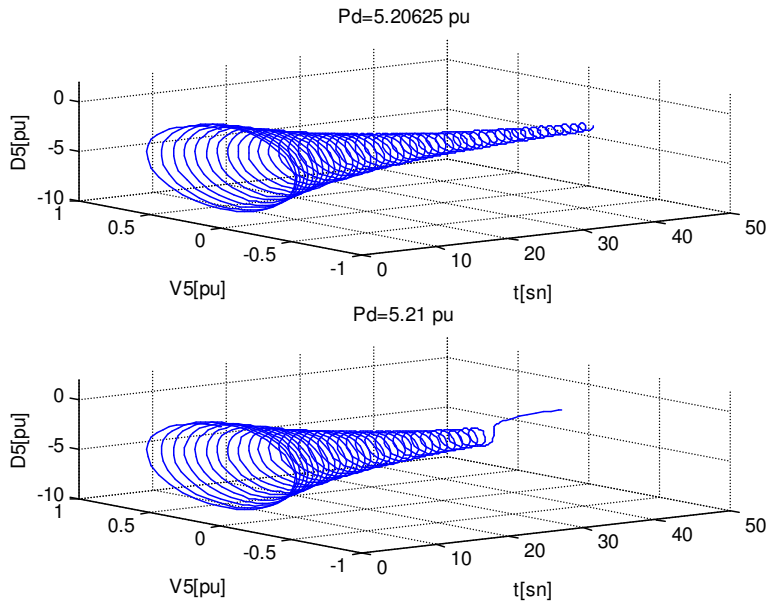
5.4.4. Güç sisteminin durum uzayında davranışı

Faz uzayında kritik nokta civarında $P_d^1 = 5.20625$ p.u ve $P_d^2 = 5.21$ olmak üzere iki çalışma noktası belirleyelim. Bu durumda $P_d^1 < P_d^{SVCmax}$ olduğundan sistem kararlı bir davranış gösterecektir. İkinci çalışma noktası durumunda $P_d^2 \leq P_d^{SVCmax}$ olacağından sistem çatalanma noktasına doğru periodik olmayan salınımlar yaparak durum uzayında davranış sergileyecektir. Sistemin bu çalışma şartlarında durum uzayındaki davranışları Şekil 5.33'de çizdirilmiştir. Şekil 5.33c'de sistemin yüklenme değeri $P_d^1 < P_d^{SVCmax}$ olduğundan sistemin bir denge noktasına doğru ilerlediği açı ve gerilim oklarından anlaşılmaktadır. Şekil 5.33d'de ise sistemin yüklenme değeri $P_d^2 \leq P_d^{SVCmax}$ olduğunda bu durum, sistemi önce kaosa sürükleyecek ve ardından gerilim çökmesi tetiklenecektir. Dikkat edilirse gerilim yüksek bir değerden aşağıya inmekte ve denge noktasından hızla uzaklaşmaya başlamaktadır. Aynı durum açı oku içinde söylenebilir.



Şekil 5.33. SVC'li sistem için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri a) $(w) - (\delta_5)$ b) $(w) - (\delta_5)$ c) $(V_5) - (\delta_5)$ d) $(V_5) - (\delta_5)$

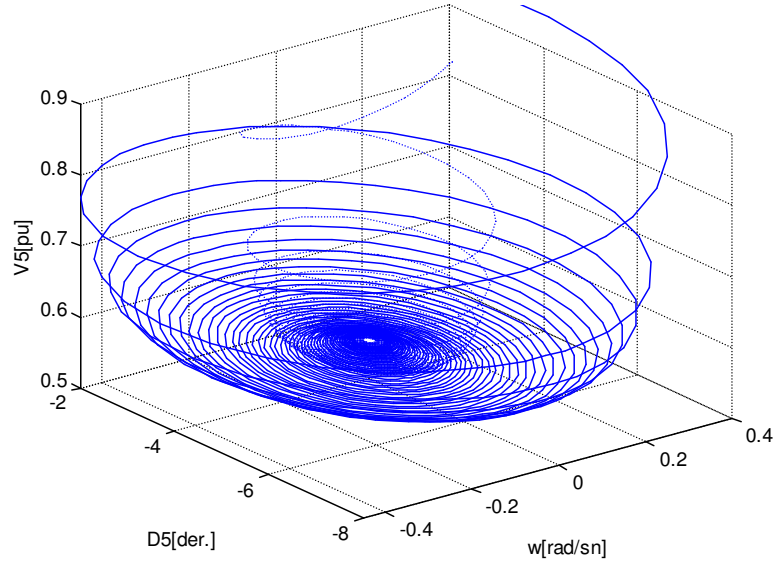
Şekil 5.34’de $P_d^1 = 5.20625$ pu ve $P_d^2 = 5.21$ pu olmak üzere iki farklı yüklenme değeri için 3 boyutlu durum uzayındaki yörüngelerin davranışı görülmektedir. Burada $P_d^1 = 5.20625$ pu için yörüngeler çekici(kararlı) (Şekil 5.34 üstte) , $P_d^2 = 5.21$ pu için yörüngeler itici(kararsız) (Şekil 5.34 altta) davranış göstererek durum uzayında germeye sebebiyet vermektedirler.



Şekil 5.34. Kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri (üstte kararlı,altta kararsızlık görülmekte)

Kaotik sistemlerin başlangıç şartlarına hassas bağımlı kaldıkları gerçeğinden hareketle başlangıç şartlarındaki küçük değişimlerin sistemde meydana getireceği etkileri gözlemlemek amacıyla çalışmanın bu bölümünde güç sisteminin değişen ilk koşullarda aynı yüklenme değerinde değişimler gözlemlenerek nonlineer dinamik güç sisteminin analizi yapılmıştır.

Şekil 5.35’de (δ) açısının $\delta_1(0) = 0^0, \delta_2(0) = 0.1^0$ olmak üzere iki farklı başlangıç değeri seçilerek sistemin V- δ -w yörüngelerinin 3 boyutlu durum uzayında açıldaki ufak değişimler neticesinde nasıl etkilendikleri görülebilir.



Şekil 5.35 (δ) açısının farklı iki başlangıç değerinde 3 boyutlu durum uzayı

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE KATKILAR

Günümüzün hızlı teknolojik gelişmelerine paralel olarak elektrik enerjisine olan talep de aynı ölçüde artmaktadır. Sürekli yük artımı ile birlikte ekonomik ve çevresel baskılar güç sistemlerini kararlılık limitine yakın noktalarda çalışmaya zorladığından kararlılık sınırları azalmaya ve gerilim kararlılığı kritik bir konu olmaya başlamıştır. Bu açıdan bakıldığında gerilim kararlılığı bir enerji sisteminin yük baralarının gerilimlerinin genliklerini, gerek sürekli halde gerekse geçici olaylar esnasında, belirli işletme limitleri içerisinde tutabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Dünyanın çeşitli ülkelerinde enerji sistemlerinde son yıllarda meydana gelen çeşitli olaylardan sonra gerilim kararlığına artan bir ilgi duyulmaya başlanmıştır .

Güç sistemlerinin giderek daha da ağırlaşan çalışma şartlarında gerilimin kontrol edilmesi ve güç akışının düzenlenmesi amacıyla kademe değiştirici ve faz kaydırıcı transformatörler gibi mekanik anahtarlama cihazlarına ilave olarak FACTS cihazları adı verilen SVC ve TCSC gibi şönt ve seri kompanzatorler geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında yukarıda adı geçen elemanların sürekli hal ve dinamik modelleri oluşturularak ağır yüklenme şartlarında çalışan güç sistemlerinin gerilim kararlığı analizleri statik ve dinamik yaklaşımlarla elde edilmiştir.

Gerilim kararlılığının iyileştirilmesi amacıyla statik gerilim kararlılığı analizlerinin yapıldığı 4.Bölümde 5 baralı 2 makinalı Stag-El Abiad sistemi analiz edilerek güç akışı hesaplamaları ile yük baralarına ait P-V eğrileri ve kritik noktalar tayin edilmiştir. Güç sistemlerinde sistemin yüklenebilirlik sınırlarının belirlenmesi , kararlılık çalışmalarında oldukça önemlidir. P-V eğrilerinin elde edilmesi ve kritik değerlerin bulunması sistem yükünün sonlu adımlarla artırılması neticesinde elde edilmiştir. Sürekli güç akışı metodu sistemin P-V eğrilerinin elde edilmesi ve kritik noktaların tayininde kullanılan en yaygın ve en elverişli bir yöntemdir. Tezin 2.Bölümünde bu yöntemle ilgili kısa ve açıklayıcı bir bilgi verilerek basit bir güç

sisteminde son derece basit bir anlatım tarzıyla bir örnek yapılmış ardından N baralı sistemlere uygulaması gerçekleştirilmiştir. Buna ilave olarak kritik noktaların tayin edilmesinde son yıllarda oldukça geniş uygulama imkanı bulan eyer noktası çatalaşma analizi hakkında gerekli teorik bilgiler verilerek basit bir güç sisteminde açıklayıcı bir örnekle uygulaması yapılmıştır. Kritik noktaların tayin edilmesinde son derece güvenilir ve başarılı sonuçlar elde edilerek sürekli güç akışı metodu ile de bulunan sonuçların uygunluğu gösterilmiştir (Şekil 2.8).

Bu tezde N baralı sistem incelemeleri için yük akışı analizlerinde seçilen salınım baralarının, sistemin yüklenmesi durumunda, kritik noktalarda ne tür değişimler yapacağı da incelenmiştir. KDT, FKT , SVC ve TCSC tesis edilen sistemlerde seçilen salınım baralarının, sistemin yüklenmesi durumunda, kritik noktalarda ne tür değişimler yapacağı gösterilmiştir . Elde edilen sonuçlar, ilgilenilen yük barasına ait P-V eğrileri çizdirilerek gösterilmiştir. Bu eğrilere bakılarak bu cihazların kritik noktalara etkileri açıkça izlenebilir. Yapılan analizler neticesinde gerilim kararlılığını iyileştirici etkileri karşılaştırmalı olarak verilmiş , ayrıca istenilen düzeyde aktif güç akışını sağlamadaki başarılar gösterilmiştir (Şekil 2.17-18). Farklı salınım baraları seçilmesi durumlarında kritik güçlerdeki değişim miktarları salınım barası ile bu elemanların bağlandığı hat bağlantıları ile yakın bir ilişki içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu elemanlara yakın baraların salınım barası seçilmesi durumlarında bu baralardaki rotor açılarındaki değişim dar bir aralıkta kalmasına rağmen, bu elemanların daha uzağındaki baraların salınım barası seçilmesi durumunda açı değerleri giderek küçülmektedir. Özellikle açı kararlılığı alanındaki (P- δ) ilişkisinin ön plana çıktığı sistemlerde bu noktaya dikkat edilmesi, diğer yandan gerilim kararlılığı analizlerinde kritik noktaların tayininde, seçilecek salınım barası etkilerinin de göze alınması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır (Şekil 4.12).

Güç sistemleri dinamik bir yapıya sahip olduklarından kontrol mekanizmalarının güvenilirliği, hassasiyeti ve hızının istenilen düzeyde olması arzulanır. Tezin 5.Bölümünde çatalaşma analizi ile dinamik gerilim kararlılığı analizleri yapılmıştır. Son yıllardaki büyük kapasiteli elektrik güç sistemlerinin devre dışı kalmaları, (sistem çökmeleri) bozuculara karşı sistemin verdiği dinamik cevap nedeniyle

oluşmuştur. Bu durumdaki bir güç sistemi için oluşan sistem kararsızlıklarından birisi de gerilim çökmesi olayıdır. Tezin bu bölümünde , elektrik güç sistemlerindeki gerilim çökmesi analizi kaotik yaklaşımlar açısından ele alınmıştır. Öncelikle basit bir güç sisteminin matematiksel modeli kurularak gerilim kararlılığı analizi yapılmıştır. Ardından SVC ,TCSC ve KDT gibi gerilim kararlılığını iyileştirici elemanların dinamik modelleri elde edilerek her bir eleman için güç sistem modelleri oluşturulmuştur. Elde edilen modeller ile güç sisteminin çatallaşma ve kaotik analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.7-8-14-15-23).Bulunan sonuçlar verilen teori detaylarıyla ilişkilendirilmiş ve uygunluğu gösterilmiştir.

Çalışmada kullanılan güç sistem modeli tarafından öngörülen gerilim çökmesi, sayısal integrasyon ile çözülmüştür. Elde edilen dinamik modeller ile başlangıçta yavaşça daha sonraları hızlıca azalan gerilimli bir gerilim çökmesi sayısal olarak hesaplanarak gerilimin zamanla değişimleri gözlemlenmiştir.

Simülasyon sonuçları yavaşça artan reaktif güç ihtiyacının bir gerilim çökmesine neden olacağını göstermiştir. Ele alınan basit elektrik güç sistemi, dinamik bir yükün ya da bir sistemin aşırı yüklenmesi durumunda nasıl bir gerilim çökmesine sebep olduğunu göstermek için seçilmiştir. Ayrıca yük karakteristiklerinin sistem dinamiğine olan etkileri açıkça bilindiğinden farklı yük karakteristiklerine sahip güç sistemlerinin gerilim kararsızlığı mekanizmasında nasıl bir rol oynadığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.18). Aşırı yüklü bir güç sistemindeki kaotik davranışlar bilgisayar simülasyonları yardımıyla gözlemlenmiştir. Bununla beraber, kaotik sistemlerin başlangıç şartlarına hassas bağımlılığı ve kaotik davranışların gözlemlenmesi büyük bir dikkatle gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.22-29).Bu grup çalışmaya ilave olarak SVC'nin güç sistemlerinde ki kaotik davranışlarının gözlemlenmesi amacıyla , dokuz baralı WSCC sisteminin iki kapılı bir güç sistemine indirgenerek kaotik analizi gerçekleştirilmiştir. Çatallaşma analizi yapılmış, kritik noktalar tayin edilmiştir. Çatallaşma noktasında sağ ve sol sıfır öz vektörler kararsızlığa eğilimli baraların belirlenmesinde kullanılabilir. Bu bilgi SVC'nin sistem içinde nereye yerleştirileceğini ve optimal yerleşim hakkında bilgi vermiştir. Ayrıca $\partial Q/\partial V$ duyarlılık faktörü ile seçilen baralar üzerinde araştırma yapılarak SVC'nin

yerleştirileceği bara diğer gerilim duyarlılık indisleri de kullanılarak belirlenmiş ve burada analizi yapılmıştır (Tablo. 5.1)

Bu tez çalışmasında açıklanan ve geliştirilen tüm teorik çalışmalar ve uygulama sonuçları MATLAB/SIMULINK programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu tezin ana katkıları maddeler halinde aşağıda özetlenmeye çalışılmıştır.

1. KDT, FKT, SVC ve TCSC'ye ait sürekli hal modellerinin elde edilerek N baralı güç sistemlerinde sürekli güç akışı tekniği ile gerilim kararlılığı analizleri yapılabilirliği ayrıca farklı salınım barası seçilmesi durumlarında kararlılık sınırlarındaki değişimlerin sistemin ileriye yönelik planlama ve kontrol çalışmalarında dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır.
2. Gerilim kararlılığını iyileştirmek amacıyla SVC, TCSC ve KDT kullanılan sistemler için önerilen güç sistemi dinamik modelleri ile klasik kontrol metotlarının yanı sıra çatallaşma ve kaotik kontrol stratejilerinin uygulanabilirliğine olanak sağlanmıştır.
3. Basit iki baralı güç sistemlerinin yanı sıra N baralı güç sistemleri için “bara indirgeme yöntemi” uygulanarak çatallaşma ve kaotik analizlerin gerçekleştirilebileceği ve sistemin durum uzayındaki davranışlarının çatallaşma teorisi ile ilişkilendirilebileceği gösterilmiştir.
4. Güç sistemlerinin kompleks ve dinamik yapıları nedeniyle oluşturulan dinamik modellemelerde kullanılan zaman sabitleri ile kaosun başlangıç şartlarına hassas bağımlı olmasından dolayı başlangıç değerlerinin belirlenmesinde hassas modelleme kabullerinin yapılması gerekliliği vurgulanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Reactive Power Reserve Work Group, *Final Report*, Voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology. 1999; p.154.
- [2] TAYLOR Carson W., *Power System Voltage Stability* . EPRI Power System Engineering Series. *McGraw Hill*, 1994.
- [3] YALÇIN, M.A., Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Yeni Bir Yaklaşımla İncelenmesi. Doktora Tezi, *İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi*, İstanbul.
- [4] BALANATHAN R., Techniques to efficiently improve power system voltage stability. Doctor thesis, *The university of Auckland*, New Zealand, December, 1998.
- [4] MANSOUR Y. et all, Suggested techniques for voltage stability analysis. Tech. Rep. IEEE pub. 93TH0620-5-PWR, *IEEE Power Engineering Society*,1993.
- [6] SAADAT H., *Power System Analysis*. *McGraw Hill*, 1999.
- [7] BERGEN A.R., *Power systems analysis*. 4th ed. Chichester, *John Wiley & Sons*, 1998.
- [8] ÇAKIR H., *Elektrik Güç Sistemleri Analizi*. *Nesil Matbaacılık Yayıncılık San. Tic .A.Ş.*, İstanbul, 1986.
- [9] ANDERSSON P. M., *Power system control and stability*. *Marcel Dekker*, New York, 2002.
- [10] IEEE/PES Final Document, “Voltage stability assesment: Concept,practices and Tolls”,Power system stability subcommittee special publication, Product No.SP101PSS, August 2002.
- [11] EPRI Task Force, Voltage stability/ security assesment and on-line control. *Technical report*, TR-101931, EPRI, April, 1993.
- [12] LOF P.A. SMED T., HILL D.J., ANDERSSON G., Fast calculation of a voltage stability index . *IEEE Transactions. On power systems*, Vol.7, No.1, pp.54-64, 1992.

- [13] AJJARAPU V., CHRISTY, C., The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 7, pp. 416-423, Feb. 1992.
- [14] ANDERSSON P.M., FOUAD A.A, Power System Control and Stability. *Wiley Interscience*, USA, 2003.
- [15] ABACI K., YALÇIN M.A., UYAROĞLU Y., Observing chaotic oscillations induced by under load tap changer in power systems. *Journal of Applied science*, Vol.7. No.1, pp. 66-71, January 2007.
- [16] KUNDUR P., BALU J.N., LAUBY G.M., Power system stability and control. *McGraw Hill*, New York, 1994.
- [17] STAGG G.W., EL ABIAD A.H., Computer Methods in Power System Analysis. *McGraw Hill*, 1985.
- [18] LOF P.A., HILL D.J., ARNBORG S., ANDERSSON G., On the analysis of long term voltage stability. *Intl. Journal of Electrical Power & Energy systems* , Vol.15, no.4, pp.229-237, 1993.
- [19] CHEN K. , HUSSEIN A., A Performance-Index Guided Continuation Method for Fast Computation of Saddle-Node Bifurcation in Power Systems. *IEEE Transactions. on power systems*, Vol.18, no.2, pp.753-760, May 2003.
- [20] ZAMBRONI DE SOUZA A.C., Tangent vector applied to voltage collapse and loss sensitivity studies. *Electric Power Systems Research*, Vol.47, pp.65-70, 1998.
- [21] ALVES and et all., Alternative parameters for the continuation power flow method. *Electric Power Systems Research*, Vol.66, pp.105-113, 2003.
- [22] CANIZARES C.A ,ALVARADO F. L., Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems. *IEEE Transactions. on power systems*, Vol..8, no.1, pp.1-8, February 1993.
- [23] MACHOWSKI J., BIALEK J. W. , BUMBY J.R., Power System Dynamics and Stability. *John Wiley & Sons*, England, 1997.
- [24] MAKAROV Y. V., HISKENS I.A., A continuation method approach to finding the closest saddle node bifurcation point. *Proc. NSF/ECC Workshop on Bulk Power System Voltage Phenomena III*, ECC Inc., Davos, August 1994.
- [25] TIRANUCHIT A. et. All, Towards a computationally feasible online voltage instability index. *IEEE Transactions. On power systems*, No.2, pp. 669-675, 1988.

- [26] ARİFOĞLU U., Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi. *Alfa Yayınları*, İstanbul, 2002.
- [27] LUO C. J., LIU C. W., THORP J. S., New methods for computing a Saddle-Node Bifurcation point for Voltage stability analysis. *IEEE Transactions. on power systems*, Vol .10, no.2, pp.905-913, August 1995.
- [28] GAO B., Voltage stability analysis of large power systems. PhD thesis, *University of Toronto*, Kanada, 1992.
- [29] TIRANUCHIT A., THOMAS R.J., A posturing strategy against voltage instabilities in electric power systems. *IEEE Transactions. on power systems*, Vol . PWRS-3, no.1, pp.87-93, 1988.
- [30] STROGATZ S.H, Nonlinear Dynamics and Chaos. *West wiew press*, 2000.
- [31] GARAINGER J. J., STEVENSON W. D. , Power system analysis. *Kluwer Academic Publishers*, Boston, 2001.
- [32] NAYFEH Ali H., BALACHANDRAN B., Applied nonlinear dynamics. *John Wiley & Sons*, 1994.
- [33] SEYDEL R., Practical bifurcation and stability analysis. *Springer-Verlag*, Newyork, 1999.
- [34] UYAROĞLU Y., Elektrik Güç Sistemlerinde Çatallaşma Analizi İle Kaotik Olayların İncelenmesi. Doktora Tezi, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü*, Haziran 2002.
- [35] GLOVER J. D., SARMA M., Power system analysis and design. 2 nd ed. Piscataway, N.J. *IEEE Press*, 2003.
- [36] LEO B. H., LEE K. Y., Dynamic and static Voltage stability enhancement of power systems. *IEEE Transactions. on power systems*, Vol.8, No.3, pp.1159-1171, August 1993.
- [37] ACHA E., FUERTE C. R- E., PEREZ H.- A., CAMACHO C.A., Facts modelling amd simulation in power networks. [Chichester](#), *John Wiley & Sons*, 2004.
- [38] ACHA E., AGELIDIS V. G., LARA O. A., MILLER J. E. , Power electronic control in electrical systems. [Oxford](#), *Newnes*, 2002.
- [39] PADHY N. P., MOAMEN M.A.Abdel, Power flow control and solutions with multiple and multi-type Facts devices. *Electric Power System Research*, 2005.

- [40] WANG Y., Power System Load Modelling. *Preliminary report, prepared for Transpower NZ Ltd, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Auckland*, May 1997.
- [41] ELRAZAZ Z., OHALY AI, Criterion For inductive Compensation Location To Enhance System Steady State stability. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.8,No.4, pp.1545-1549, November 1993.
- [42] SADEK M.Z., MAHMOUD G.A., DESSOUKY M.M, RASHED W.I, Effect of control on compensators rating needed for voltage stability enhancement. *Electric Power Systems Research*, Vol.50, pp.139-145, 1999.
- [43] SADEK M.Z., MAHMOUD G.A., DESSOUKY M.M, RASHED W.I, Enhancement of steady-state voltage stability by static var compensators. *Electric Power Systems Research*, Vol.43, pp.179-185, 1999.
- [44] POPOVIC D. ,HISKENS I.A.,HILL D.J. , Investigation of load tap changer interaction. *Electrical Power Energy Syst.* 18 (2), pp.81–97, 1996.
- [45] CHIOU C.Y., TSANG C. H., KAO W.S., Dynamic Load Modelling in Taipower System Stability Studies. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.10, No.2, pp.907-913, May 1995.
- [46] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, Load Representation for Dynamic Performance Analysis. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.8 No.2, pp.472-481, May 1993.
- [47] TALEB M., AKBABA M., ABDULLAH E.A., Aggregation of Induction Machines for Power System Dynamic Studies. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.9 No.4, pp.2042-2048, November 1994.
- [48] THUKARAM D. et all, 2004, Monitoring the effects of On-Load Tap Changing Transformers on Voltage stability. *International Conference on Power System Technology - POWERCON*, Singapore, pp.21-24.
- [49] DONG F., CHOWDHURY B. H., Impact of Load Tap Changing Transformers on Power Transfer Capability. *Electric Power Components and Systems*, 32: pp.1331–1346, 2004.
- [50] HASANOVIC A., Modeling and control of the UPFC. Master thesis, *Department of computer science and electrical engineering*, Morgantown, West Wirginia, 2000.
- [51] AJJARAPU V., LEE B. ,Bifurcation Theory and Its Application to Nonlinear Dynamical Phenomena an Electrical Power Systems. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.17, No:1, pp.424-431, 1992.

- [52] DOBSON I, CHIANG H-D, Towards a theory of voltage collapse in Electric power Systems. *Systems & Control Letters*, (13), pp. 253-262, North – Holland, 1989.
- [53] KWATNY, H.G, PASRIJA, A. K and BAHAR, L. Y, Static bifurcations in electric power networks: Loss of steady-state stability and voltage collapse. *IEEE Trans. Circuits and Systems*, Vol. 33, No 10, pp. 187-195, February 1986.
- [54] YU Y., JIA H., LI P., Su J., Power system instability and chaos. *Electric Power System Research*, (65), pp.187-195, 2003.
- [55] CHIANG H.D., LIU C.W et all. Chaos in a Simple Power System. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.8, No:4, November, 1993.
- [56] DOBSON I, & LU L., New Methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 8, no.3, pp. 905-913, Aug. 1993.
- [57] CUTSEM T. V. , VOURNAS C., Voltage Stability of Electric Power Systems. *Kluwer Academic Publishers*, 1998.
- [58] HILL, D. J., Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 8, pp.166-176, February 1993.
- [59] XU W., MANSOUR Y., HYDRO B.C., Voltage Stability Analysis Using Generic Dynamic Load Models. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.9, No.1, pp.479-486, February 1994.
- [60] BEGOVIC, M. M., PHADGE, A. G., Dynamic simulation of voltage collapse. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.5, no.1, pp.198-203, February 1990.
- [61] SEYDEL R., Assesing Voltage Colapse. *Latin American Applied Research*, Vol.31.(3), pp.171-176, 2001.
- [62] JHING Z., XU D.,CHANG Y., CHEN L., Bifurcations, chaos, and system collapse in a three node power system. *Electric Power and Energy Systems*, (25), pp.443-461, 2003.
- [63] AYASUN S., Tekil Noktaların Güç sistemlerin Dinamiğine olan Etkileri. *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10.Ulusal Kongresi*, Sayfa 28-31.
- [64] GEIDL M., Implementation of FACTS and economic generation dispatch in an Interactive power flow simulation Platform. Diploma thesis PSL0201, *Power system Laboratory*, ETH, Zurich 2003.

- [65] WANG H.F., Modelling multiple FACTS devices into multi-machine power systems and applications. *Electric Power and Energy Systems*, (25), pp. 227-237, 2003.
- [66] DIZDAREVIC N., Unified power Flow Controller in Alleviation of Voltage Stability Problem. Doctoral Thesis, *University of Zagreb*, Zagreb, 2001.
- [67] MITHULANATHAN N., CANIZARES C. A.,REEVE J., Hopf Bifurcation Control in Power Systems Using Power System Stabilizers and Static Var Compensators. *North American Power Symposium (NAPS)*,San Luis Obispo, California, October 1999.
- [68] LAUFENBERG M. J., PAI M.A.,PADIYAR K.R., Hopf Bifurcation Control in Power Systems with Static Var Compensators. *Electric Power and Energy Systems*, (19), pp.339-347, 1997.
- [69] BAIYAT Samir A.Al, Design of a robust SVC damping Controller Using Nonlinear H_{∞} Technique. *The Arabian Journal for science and Engineering*,Vol.30, No.1B, April 2005.
- [70] UYAROĞLU,Y., YALÇIN, M.A., Elektrik Güç Sistemlerinde Salınım Dinamiklerinin Kaotik Olaylarının incelenmesi. *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, ELECO2002*, Sayfa 60-64, Bursa.
- [71] ROMAN C., ROSEHART W., Complementarity model for load tap changing transformers in stability based OPF problem. *Electric Power Systems Research* (76), pp.592–599, 2006.
- [72] CANIZARES, C. A., On bifurcation, voltage collapse and load modelling. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 10, pp. 512-22, February 1995.
- [73] WEEDY B.M., Electric power Systems. *John Wiley&Sons*, Inc.,3ith edition, 1987.
- [74] VENKATARAMANA A., RAMSHAN C.,J. , Optimal Reactive power Allocation. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.PWRS-2, #1, pp.138-1144, February 1987.
- [75] YILMAZ O. B., Elektrik Enerji sistemlerinde Gerilim Kararlılığı ve kaos Teorisi ile İncelenmesi. Yüksek Lisans tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü* , İstanbul, 2002.
- [76] ELRAZAZ Z., OHALY Al A., Criterion For inductive Compensation Location To Enhance System Steady State stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.8, No.4, pp.1545-1549, November 1993.

- [77] FAUR Z. T., Effects of FACTS devices on Static Voltage Collapse Phenomena. Master's thesis, *University of Waterloo*, Ontario, 1996
- [78] YANG N., LIU Q. ,MCCALLEY J.D., TCSC Controller Design for Damping Interarea Oscillations. . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.13, No.4, pp.1304-1309, November 1998.
- [79] WANG H.F., Selection of Robust Installing Locations and Feedback Signals of FACTS-based Stabilizers in Multi-Machine Power Systems. . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.14 No.2, pp.569-574, May 1999.
- [80] MİTHULANANTHAN N. Hopf Bifurcation Control and Indices for Power System with Interacting Generator and FACTS Controllers. PhD Thesis, *University of Waterloo*, 2002.
- [81] VERMA K.S., SINGH S.N., GUPTA .O.H, Location of unified power flow controller for congestion management. *Electric Power Systems Research*, (58), pp. 89-96, 2000.
- [82] THOMPSON J.M., STEWART H.B., Nonlinear Dynamics and Chaos. *Wiley*, New York, 1998.
- [83] SAVULESCU,S.C, Qualitative Indices for the system Voltage and reactive power control. . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PAS-95, No.4, pp.1413-1421, July/August 1976.
- [84] DIMO P., Nodal Analysis of Power Systems. *Abacus Press*, 1975.
- [85] ZAMBRONI DE SOUZA A. C., New Techniques to Efficiently Determine Proximity to Static Voltage Collapse. Doctor thesis, *University of Waterloo*, Ontario, 1996.
- [86] SINGH S.N., DAVID A.K., Optimal Location of FACTS devices for congestion management. *Electric Power Systems Research*, (58), pp.71-79, 2001.
- [87] AYGİN Z.E., Elektrik Enerji sistemlerinde Genetik algoritma kullanarak Optimizasyona Yeni bir Yaklaşım. Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Ens.*, İstanbul, 2002.
- [88] LORENZ E.N., Deterministic non-periodic flow. *Atmospheric Science*, (20), pp.130-141, 1963.
- [89] ABACI K., YALÇIN M.A., UYAROĞLU Y., GELBERİ H., The Using of Static Var Compensator in Power systems Having Different load Characteristics and improvement Voltage Stability. . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.I , pp.745-750, 26-28 April 2006, Şanlıurfa

- [90] ÇETİNKAYA H.B., ARSOY A.B., ALBOYACI B., Sürekli çalışmada faz kaydırıcı transformatörler., *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar mühendisliği sempozyumu, ELECO'04*, sayfa 41-45, Bursa, 2004.
- [91] XIAO Y., SONG Y.H., SUN Y.Z., Power Flow Control Approach to Power systems with Embedded FACTS Devices. . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.17, No.4, pp. 943-950, November 2002.
- [92] EPRI EL 0484,*Electric Power research Institue..* Power System dynamic Analysis, Phase I,
- [93] VENKATASUBRAMANIAN V., SCHÄTTLER H., ZABORSZKY J., Local bifurcations and feasibility regions in differential-algebraic systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. 40, pp. 1992-2013, December 1995.
- [94] AYASUN S., NWANKPA C.O., KWATNY H.G., Computation of singular and singularity induced bifurcation points of differential-algebraic power system model. *IEEE Transaction . Circuits and Systems*, Vol.51, pp. 1525-1538, August 2004.
- [95] ZHU T. X., TSO S. K., LO K. L. An investigation into the OLTC effects on voltage collapse. . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, no. 2, pp. 515–521, 2000.
- [96] VOURNAS C. D., On the role of LTCs in emergency and preventive voltage stability control. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, New York, NY, January 2002.
- [97] ABACI K.,YALÇIN M.A., UYAROĞLU Y., Güç Sistemlerinde Farklı Salınım Barası Seçiminin Gerilim Kararlılığı Açısından İncelenmesi. *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, ELECO'04*, sayfa 79-83, Bursa, 2004.
- [98] BAĞRIYANIK M., Enerji İletiminde Gerilim Kararlılığı en Uygun Reaktif Güç Desteklemelerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1997.
- [99] ÖZTÜRK B., Gerilim kararlılığını Geliştirmek Amacıyla Kompanzasyon Yapılacak En uygun Baranın Belirlenmesi. Y.Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Ens.*, İstanbul, 1999.
- [100] MANSOUR Y., XU W., ALVARADO F., RINZIN C., SVC Placement Using Critical Modes of Voltage Instability. . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.19. No.2, pp.757-763, May1994.
- [101] TARANTO G.N., PINTO M.V.G et all, Representation of FACTS devices in Power System Economic Dispatch. . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.7, No.2, pp.572-576, 1992.

- [102] CROW M., Computational methods for electric power systems. *CRC Pres LLC*, USA, 2003.
- [103] HINGORANI N.G., GYUGGI L., FACTS. Concepts and Technology of AC Transmission Systems. *IEEE Pres*, 2000.
- [104] LI N., XU Y., CHEN H., FACTS- Based Power Flow Control in Interconnected Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.15, No.1, pp.257-262, February 2000.
- [105] L. Gyugyi, Flexible AC Transmission systems (FACTS). *In Inst. Elect. Eng. power and energy Series 30, Y.H.Song and A.T.Johnsd, Eds.*, London, U.K ,1999, ch.1.
- [106] MATHUR R.M., VARMA R. K., Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems. *John Wiley & Sons*, USA, 2002.
- [107] WANG H.F., SWIFT F.J.,LI M., Selection of Installing Locations and Feedback Signals of FACTS-based Stabilizers in Multimachine Power Systems by Reduced- Order Modal Analysis. *IEEE Proceedings-Generation Transmission Distribution*, No.3, pp. 263-270, 1997.
- [108] RONCO L., PAGOLA F., An Eigenvalue Sensitivity Approach to Location and Controller Design of Controllable Series Capacitors for Damping Power System Oscillations. . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.12 No.4, pp.1660-1666, November 1997.
- [109] GERBEX S., CHEFKAOUI R., Optimal Location of Multi-Type Facts Devices in a Power System by Means of Genetic Algorithms. . *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.16. No.3, pp.537-544, Aug. 2001.
- [110] XIAO Y., SONG Y.H., LIU C.C.,SUN Y.Z., Available Transfer Capability Enhancement Using FACTS Devices. . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.18.No.1, pp.305-312, February 2003.
- [111] ORFANOIANNI T., BACHER R., Steady-State Optimization in Power Systems With Series FACTS Devices. . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.18, No.1,pp.19-26, February 2003.
- [112] CAI L. J., ERLICH I., Optimal Choice and Allocation of FACTS Devices using Genetic Algorithms. 2003.
- [113] SADIKOVIC R. P. , GLAVIC M., Effect of FACTS Devices on Steady State Voltage stability. *Univercity of Tuzla*, Bosnia and Hrzegovina
- [114] CANIZARES, C. A, Calculating Optimal System Parameters to Maximize the Distance to Saddle Node Bifurcations. *IEEE Transactions. on Circuits and Systems-1:Fundamental Theory and Applications*, Vol.45, No.3, pp.225-237, March 1998.

- [115] IEEE Special Stability Controls Working Group, Static Var Compensator models for power flow and dynamic performance simulation. . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.9, No.1, pp.229-239, February 1994.
- [116] SATPATHY P.K., DAS D., Impact of Various Load Models in Power System Bifurcation Analysis. *Electric Power Components and systems*, Taylor&Francis, Inc.EMP 31(7), pp. 653-668, May 2002.
- [117] IEEE Committee Report, Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.10. No.3, pp.1302-1313, August 1995.
- [118] GREENE., S, DOBSON., I., Sensitivity of the Loading margin to Voltage Collapse With Respect to Arbitrary Parameters. . *IEEE Transactions on Power Systems*, WM,278-2, PWRS. 1996.

EKLER

A. Çatallaşma ve Kaos Teorisi

Çatallaşma terimi, dinamik sistemlerde meydana gelen sistem parametrelerindeki en ufak değişimlerin, faz uzaylarındaki yapısal değişimlerine karşılık gelir. Böyle bir değişimde meydana gelen parametre değeri, kritik parametre değeri olarak adlandırılır.

A.1. Yerel çatallaşma

Çatallaşma terimi ilk olarak diferansiyel eşitliklerinin bir gurubu için denge çözümlerinin bölündüğünü tanımlamak için kullanılmıştır. Sadece denge noktalarında oluşan çatallaşmalar, ikiye ayrılmalara, stasyoner yada statik çatallaşma olarak bilinmektedir. Hopf çatallaşması gibi denge ve periyodik çözümleri içeren çatallaşmalarda bulunmaktadır. Doğrusal olmayan diferansiyel denklemler;

$$\dot{x} = f(x, \mu) \quad (\text{Ek A.1})$$

şeklinde verilmektedir. Burada x , $[n \times 1]$ boyutunda durum vektörü, ve μ , $[k \times 1]$ boyutun da parametre vektörüdür. Burada, $x \in \mathbb{R}^n$, $\mu \in \mathbb{R}^k$ burada k herhangi bir pozitif tamsayı olabilir. Burada μ bir skaler sayı olabilmesi için, $k=1$ olmalıdır. Denge çözümleri $f_\mu(x)=0$ eşitliğinin çözümleri tarafından verilmiştir.

Kesin fonksiyon teoremi olarak, μ değişirse, bu denge noktaları $D_x f_\mu$ Jakobiyeni olduğu sürece μ 'nin fonksiyonlarıdır. x 'e bağlı olarak $f_\mu(x)$ 'in türevi sıfır öz değere sahip olmaz. (x, μ) uzayında denge noktalarının bu fonksiyonlarının her birinin grafi, sistemin bir denge noktasının bir koludur. Eğer birkaç denge noktası o noktaya katılırsa verilen bir parametre değeri için, bir denge noktası "stasyoner çatallaşma noktası" olarak adlandırılır.

(x_0, μ_0) gibi bir denge noktasının bir stasyoner çatallaşma noktası olabilmesi için gerekli şart; $D_x f_\mu$ Jakobiyenin bir sıfır öz değere sahip olduğudur. Doğrusal bir koordinat dönüşümünü kullanarak, $D_x f$ blok-diyagonal formda gösterilebilir.

$$D_x f = \begin{pmatrix} A_c & 0 \\ 0 & A_s \end{pmatrix} \quad (\text{Ek A.2})$$

Burada A_c kritik modlara ilişkin jordan blok, A_s is kararlı kalan modları içermektedir. Yukarıdaki (Ek A.1) eşitliği, durum ve parametrelerin $[n+k]$ boyutlu uzayında k boyutlu uzayında k boyutlu denge noktaları çıkışını tanımlamaktadır. μ_0 parametresi değerine uygun bir $x^{(1)}$ denge noktasına karşılık geldiği düşünülürse; bu noktada x 'in tekil olmadığı açısından, f jakobiyen matrisinin

$$\det f_x(x^{(1)}, \mu_0) \neq 0 \quad (\text{Ek A.3})$$

olduğunu varsayalım, kapalı fonksiyon teoremi yardımıyla, bir birim fonksiyonu denklem Ek A.4'de verildiği gibi oluşur.

$$x^* = g^{(1)}(\mu) \quad (\text{Ek A.4})$$

$x^{(1)} = g^{(1)}(\mu_0)$ ile p 'nin bir fonksiyonu olarak denklem (Ek A.1)'in denge noktalarının bir dizisini verir. $f_x(x^{(2)}, \mu_0)$ jakobiyenin tekil olmadığı durumu için, denklem (Ek A.1)'in ikinci bir çözümü kapalı fonksiyon teoremi yardımıyla, aynı μ_0 değeri için, diğer denge noktasının $x^{(2)}$ olduğu düşünülürse,

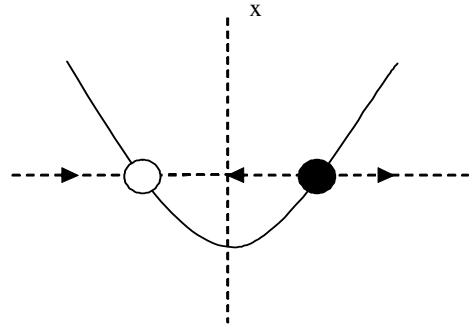
$$x^* = g^{(2)}(\mu) \quad (\text{Ek A.5})$$

şeklinde ikinci bir fonksiyonu elde ederiz. $x^{(2)} = g^{(2)}(\mu_0)$ ile μ 'nin bir fonksiyonu olarak denklem (5.1)'in denge noktalarının bir dizisini verir. Çatallaşma terimi, birbirlerini kesen denge noktalarının, çeşitli kolları kavramından kaynaklanmaktadır. Böyle çatallaşma noktalarından f_x jakobiyen matrisi tekildir ve sonuç olarak kapalı fonksiyon teoremi uygulanamaz.

A.2. Faz düzlemi

Faz düzlemi, sistemin bütün dinamiklerini görmenin en iyi yoludur. Bir eksen olarak dinamiklerin bütün görünüşleri kolaylıkla çizilebilir. Ancak genellikle ihtiyaç duyulan bütün grafikler 2 yada 3 boyutludur. Basit bir fiziksel sistem için, x eksenini pozisyonu diğer eksenini ise x 'in türevi hız göstermektedir. Eğer sistem pendulum örneğinde olduğu gibi ikinci dereceden bir diferansiyel denklem ise, o zaman pendulumun herhangi bir anındaki durumu, tamamen pozisyon ve hız tarafından verilebilir. Bu durum sabit noktaları görmeyi çok kolaylaştırır. Bu sabit noktalar hız sıfır olduğunda eğrinin x eksenini kestiği yerlerdir. Eğri x ekseninin aşağısında olduğu zaman (hız negatif) çekici sola doğru (negatif yöne) hareket eder. Sabit noktanın kararlılığını araştırmak için bu çekicilerin ikisine de bakılıp karar ona göre verilmelidir. Eğer çekiciler her iki dış kenardan sabit noktaya doğru hareket ediyorsa kararlı, sabit noktadan her iki dış kenara doğru hareket ediyorsa kararsızdır denir. (Şekil A.1)'de sistem için tipik bir faz portresi bulunmaktadır.

$$\frac{dx}{dt} = x^2 - 1 \quad (\text{Ek A.6})$$



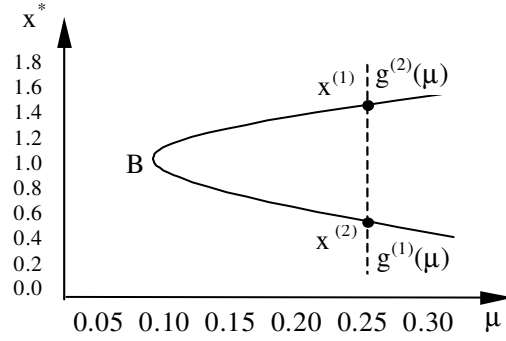
Şekil A.1. Tipik bir faz portresi

Diyagramda x eksenindeki ok yönleri akışın yönünü göstermektedir. Sabit nokta olarak işaretli noktalar akışın sıfır olduğu yerleri göstermektedir. İçi boş nokta kararsız bir sabit noktayı gösterirken, içi dolu nokta kararlı bir sabit noktayı göstermektedir. x 'in türevi y ile yer değiştirerek x 'in basit bir fonksiyonunu verir. Bu fonksiyonu çizme ve çizime bakma, diferansiyel eşitlik çözmeksizin sistemin önemli

özelliklerini gösterir. Yukarıda anlatılanları bir örnek üzerinde göstermeye çalışırsak, bir birinci dereceden sistemi ele alalım.

$$\dot{x} = x^2 - 2x + 1.1 - \mu \quad (\text{Ek A.7})$$

burada μ skaler bir parametredir. Aşağıdaki Şekil A.2'de, (μ, x) durum parametre düzleminde bu sistemin $g^{(1)}(\mu)$ ve $g^{(2)}(\mu)$ denge noktalarının iki kolu görülmektedir. B çatallaşma noktasından iki kol birbirini kesmektedir. ($\mu=0.1$, $x^*=1$) bu noktada ;



Şekil A.2. Çatallaşma noktası

Parametre vektörü μ 'nin küçük bir değişiminde, denklem (Ek A.1) sisteminin yapısı değiştiğinden, bir çatallaşmanın parametre uzayındaki herhangi bir noktada meydana gelebileceği söylenebilir. Meydana gelen bir çatallaşmadaki bir değişikliğin özellikleri Denge noktalarının sayısı, limit döngülerinin sayısı, limit döngülerinin yada denge noktalarının kararlılığı ve Periyodik çözümlerin periyodu olarak belirlenir.

A.3. Çatallaşma teoremleri

Çatallaşmalar, özellikle katastrofik çatallaşmalar, belirli katastrofik olaylarda kesin bir rol oynarlar. Kaos'ta çatallaşmayla çok yakından ilgilidir. Bu yüzden çatallaşma teorisi daha fazla detayla ele alınması gerekir.

Eğer (Ek A.1) eşitliği ile ilgili μ parametresinin bir dizi değerleri için bir $x_0(\mu)$ denge noktasına sahipse, bir aralığın geniş bir bölümü için, bunun bir asimptotiksel olarak, denge noktası olduğu kabul edilir. Böylece (Ek A.1) eşitliği ile modellenen fiziksel sistem için mümkün bir çalışma şartı olarak, denge noktası değerlendirilir. Sistem yüksek bir çalışma temposu altında çalıştığı zaman, μ_c değerinin, bazı parametreleri için kararlılığını kaybetmesi, $x_0(\mu)$ denge noktası için mümkündür. Böyle bir kararlılığın kaybolmasında, doğrusal olmayan (Ek A.1) eşitliği, tipik olarak bir yerel çatallaşma gösterir.

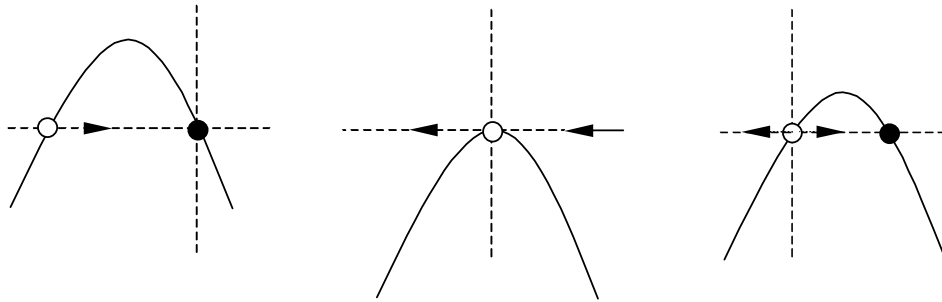
Uygulamalarda, asimptotik kararlı bir denge noktası, stasyonere bir çatallaşma boyunca kararlılığını kaybettiği görülebilir. Fakat denge çözümü kendi kendini devam ettirir. Böyle bir durumda ya Transkritik çatallaşma yada Pitchfork'un çatallaşma olayı meydana gelir. Bu durum aşağıdaki teoremlerle açıklanabilir.

A.3.1. Transkritik çatallaşma

Transkritik çatallaşmanın nasıl oluştuğunu görmek için (Ek A.8)'de verilen bir denklem sistemi ele alalım; Çatallaşmanın bu tipi ;

$$\dot{x} = rx - x^2 \quad (\text{Ek A.8})$$

eşitliği tarafından lokal olarak tanımlanabilir. Yukarıdaki eşitliğin denge noktaları sıfır ve r 'dir. Çatallaşma noktasında, kararlı nokta, kararsız bir noktada kararlı hale geçer.



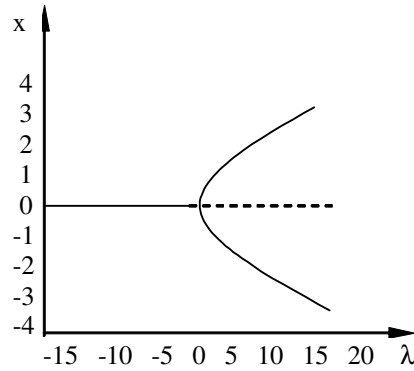
Şekil A.3 $r = -1, r = 0, r = 1$, için üç faz düzlemi çizilmesi

A.3.2. Pitchfork çatallaşması

Pitchfork çatallaşması simetrik bir çatallaşmadır. Bu yüzden sol ve sağ yarı düzlemi arasında simetriye sahip bir çok problem görülmektedir. Pitchfork çatallaşmasının iki çeşidi tanımlanabilir. Birincisi aşağıdaki eşitlik tarafından tanımlanmıştır ve (Şekil A.4)'de görüldüğü gibi, Üst kritik Pitchfork olarak anılır.

$$\dot{x} = \lambda x - x^3 \quad (\text{Ek A.9})$$

Bu eşitlik için denge noktaları $x=0$ ve $\lambda>0$ için $x = \pm\sqrt{\lambda}$ 'dır.

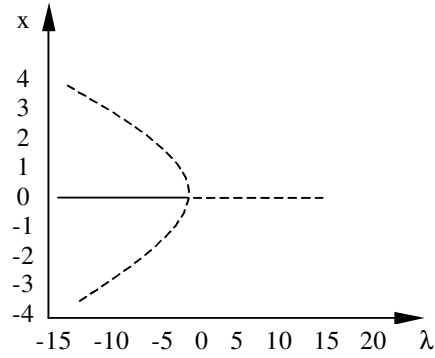


Şekil A.4. Üst kritik Pitchfork diyagramı

Pitchfork çatallaşmasının diğer çeşidi aşağıdaki eşitlik tarafından tanımlanır ve Şekil (A.5)'de görüldüğü gibi, alt kritik Pitchfork çatallaşması olarak isimlendirilir.

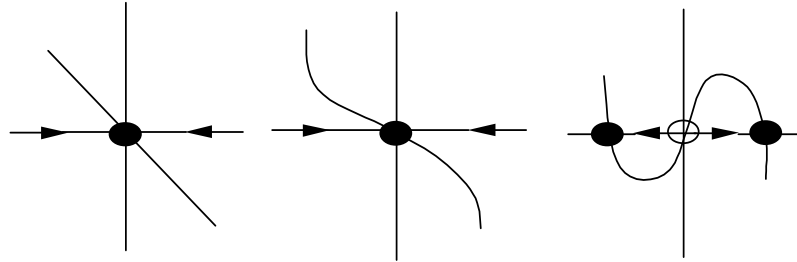
$$\dot{x} = \lambda x + x^3 \quad (\text{Ek A.10})$$

(Ek A.10) eşitliği için denge noktaları, $x = 0$ ve $x = \pm\sqrt{-\lambda}$ 'dır. Bu yüzden elde edilen parabol $\lambda<0$ için oluşmaktadır. $\pm\sqrt{-\lambda}$ tarafından verilen denge noktaları kararsız bir yörünge oluşturmaktadır.



Şekil A.5. Alt kritik Pitchfork çatallaşma diyagramı.

Transkritik ve Pitchfork çatallaşmaları, normal çalışma şartları altında meydana gelmeleri beklenemez.



Şekil A.6. Üst kritik Pitchfork çatallaşması

Üst kritik Pitchfork çatallaşmasında, bir kararlı sabit noktaya ve bir kararsız sabit noktaya çatallaşmaktadır. Bir alt kritik Pitchfork çatallaşmasında bütün kararlı durumlar tersine dönmüştür. Kararsız bir nokta iki kararsız noktaya ve bir kararlı noktaya çatallaşmaktadır.

Eğer (Ek A.1) eşitliğinde, x ve μ 'ün her ikisi yeterli bir şekilde düzgün ise $\mu_c=0$ kritik değerinin yanındaki μ parametresi için $f(0,\mu)=0$ ve f 'in jakobiyeni $A(\mu)=D_x f(0,\mu)$, $\mu_c=0$ kritik parametre değerindeki gibi basit bir $\lambda(\mu)$ öz değeri ortaya çıkmaktadır. $\lambda(0)=0$,

$$\lambda'(0)=\frac{d\lambda}{d\mu} \quad (\text{Ek A.11})$$

ve A_0 'ın bütün geriye kalan öz değerleri, negatif gerçekte bileşene sahiptir. O zaman;

(i) $\varepsilon_0 > 0$ ise;

$$\mu(\varepsilon) = \mu_1\varepsilon + \mu_2\varepsilon^2 + o(\varepsilon^3) \quad (\text{Ek A.12})$$

Eğer $\mu_1 \neq 0$ ise, her bir ε , $\varepsilon \in [-\varepsilon_0, 0) \cup (0, \varepsilon_0]$ için, $x=0$ noktası yakınında $x(\mu)$ gibi önemli bir denge noktası bulunmaktadır. Buna karşın, $\mu_1=0$ ve $\mu_2 > 0$ ise, her bir $\mu \in (0, \varepsilon_0]$ için $x=0$ noktasının yanında $x=\pm(\mu)$ iki denge noktası vardır.

(ii) (i) deki denge noktaları için, $\varepsilon \rightarrow 0$ açısından değerlendirilen jakobiyen, reel bir fonksiyon olarak aşağıdaki gibi verilir;

$$\beta(\varepsilon) = \beta_1\varepsilon + \beta_2\varepsilon^2 + o(\varepsilon^3) \quad (\text{Ek A.13})$$

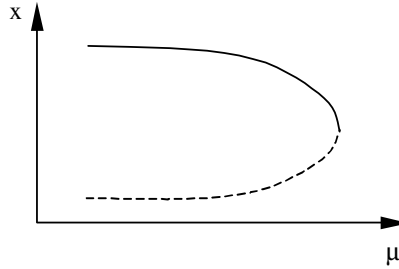
Bu fonksiyonun β_1 katsayısı, $\beta_1 = -\lambda(0)\mu_1$ de uygun olur. Eğer $\beta_1\varepsilon < 0$ ise denge noktası x kararlıdır ve $\beta_1\varepsilon > 0$ ise, kararsızdır. Eğer $\beta_1=0$ ise nominal denge noktası çatallaşmada esnasında kararsızdır. Bu durumda $\beta_2 = -2.\lambda(0)\mu_2$ dir. $\beta_2 < 0$ ise denge noktaları asimptotik kararlıdır. Eğer $\beta_2 > 0$ ise kararsızdır. $x_0(\mu)$ 'nün çatallaşma durumu demek, nominal kararlı denge noktasıyla diğer kararsız denge noktasının üst üste birleşmesi olayıdır.

A.3.3. Eyer noktası çatallaşması

Eyer noktası çatallaşmasının en önemli özellikleri, gözden kayboluşluğu, yerelliği ve (Ek A.1) eşitliğinin herhangi bir kararlı sınırındaki çözümüdür. Şekil A.7 skaler bir durum vektörü için, bir eyer noktası çatallaşmasını açıklamaktadır. Eyer noktası çatallaşması terminolojisi iki yada daha büyük sistemlere genelleştirme yapılarak ele alınır. Eğer noktası çatallaşması üzerinde bir teorem ifade etmek için, (Ek A.1) eşitliği ele alınır. Burada f yeterince uygun ve düzgündür ve $f(0,0)=0$ 'dır. $x=0$, $\mu=0$ civarında $f(x,u)$ ' Taylor serisine açılırsa;

$$F(x,\mu) = Ax + b\mu + Q(x,x) + \dots \quad (\text{Ek A.14})$$

$A=D_x f(0,0)$ matrisi, $\mu=0$ için orijinde f 'in jakobiyen matrisini basitleştirir. Aşağıdaki hipotez, diğer dengeli stasyonere çatallaşmalar kadar, eyer noktası çatallaşmasına da temel olmaktadır.



Şekil A.7. Eyer noktası çatallaşması

Eyer noktası; Jakobiyen A 'nın, basit bir sıfır öz değere sahip olduğu noktadır. Eyer noktası ele alındığında, sıfır öz değere ilişkin A kritik jakobiyen matrisinin sağ kolon öz değer vektörü "r" olarak belirtiliyor, r'nin ilk bileşenini 1'e ayarlayarak r ve l normalize edilir ve ondan sonra $l^T r=1$ için l seçilir.

Bir sonraki hipotez, Eyer noktası ile (Ek A.1) eşitliğinin $\mu=0$ da orijinden bir eyer noktası çatallaşmasına ulaştığını belirtir. Yukarıdaki notasyonları ve kabulleri göz önüne alarak, iki tane eyer noktası ele alınıp, bir $\epsilon_0 > 0$ varsa,

$$\mu(\epsilon) = \mu_2 \epsilon^2 + o(\epsilon^3) \quad (\text{Ek A.15})$$

Böyle durumda $\mu_2 \neq 0$ ve her bir $\epsilon \in (0, \epsilon_0)$ için (Ek A.1) eşitliği, $\mu = \mu(\epsilon)$ için 0'ın yakınında bir $x(\epsilon)$, denge noktasına sahiptir.

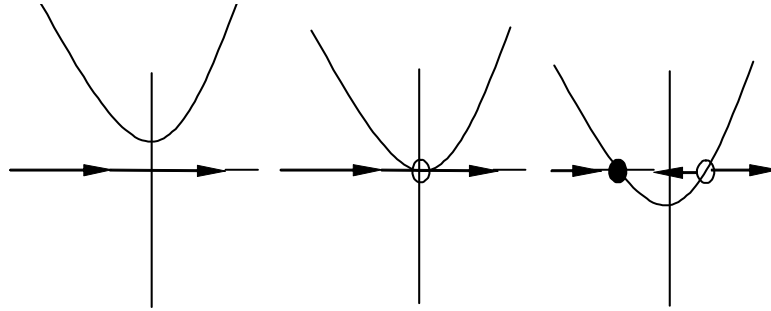
Eğer $x_0(\mu)$ nominal denge noktasının kararsızlığı, kompleks düzlemde sanal eksene geçerek sistem doğrusalizasyonun bir çift özdeğerin sonucu ise; o zaman genel olarak, $x_0(\mu)$ denge noktasından kaynaklanan küçük bir genlikli periyodik yörünge durumu meydana gelecektir. (H_1) $D_x f(0, \mu)$ jakobiyeni $\lambda(\mu) = \alpha(\mu) + iw(\mu)$ ve $\lambda(\mu)$ olmak üzere, bir çift kompleks-eşlenik basit özdeğerlere sahiptir. $\alpha(0) = 0$, $\alpha'(0) \neq 0$,

ve $w_c=w(0)>0$, $(H_2) \pm iw_c$, $D_x f(0,0)$, kritik jakobiyen'in tek saf imajiner özdeğerleridir.

Eyer noktası çatallaşması en basit çatallaşma tipidir. Çatallaşmanın bu tipi, sabit noktaların nasıl ortaya çıktığı ve nasıl ortadan kalktığını göstermektedir. Bir eyer noktası sabit bir noktada sabit olmayan bir sistemle başlayabilir. Bir parametre değiştirildiği zaman çatallaşma noktasında, biri kararlı diğeri kararsız olmak üzere, iki sabit nokta gözükcektir. Eyer noktası çatallaşmasının en basit örneği;

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = r + x^2 = f(x, \lambda) \quad (\text{Ek A.16})$$

eşitliği tarafından verilmektedir. Burada r pozitiften, negatife değişimi göstermektedir. Pozitif r için, bütün akış sağa doğrudur. Sabit noktası yoktur, r sıfıra doğru azalır, yarım kararlı bir sabit nokta gözükcektir. Eğer, r daha da azaltılırsa, bu sabit nokta biri kararlı, diğeri kararsız olmak üzere iki sabit noktaya ayrılır. Bu örnekler için r 'nin değerleri $1, 0, -1$ 'dir.



Şekil A.8. Çeşitli parametre durumları

Eğer noktası çatallaşması şartları;

$$f(x^*, \mu) = 0 \quad (\text{Ek A.17})$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (\text{Ek A.18})$$

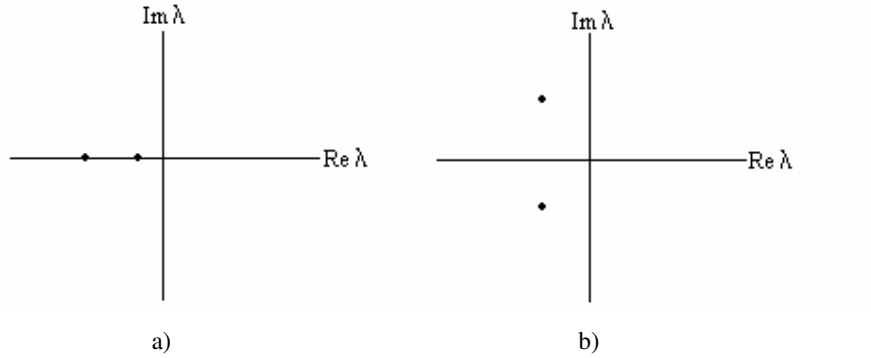
$$\frac{\partial f}{\partial \mu} \neq 0 \quad (\text{Ek A.19})$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{Ek A.20})$$

şeklindedir.

A.3.4. Hopf çatallaşması

Hopf çatallaşması, hiçbir zaman sıfır olmayan hızla reel eksene geçen dinamik jakobiyeinin bir çift imajiner özdeğerleri tarafından tanımlanır. Çatallaşmanın bu tipleri, kompleks düzlemin imajiner ekseninde bulunan (x_0, y_0, λ_0) denge noktası için bir çift kompleks eşlenik özdeğer tarafından karakterize edilmektedir.



Şekil A.9 Hopf Çatallaşması

λ parametresi değiştiği zaman kompleks eşlenik bir çift ya sağa yada sola imajiner eksenden hareket eder. Bu durumda kararlı veya kararsız, sistem salınımlarında denilen limit döngüler gözükecek yada gözden kaybolacaktır. Eğer sabit nokta kararlı ise λ_1 ve λ_2 özdeğerlerinin her ikisinde sol yarı düzlemde olmalıdır ($\text{Re}(\lambda) < 0$). λ 'lar gerçel sayılı kuadratik bir eşitliğin kökleri olduğundan, iki olası resim söz konusudur; ya özdeğerlerin her ikisi de gerçel ve negatiftir (Şekil A.9a) veya birbirinin karmaşık eşleniğidir (Şekil A.9b). Sabit noktayı kararsız yapmak için, özdeğerlerden bir veya ikisinin μ değıştikçe sağ-yarı düzleme geçmesi gerekir.

Bu limit döngülerin kararlılığına bağlı olarak, Hopf çatallaşmaları ya alt kritik yada üst kritik olabilir. Bir Eyer noktası çatallaşmasında kararlı bir denge durumunun çekici bölgesi yaklaşan bir kararsız denge noktası sebebiyle daralır ve kararlılık sonunda ortadan kaybolur. Jakobiyenin sıfır olmadığı bir (x_0, y_0, λ_0) denge noktasında $\dot{x} = f(x, y, \lambda)$ yapısındaki diferansiyel denklemler setini kullanılarak modellenen bir sistem için, Hopf çatallaşmasının şartları aşağıdaki gibidir.

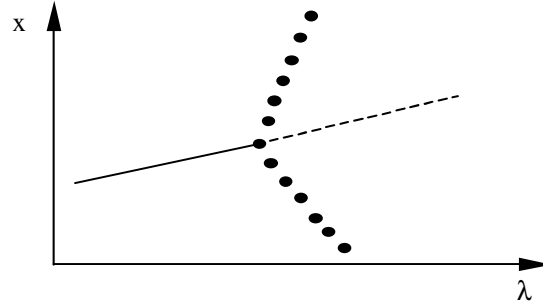
- 1) Jakobiyen basit bir çift sağ imajiner özdeğerlere sahip ve diğer özdeğerlerin hiç birinin reel kısmı sıfır değildir.
- 2) Saf imajiner özdeğerler, sıfır olmayan bir hızla imajiner eksene geçerler.

Bir Hopf çatallaşmasında, bir denge noktasının kararlılığı bir limit döngü hareketleri içinde kaybolur. Bu hareketlerin yapısına bağlı olarak iki tip Hopf çatallaşması vardır. Bunlar Üst kritik ve Alt kritik Hopf çatallaşmalarıdır.

A.3.4.1. Üst kritik hopf çatallaşması

Faz düzleminde, üst kritik Hopf çatallaşması kararlı bir spiralın, küçük, elipse yakın limit çevrimlerle çevrelenmiş kararsız bir spirale dönüşmesi ile olur.

Çatallaşmanın her iki kısmı üzerinde yerel olarak kararlı çözümlere sahiptir. Bu yüzden bir Üst Kritik Hopf çatallaşması, limit çevrim ve durağan kol arasındaki kararlılığın değişimine dahil edilebilmektedir. Kararlı bir limit çevrim çatallaşmada üretilir ve kararlı bir denge noktası, sonunda kararlı limit döngü çekici bölgesinde, artan genlikli salınımlarla kararsız duruma geçmektedir (Şekil A.10).

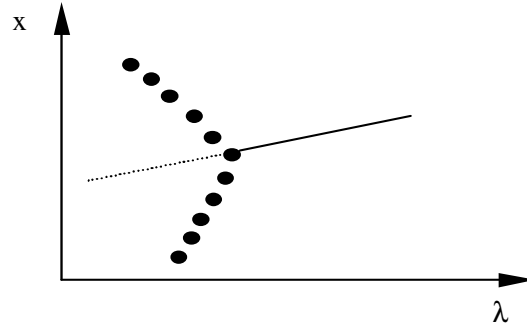


Şekil A.10. Üst kritik Hopf çatallaşması

A.3.4.2. Alt kritik hopf çatallaşması

Çatallaşmadan önce var olan kararsız bir limit döngü daralır ve nihayet çatallaşmada kararlı bir denge noktasıyla birleşerek gözden kaybolur. Çatallaşmadan sonra denge noktası büyüyen salınımlar sebebiyle kararsız olmaktadır.

Alt kritik çatallaşma için, çatallaşma noktasında kararlılığın yerel bir gözden kayboluşu söz konusudur (Şekil A.11).



Şekil A.11. Alt kritik Hopf çatallaşması

(Ek A.1) eşitliği hakkında, f vektör alanının yeterince uygun ve $f(0,\mu)\equiv 0$ olduğu kabul edilip, yukarıdaki (H_1) ve (H_2) verilmiş olsun.

a) Varlık Teoremi: Herbir $\varepsilon \in (0, \varepsilon_0]$ ve $\varepsilon_0 > 0$ için bir $\mu_\varepsilon = \mu_2 \varepsilon^2 + 0(\varepsilon^3)$ fonksiyonu vardır. $\mu = \mu(\varepsilon)$ için $x_0(\mu)$ noktasının yanında (A.1) eşitliğinin $P_\varepsilon(t)$ gibi bir sabit

olmayan periyodik çözümleri bulunmaktadır. $P_\epsilon(t)$ 'nin periyodu $T(\epsilon)=2\pi\omega_c^{-1}[1+T_2\epsilon^2]+O(\epsilon^3)$ gibi uygun bir fonksiyondur ve genliği $O(\epsilon)$ olarak büyür.

b) Birim Teoremi: $\mu_2 \neq 0$ ise her bir $\epsilon \in (0, \epsilon_1]$ için bir $\epsilon_1 \in (0, \epsilon_0]$ vardır. $P_\epsilon(t)$ periyodik yörüngesi $x_0(\mu(\epsilon))$ 'un yakınında bulunan $\mu = \mu(\epsilon)$ için (A.1) eşitliği tek periyodik çözümlüdür.

c) Kararlılık Teoremi: Kesin olarak $P_\epsilon(t)$ 'nin karakteristik üstlerinden biri ϵ sıfıra giderken 0'ra yaklaşır ve $\beta(\epsilon) = \beta_2\epsilon^2 + O(\epsilon^3)$ gerçel ve uygun bir fonksiyon ile verilmiştir. Burada;

$$\beta_2 = -2 \alpha'(0)\mu_2 \quad (\text{Ek A.21})$$

Eğer jakobiyenin bütün özdeğerleri $\pm i\omega_c$ negatif reel kısma sahip ise, o zaman $P_\epsilon(t)$ asimtotik fazda, $\beta(\epsilon) < 0$ olarak asimtotik kararlıdır. Eğer $\beta(\epsilon) > 0$ ise kararsızdır.

A.3.5. Limit çevrimler

Bir limit çevrim kapalı ve yalıtılmış bir gezinge'dir. Burada yalıtılmışın anlamı komşu gezinmelerin kapalı olmadığıdır; komşular ya limit çevrime doğru yada limit çevrimden uzaklaşan spirallerdir (Şekil A.12).

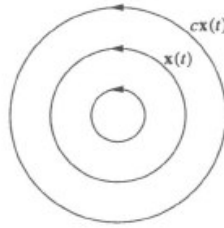


Şekil A.12 Limit çevrim yapıları

Eğer tüm komşu gezinmeler limit çevrime yaklaşırsa, limit çevrimin kapalı ya da çekici olduğu söylenir. Aksi takdirde limit çevrim kararsız, veya olağanüstü durumlarda, yarı kararlıdır. Kararlı limit çevrimler bilimsel olarak çok önemlidir. Bu

çevrimler kendiliğinden sürebilen salınımlar gösteren sistemleri modellemekte kullanılırlar. Diğer bir deyişle, bu sistemler hiç bir dış periyodik zorlama olmaksızın salınırlar. Limit çevrimler öz olarak doğrusal olmayan olgulardır; yani doğrusal sistemlerde gözlenemezler.

Tabii ki $\dot{x} = Ax$ doğrusal sisteminin kapalı yörüngeleri olabilir, fakat bu yörüngeler yalıtılmış olamazlar. Eğer $x(t)$ bu sistemin periyodik bir çözümü ise, $c \neq 0$ olan bir sabit sayı olmak üzere $cx(t)$ 'de aynı sistemin bir çözümü olacaktır. Bu yüzden $x(t)$ tek-parametre kapalı yörünge ailesi ile çevrili olacaktır (Şekil A.13). Bunun sonucu olarak, doğrusal salınının genliği tamamen başlangıç koşulları tarafından belirlenmiş olacaktır; bu genliğin en küçük bozulması sonsuza değin yaşayacaktır. Bunun tersine, limit çevrim salınımları sistemin kendisi tarafından belirlenir.



Şekil A.13. Kapalı yörüngeli limit çevrim

A.4. Kaos teorisi

Kaos Teorisi, nonlinear dinamik sistemlerde aperiodyk kararsız davranışları inceleyen nitel bir çalışmadır. Araştırma konusunun öznesi etrafında oluşturduğu iskelet yapıyı “sistem” olarak tanımlar. 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.

“Tuhaf çekici” olarak ta adlandırılan Kaos’un varlığı liapunov üstellerinin hesaplanmasıyla elde edilmektedir. Bilimdeki temel bir inanış, deterministik sistemlerin önceden belli olmasıdır. Verilen deterministik model, bir başlangıç şartı

ve çalışma altındaki bir sistemi tanımlar ise, sistem davranışı bütün zamanlar için önceden bilinebilir.

Kaos kavramını açıklamak için yararlı olan doğrusal olmayan dinamik sistemlerinin sürekli hal davranışlarını bu kısımda incelenecektir. Zaman sonsuz değerini aldığı anda, bir sistemin sürekli hal davranışının asimptotik davranış sergileyeceği açıktır. Pratikte kararsız süreksiz hal davranışları gözlemlenemeyeceğinden, kararlı sürekli hal davranışları özel bir ilgi çekmektedir. n boyutlu öklid uzayında diferansiyel eşitliklerinin bir kümesi olarak tanımlı genel bir doğrusal olmayan sistem ele alınacaktır.

$$\dot{x} = f(x) \quad (\text{Ek A.22})$$

vektör alanı $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ 'nin C^1 olduğu kabul edilecek, bu da çözümün eşsizlik ve var olmanın yeterli bir şartıdır. Yörünge olarak ta adlandırılan (Ek A.22) denkleminin çözümü $x(t_0) = x_0$ başlangıç şartı altında $x(t) = \phi_t(x_0)$ yazılır. Bu yüzden $\phi_t(x_0)$ bu eşitliği çözer.

$$\dot{\phi}(x_0) = f(\phi_t(x_0)), \quad \phi_{t_0}(x_0) = x_0 \quad (\text{Ek A.23})$$

Buradan itibaren sonra Denge noktaları, Periyodik ve Quasi-periyodik olmak üzere doğrusal olmayan sistemle ilgili üç sürekli hal davranışının çözümleri incelenecektir.

Eğer $f(x) = 0$ ise, bir durum vektörü x , (Ek A.22) eşitliğinin bir denge noktası olarak adlandırılır. Jakobiyen matrisine ait öz değerlerin hepsi negatif gerçekte kısıma sahip ise, denge noktası kararlıdır. Periyodik bir çözümün kararlılığı, bir denge noktasında öz değerlerin bir genelleştirilmesi yapıldığında, kendi karakteristik çarpanları tarafından belirlenir. Yaklaşık periyodik olan bir çözüm, periyodik fonksiyonların bir toplamı olarak sunulabilen bir ifadedir.

$$x(t) = \sum_i h_i(t) \quad (\text{Ek A.24})$$

Burada h_i minimal bir T_i periyoduna sahiptir ve $f_i = \frac{1}{T_i}$ 'dir. Buna ilave olarak aşağıdaki özelliklere sahip f_1, \dots, f_p sonlu bir baz frekans kümesi bulunur. Baz frekans kümesi doğrusal olmayan bir bağımsız kümedir. Her bir i değeri için, $f_i = k_1 f_1 + \dots + k_p f_p$ olur. Tuhaf çekici olarak bilinen kaos, genel olarak, kabul edilen kesin bir matematiksel tanıma sahip değildir.

Genellikle, pratik açıdan kaos olayı, denge noktaları, periyodik çözümler ve quasi periyodik çözümler gibi üç sürekli hal davranışlı kategorilerin içine girmeyen ancak sürekli hal davranışıyla sınırlanmış olarak tanımlanabilir. Denge noktaları sıfır değerinde iken periyodik çözümler tek boyutludur. Tuhaf çekiciler çok daha karmaşıktır ve boyutları da çok ufaktır.

A.4.1 Tuhaf çekiciler

“Tuhaf çekiciler” in ilk ortaya çıkışı Edward Lorenz’ in “Deterministik Aperiodyk Akışkan” adlı çalışmasında görülmüştür [88]. Lorenz sistemi aşağıdaki gibi denklemlerle verilir.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -s x_1 + s x_2 \\ \dot{x}_2 &= -x_1 x_3 + r x_1 - x_2 \\ \dot{x}_3 &= x_1 x_2 - b x_3\end{aligned}\tag{A.25}$$

burada s, r, b pozitif parametrelerdir. Sistemin karakteristikleri, modelin durumunun kesin fiziksel özelliklerine tekabül eden bu parametrelerin değişimiyle değişiklik gösterir. Sistem deterministik ve matematiksel olarak açık ve doğru olmakla birlikte, kapalı form çözüme olanak sağlamaz.

Parametrelerin kesin değerleri için Lorenz sisteminin çözümleri, özel bir tip kararsızlık gösterir. Sistemin ilk başlangıç değerlerindeki $(x_{1_0}, x_{2_0}, x_{3_0})$ küçük bir değişim, örneğin $x_{1_0} + 0.001, x_{2_0}$ ve x_{3_0} halinde çözüm esasen kısa bir süre içinde farklı olacaktır. Kararsızlığın bu şekli “ilk şartlara hassas bağımlılık” adını taşır ve

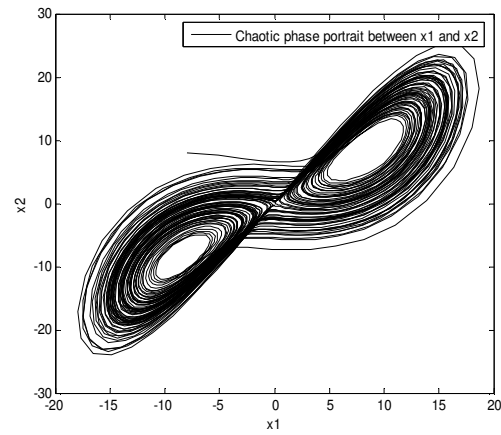
kaotik davranışın ayırt edici bir karakteristiğidir. İlk şartlara hassas bir bağımlılık gösteren bir dinamik sistem birbirine hayli yakın başlangıç koşulları için bariz şekilde birbirinden farklı çözümler oluşturacaktır. Gerçekte, verilen herhangi bir ilk şartlar takımı $(x_{1_0}, x_{2_0}, x_{3_0})$ kendisine yakın, yeterli süre içerisinde kendisinden gerekli bir mesafe iraksayacak başka bir ilk şartlar takımı vardır.

Kaos teorisi' nin gelişine dek sabit nokta, limit çevrimi ve torus olarak sadece üç 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 bunu gerçekleştirmiştir.

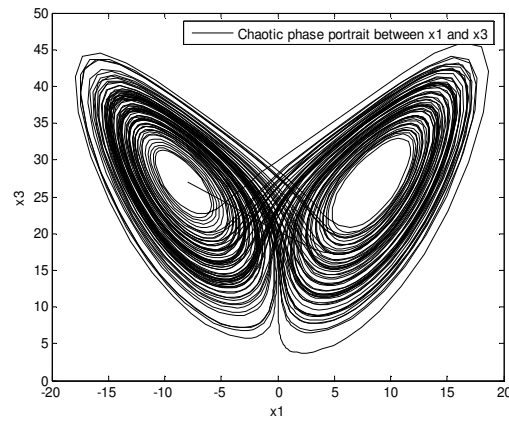
Kaotik sistemlerin başka bir nicel karakterizasyonu, ilk şartlara hassas bağımlılığın derecesini ve böylece de tahmin edilemezliğin derecesini ölçen Lyapunov üstelleri ile verilmiştir. Bir sistem için Lyapunov üstellerinin belirlenmesi, durum uzayında kesin bir nokta etrafında, üstündeki her noktanın 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 boyunca ki deformasyon ve ona dik iki yön boyunca ki deformasyonlara tekabül eden ve Lyapunov üstelleri olarak bilinen 3 sayıyla ifade edilebilir.

Garip yakınsak adlı yeni bir geometrik nesnenin ilk görünümü Şekil A.14'de görüldüğü gibi ortaya koymuştur.

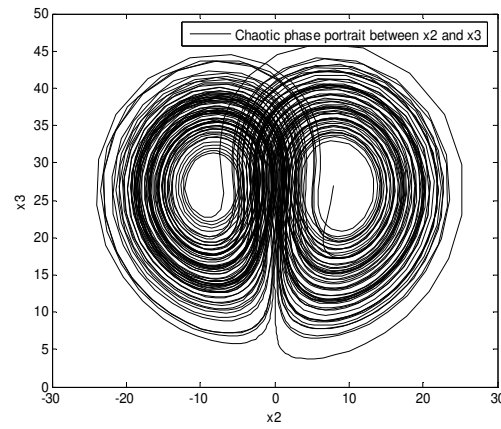
Bir kaotik sistemin temel karakteristiği, başlangıç şartlarına hassas bağımlılığıdır. Verilen iki farklı başlangıç durumu birbirine çok yakındır. Bu iki noktada oluşan yörüngeler üstel olarak artan bir ayırımla birbirlerinden uzaklaşırlar. Liapunov üstelleri, kaotik sistemler için başlangıç durumlarındaki hassas bağımlılığı ölçmek için kullanılır.



a)



b)



c)

Şekil A.14 Lorenz sisteminin garip yakınsakları a), b), c), $s=10$, $r=28$, $b=8/3$, ve başlangıç şartları $X_0=[-8 \ 8 \ 27]$

Eğer kesin bir yöndeki Lyapunov üsteli negatifse, bu yöndeki küçük bir değişim, sistem gelişirken üstel olarak daralacaktır. Eğer üstel 0 ise, ter değişimi kabaca aynı büyüklükte kalır, fakat Lyapunov bileşeni eğer pozitif bir değerse, herhangi küçük bir 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 kılacağıının bir ölçüsünü sağlar. Bir sistemin en büyük Lyapunov üstelinin ölçümü, kaosun ve onun büyüklüğünü nicel hale getirmenin bir yolunun var olma işaretini destekler [75].

Liapunov üstelleri başlangıçta çok ufak ayrımlı yörüngelerin birbirlerinden uzaklaşma oranının ölçülmesinde kullanılır. Liapunov üstelleri bir denge noktasında öz değerlerin ve periyodik bir çözümün karakteristik çarpanlarının bir genelleştirilmesidir. Bunlar yaklaşık periyodik ve kaotik çözümler içeren herhangi bir sürekli hal kararlılığını belirlemek için kullanılır.

Eğer en az bir pozitif değerli liapunov üsteli bulunuyorsa çekici kaotiktir. Liapunov üstellerinin matematiksel tanımını vermeden önce doğrusal olmayan dinamik sistemini anlatmak yararlı olacaktır;

$$\begin{aligned} D_{x_0} \dot{\phi}_t(x_0) &= D_{x_t}(\phi_t(x_0)) D_{x_0} \phi_t(x_0) \\ D_{x_0} \phi_{t_0}(x_0) &= I \\ D_{x_0} \phi_t(x_0) &= \phi_t(x_0) \end{aligned} \quad (\text{Ek A.26})$$

Yukarıdaki eşitlik, eşitlik (Ek A.26)'da yerine yazılırsa;

$$\dot{\phi}_t(x_0) = D_{x_t}(\phi_t(x_0)) \phi_t(x_0) \quad (\text{Ek A.27})$$

elde ediliir. (Ek A.27) eşitliği, $\phi_t(x_0)$ 'la tanımlanan doğrusal, zamanla değişen bir eşitlik olarak adlandırılır.

$i = 1, 2, 3, \dots, n$ olmak üzere $\phi_t(x_0)$ 'ın öz değerleri $m_i(t)$ olsun. Burada, Liapunov üstellerinin kesin bir tanımını yapmak gerekir.

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln(|m_i(t)|) \quad (\text{Ek A.28})$$

Bu açıklamadan, Liapunov üstelleri R^n Faz uzayındaki i . boyutlu işaretin daralmasındaki yada büyümesindeki ortalama oranı sunmaktadır. Örneğin, Liapunov üsteli pozitif ise, o zaman başlangıç şartları arasındaki fark yörünge boyunca özel bir yönde büyüyecektir. Kararlı bir sürekli hal davranış için daralma, genişlemeden fazla olmalıdır. Bu yüzden $\sum_{i=0}^n \lambda_i < 0$ 'dır.

Kaotik bir yörünge için Liapunov üstelleri, en azından bir pozitif λ_i 'ye sahiptir. Bu özellik tuhaf bir çekiciyi, sürekli hal davranışlarının diğer tiplerinden ayırır. Üç ve dört boyutlu sistemlerdeki bir tuhaf çekicinin mümkün olan Liapunov üstellerin tipleri araştırılırsa aşağıdakiler söylenilebilir.

Üç boyutlu bir sistemde, Liapunov üstelleri için tek mümkün durum $(+,0,-)$ tipidir. Bu durumda $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 = 0$, ve $\lambda_3 < 0$, olmaktadır.

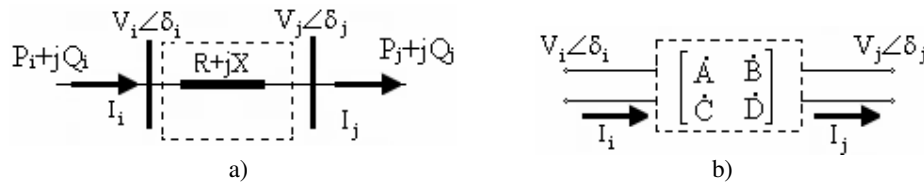
Dört boyutlu bir sistemde, $(+,0,-,-)$ ve $(+,+,0,-)$ olmak üzere iki mümkün durum vardır. $(+,+,0,-)$ durumu hiperkaos olarak adlandırılır. Daha yüksek boyutlu sistemlerdeki Liapunov üstellerinin olası tipleri $\sum_{i=0}^n \lambda_i < 0$ sınırlamasıyla aynı yolla türetilir.

B. İki Kapılı Sistem Modellerinin Elde Edilmesi

Bu bölümde basit iki kapılı güç sistemlerinin pi eşdeğer devre modelleri yardımıyla giriş ve çıkış güç değerleri elde edilmiştir.

B.1. Basit iki kapılı sistem modeli

Şekil B.1'de iki baralı basit bir güç sistemi gösterilmiştir. İletim hattının π eşdeğer devre modeli kullanılarak bu sisteme ait bara aktif ve reaktif güçleri bulunabilir.



Şekil B.1 İki baralı bir iletim hattının a)Elektriksel eşdeğeri b) İletim hattının iki kapılı bir devre olarak gösterilimi

Burada R ve X hattın omik ve endüktif bileşenleri olmak üzere \hat{Z} hattın empedansı , \hat{Y} ' de hattın toplam şont kapasitesini göstermektedir. Şekil B.1'de gösterilen bu sistem için akım ve gerilim bağıntıları matrisel formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_i \\ \hat{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} \\ \hat{C} & \hat{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_j \\ \hat{I}_j \end{bmatrix} \quad (\text{Ek B.1})$$

Denklem (Ek B.1)'den

$$\hat{V}_i = \hat{A} \cdot \hat{V}_j + \hat{B} \cdot \hat{I}_j \quad (\text{Ek B.2})$$

$$\hat{I}_i = \hat{C} \cdot \hat{V}_j + \hat{D} \cdot \hat{I}_j \quad (\text{Ek B.3})$$

eşitlikleri yazılabilir. Burada $\hat{A} = a_1 + ja_2$, $\hat{B} = b_1 + jb_2$, $\hat{C} = c_1 + jc_2$, $\hat{D} = d_1 + jd_2$ şeklinde kompleks ifadeleridir. Şekil B.1b'de verilen devreye kirşofun akımlar ve gerilimler yasası uygulanırsa hat başı ve hat sonu gerilim değerleri arasında

$$\dot{V}_i = \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}\right) \cdot \dot{V}_j + \dot{Z} \cdot \dot{I}_j \quad (\text{Ek B.4})$$

$$\dot{I}_i = \dot{Y}\left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4}\right) \cdot \dot{V}_j + \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}\right) \cdot \dot{I}_j \quad (\text{Ek B.5})$$

bağıntıları vardır. Bu bağıntılar yardımıyla (Ek B.2) ve (Ek B.3) denklemlerinde bulunan, $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$ devre sabitlerini elde edebiliriz. Buna göre $\dot{A} = \dot{D} = \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}\right), \dot{B} = \dot{Z}$ ve $\dot{C} = \dot{Y}\left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4}\right)$ şeklinde elde edilir. Aktif ve reaktif güç değerlerini elde etmek için bilinen güç akışı eşitlikleri uygulanacaktır. Buna göre hat başı ve hat sonu kompleks güçleri sırasıyla \dot{S}_i ve \dot{S}_j olarak gösterilsin.

$$\dot{S}_i = \dot{V}_i \dot{I}_i^* = \dot{V}_i (\dot{C} \cdot \dot{V}_j + \dot{D} \cdot \dot{I}_j)^* \quad (\text{Ek B.6})$$

Burada gerilimler $\dot{V}_i = V_i \angle \delta_i, \dot{V}_j = V_j \angle \delta_j$ şeklinde genlik ve açı değerleri cinsinden gösterilirse bu durumda (B.6) ifadesi aşağıdaki şekli alır.

$$\dot{S}_i = V_i \angle \delta_i [(c_1 - jc_2)V_j \angle -\delta_j + \frac{d_1 - jd_2}{b_1 - jb_2} (V_i \angle \delta_i \cdot (a_1 - ja_2))V_j \angle -\delta_j] \quad (\text{Ek B.7})$$

elde edilir. $\delta = \delta_i - \delta_j$ ve $e^{j\delta} = \cos \delta + j \sin \delta$ olduğu hatırlanırsa (Ek B.7) denklemi

$$\begin{aligned} \dot{S}_i = & V_i V_j (\cos \delta + j \sin \delta) (c_1 - jc_2) + \\ & + \frac{d_1 b_1 + d_2 b_2 + j(d_1 b_2 - d_2 b_1)}{b_1^2 + b_1^2} [V_i^2 - V_i V_j (\cos \delta + j \sin \delta) (a_1 - ja_2)] \end{aligned} \quad (\text{Ek B.8})$$

şeklini alır. $\dot{S} = P + jQ$ olduğuna göre kompleks güç ifadesinin reel kısmı aktif güç, sanal kısmı ise reaktif giriş değerini verir. Buna göre i. baraya ait aktif ve reaktif güç sırasıyla P_i ve Q_i aşağıdaki gibi bulunur

$$P_i = V_i V_j (c_1 \cos \delta + c_2 \sin \delta) + \frac{V_i^2 (d_1 b_1 + d_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} - \frac{V_i V_j}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) + (d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] \quad \dots(\text{Ek B.9})$$

$$Q_i = V_i V_j (c_1 \sin \delta - c_2 \cos \delta) + \frac{V_i^2 (d_1 b_2 - d_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} - \frac{V_i V_j}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) - (d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] \quad \dots(\text{Ek B.10})$$

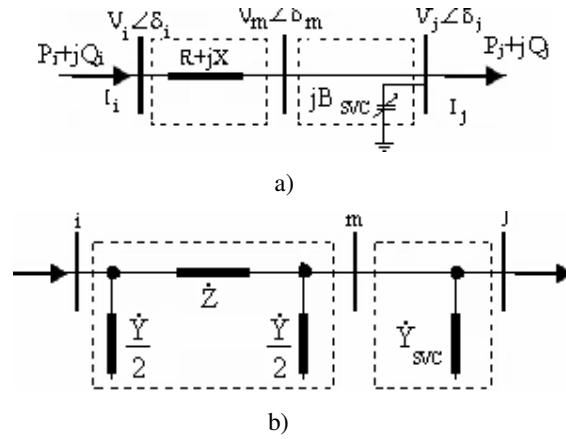
benzer şekilde j. bara için aktif ve reaktif güçler,

$$P_j = \frac{V_i V_j (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) - V_j^2 (a_1 b_1 + a_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (\text{Ek B.11})$$

$$Q_j = \frac{V_i V_j (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - V_j^2 (a_1 b_2 - a_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (\text{Ek B.12})$$

B.2. Hat sonunda SVC olması hali

Bu durumda Şekil B.1a' da verilen güç sistemi j. barasına bir SVC bağlanması neticesinde aşağıdaki gibi gösterilebilir.



Şekil B.2. İki baralı bir iletim hattının sonuna SVC eklenmesi durumunda a)Elektriksel eşdeğeri b) İletim hattı ve SVC'nin iki kapılı bir devre olarak gösterilimi

Şekil B.2b' de görüldüğü gibi SVC hat sonuna eklenen şönt admitans şeklinde gösterilebilir. Burada SVC'nin π eşdeğer devre modeli oluşturularak iletim hattının sonuna ilave edilir. Bu durumda SVC ye ait devre sabitlerini veren akım ve gerilim bağıntıları matrisel formda aşağıdaki gibi olur

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_m \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y}_{SVC} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_j \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} \quad (\text{Ek B.13})$$

tüm sisteme ait akım ve gerilim değerlerini gösteren matrisel form aşağıdaki gibi olur

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_i \\ \dot{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y}_{SVC} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_j \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} \quad (\text{Ek B.14})$$

matrisel çarpım yapıldığında

$$\dot{V}_i = (\dot{A} + \dot{B}\dot{Y}_{SVC}) \dot{V}_j + \dot{B} \cdot \dot{I}_j \quad (\text{Ek B.15})$$

$$\dot{I}_i = (\dot{C} + \dot{D}\dot{Y}_{SVC}) \dot{V}_j + \dot{D} \cdot \dot{I}_j \quad (\text{Ek B.16})$$

elde edilir. $\dot{Y}_{SVC} = jB_{SVC}$ olduğu düşünülerek Bölüm B.1'de anlatılan işlemler uygulanırsa giriş ve çıkış güçleri elde edilir. Buna göre;

$$\begin{aligned} P_i &= V_i V_j (c_1 \cos \delta + c_2 \sin \delta) + \frac{V_i^2 (d_1 b_1 + d_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} - \\ &\quad - \frac{V_i V_j}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) + (d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] \\ &\quad \dots(\text{Ek B.17}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_i &= V_i V_j (c_1 \sin \delta - c_2 \cos \delta) + \frac{V_i^2 (d_1 b_2 - d_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} - \\ &\quad - \frac{V_i V_j}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) - (d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] \\ &\quad \dots(\text{Ek B.18}) \end{aligned}$$

benzer şekilde j. bara için aktif ve reaktif güçler,

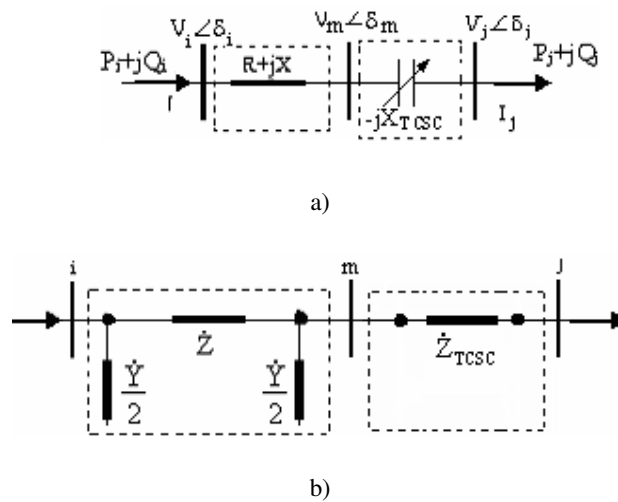
$$P_j = \frac{V_i V_j (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) - V_j^2 (a_1 b_1 + a_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (\text{Ek B.19})$$

$$Q_j = \frac{V_i V_j (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - V_j^2 (a_1 b_2 - a_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} + V_j^2 B_{\text{svc}} \quad (\text{Ek B.20})$$

elde edilir.

B.3. Hat sonunda TCSC olması hali

Bölüm 4.4 de anlatıldığı gibi TCSC güç sistemlerinde güç akışını düzenlemek ve maksimum güç transferini artırmak amacıyla kullanılır. Burada kararlılık çalışmaları esnasında TCSC'nin kapasitif moda çalıştığı farzedilerek aktif ve reaktif güç değerleri elde edilecektir B.1 ve B.2 bölümlerinde olduğu gibi TCSC'nin π eşdeğer devre modeli oluşturularak iletim hattına eklenmesi suretiyle akım ve gerilim bağıntıları elde edilecektir. Şekil B.3a'da TCSC'nin iletim hattına bağlanması Şekil B.3b' de ise bu sistemin elektriksel eşdeğer devre modeli gösterilmektedir.



Şekil B.3 İki baralı bir iletim hattının sonuna TCSC eklenmesi durumunda a)Elektriksel eşdeğeri b) İletim hattı ve TCSC'nin iki kapılı bir devre olarak gösterilimi

Şekil B.3b' de görüldüğü gibi TCSC hat sonuna eklenen bir empedans şeklinde gösterilebilir. Burada TCSC'nin π eşdeğer devre modeli oluşturularak iletim hattının sonuna ilave edilir. Bu durumda TCSC' ye ait devre sabitlerini veren akım ve gerilim bağıntıları matrisel formda aşağıdaki gibi olur

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_m \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z}_{TCSC} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_j \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} \quad (\text{Ek B.21})$$

tüm sisteme ait akım ve gerilim değerlerini gösteren matrisel form aşağıdaki gibi olur

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_i \\ \dot{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z}_{TCSC} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_j \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} \quad (\text{Ek B.22})$$

matrisel çarpım yapıldığında

$$\dot{V}_i = \dot{A}\dot{V}_j + (\dot{A}\dot{Z}_{TCSC} + \dot{B}) \cdot \dot{I}_j \quad (\text{Ek B.23})$$

$$\dot{I}_i = \dot{C}\dot{V}_j + (\dot{C}\dot{Z}_{TCSC} + \dot{D}) \cdot \dot{I}_j \quad (\text{Ek B.24})$$

elde edilir. Burada omik direnc ihmal edilerek $\dot{Z} = jX$ hattın empedansını, \dot{Y} ' de hattın toplam şont kapasitesini göstermektedir. TCSC'nin kapasitif moda çalıştığı düşünülmüştür. $\dot{A} = \dot{D} = (1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2})$, $\dot{B} = \dot{Z}$ ve $\dot{C} = \dot{Y}(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4})$ olmak üzere hatta ait devre sabitleridir. $\dot{Y} = jB_L$ ve $\dot{Z}_{TCSC} = -jX_{TCSC}$ alınarak (Ek B.21) ifadesinde hat başı akım ve gerilim değerleri düzenlenerek aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\dot{V}_i = \xi \cdot \dot{V}_j + j(X - \xi X_{TCSC}) \dot{I}_j \quad (\text{Ek B.25})$$

$$\dot{I}_i = jB_L \zeta \dot{V}_j + (\xi + X_{TCSC} B_L \cdot \zeta) \dot{I}_j \quad (\text{Ek B.26})$$

burada $\xi = 1 - \frac{XB_L}{2}$ ve $\zeta = 1 - \frac{XB_L}{4}$ olmak üzere hatta ait parametrik değerlerdir.

Ek B.21 denklemleri yardımıyla \dot{I}_j ifadesi aşağıdaki gibi bulunur.

$$\dot{I}_j = -\frac{j(\dot{V}_i - \xi \cdot \dot{V}_j)}{X - X_{TCSC} \xi} \quad (\text{Ek B.27})$$

$$\dot{I}_i = jB_L \zeta \dot{V}_j - j \left(\frac{\dot{V}_i X_{TCSC} B_L \zeta + \dot{V}_i \xi + \xi \dot{V}_j X_{TCSC} B_L \zeta - \xi^2 \dot{V}_j}{X - X_{TCSC} \xi} \right) \quad (\text{Ek B.28})$$

$\dot{V}_i = V_i \angle \delta_i$, $\dot{V}_j = V_j \angle \delta_j$ ve $\delta = \delta_i - \delta_j$ olduğuna göre kompleks güçler aşağıdaki gibi yazılır

$$\dot{S}_i = V_i \dot{I}_i^* = P_i + jQ_i \quad (\text{Ek B.29})$$

$$\dot{S}_j = V_j \dot{I}_j^* = P_j + jQ_j \quad (\text{Ek B.30})$$

Ek B.29 ifadesinde \dot{I}_i değeri yerine Ek B.28 değerinin fazörü aynı şekilde Ek B.30 ifadesinde \dot{I}_j değeri yerine Ek B.29 değerinin fazörü konulup gerekli düzenlemeler yapılırsa giriş ve çıkışa ait aktif ve reaktif güçler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P_i = \frac{B_L \zeta X + \xi^2}{X - X_{TCSC} \xi} a V_i V_j \sin \delta \quad (\text{Ek B.31})$$

$$P_j = \frac{1}{X - X_{TCSC} \xi} V_i V_j \sin \delta \quad (\text{Ek B.32})$$

$$Q_i = \frac{V_j^2 \xi - \xi^2 V_i V_j \cos \delta - B_L X \zeta V_i V_j \cos \delta + V_i^2 X_{TCSC} B_L \zeta}{X - X_{TCSC} \xi} \quad (\text{Ek B.33})$$

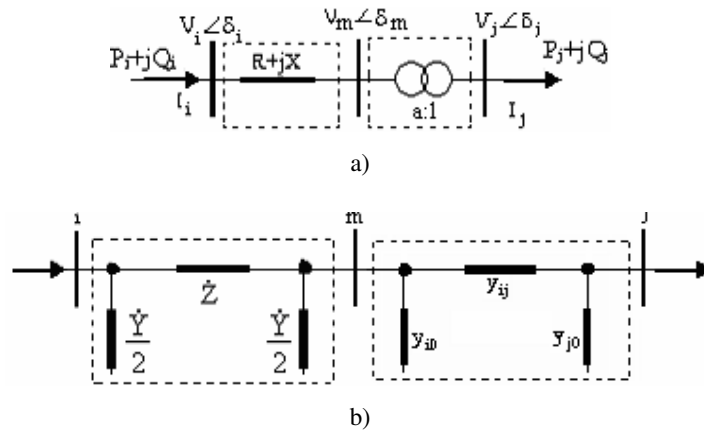
$$Q_j = \frac{V_i V_j \cos \delta - V_j^2 \xi}{X - X_{TCSC} \xi} \quad (\text{Ek B.34})$$

Formülün doğrulanması amacıyla $X_{TCSC} = 0, B_L = 0$ alınarak

$P_i = P_j = \frac{V_i V_j}{X} \sin \delta$ ve $Q_j = -Q_i = -\frac{V_j^2}{X} + \frac{V_i V_j}{X} \cos \delta$ bilinen bağıntılar elde edilir.

B.4. Hat sonunda KDT olması hali

Bölüm 4.5 de anlatıldığı gibi kademe değiştirici transformatörler bir devrede aktif ve reaktif güç akışını kontrol etmek için kullanılır. Burada kararlılık çalışmaları esnasında bu transformatörlerin aktif ve reaktif güç değerleri elde edilecektir B.1 ve B.2 bölümlerinde olduğu gibi kademe değiştirici transformatörün π eşdeğer devre modeli oluşturularak iletim hattına eklenmesi suretiyle akım ve gerilim bağıntıları elde edilecektir. Şekil B.4a’da KDT nin iletim hattına bağlanması Şekil B.4b’ de ise bu sistemin elektriksel eşdeğer devre modeli gösterilmektedir.



Şekil B.4 İki baralı bir iletim hattının sonuna KDT eklenmesi durumunda a)Elektriksel eşdeğeri b) İletim hattı ve KDT'nin iki kapılı bir devre olarak gösterilimi

Burada omik direnc ihmal edilerek $\dot{Z} = jX$ hattın empedansını, \dot{Y} de hattın toplam şont kapasitesini \dot{Y}_{KDT} ve a sırasıyla kademe değiştirici transformatörün kaçak empedans ve çevirme oranını göstermektedir şekil B3b’ deki sistemin bağlantı matrisi aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_i \\ \dot{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{a}{\dot{Y}_{KDT}} \\ \frac{1}{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_j \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} \quad (\text{Ek B.35})$$

Buna göre $\dot{A} = \dot{D} = (1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2})$, $\dot{B} = \dot{Z}$ ve $\dot{C} = \dot{Y}(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4})$ olmak üzere hatta ait devre sabitleridir. $\dot{Y} = jB_L$ ve $\dot{Y}_{KDT} = \frac{1}{jX_t}$ alınarak (Ek B.35) ifadesinde hat başı akım ve gerilim değerleri düzenlenerek aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\dot{V}_i = \xi a \dot{V}_j + j(aX_t \xi + \frac{X}{a}) \dot{I}_j \quad (\text{Ek B.36})$$

$$\dot{I}_i = ja.B_L \zeta \dot{V}_j + (\frac{\xi}{a} - aX_t B_L \zeta) \dot{I}_j \quad (\text{Ek B.37})$$

burada $k=1-\xi = 1 - \frac{XB_L}{2}$ ve $\zeta = 1 - \frac{XB_L}{4}$ olmak üzere hatta ait parametrik değerlerdir. B.35 denklemini yardımıyla \dot{I}_j ifadesi aşağıdaki gibi bulunur.

$$\dot{I}_j = -\frac{j(\dot{V}_i a - a^2 \xi \dot{V}_j)}{a^2 X_t \xi + X} \quad (\text{Ek B.38})$$

Ek B.38 ifadesi Ek B.37' de yerine konur gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\dot{I}_i = jaB_L \zeta \dot{V}_j - j \left(\frac{-\dot{V}_i a^3 X_t B_L \zeta + \dot{V}_i a \xi + a^4 \xi \dot{V}_j X_t B_L \zeta - a^2 \xi^2 \dot{V}_j}{a^3 X_t \xi + aX} \right) \quad (\text{Ek B.39})$$

elde edilir.

$\dot{V}_i = V_i \angle \delta_i$, $\dot{V}_j = V_j \angle \delta_j$ ve $\delta = \delta_i - \delta_j$ olduğuna göre kompleks güçler aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{S}_i = V_i \dot{I}_i^* = P_i + jQ_i \quad (\text{Ek B.40})$$

$$\dot{S}_j = V_j \dot{I}_j^* = P_j + jQ_j \quad (\text{Ek B.41})$$

Ek B.40 ifadesinde \dot{I}_i değeri yerine Ek B.39 değerinin fazörü, aynı şekilde EkB.41 ifadesinde \dot{I}_j değeri yerine Ek B.38 değerinin fazörü konulup gerekli düzenlemeler yapılırsa giriş ve çıkışa ait aktif ve reaktif güçler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P_i = \frac{B_1 \xi X + \zeta^2}{a^2 X_t \zeta + X} a V_i V_j \sin \delta \quad (\text{Ek B.42})$$

$$P_j = \frac{1}{a^2 X_t \zeta + X} a V_i V_j \sin \delta \quad (\text{Ek B.43})$$

$$Q_j = \frac{a V_i V_j \cos \delta - V_j^2 a^2 \zeta}{a^2 X_t \zeta + X} \quad (\text{Ek B.44})$$

Formülün doğrulanması amacıyla $X_t = 0$, $a=1$ ve $B_L = 0$ alınarak

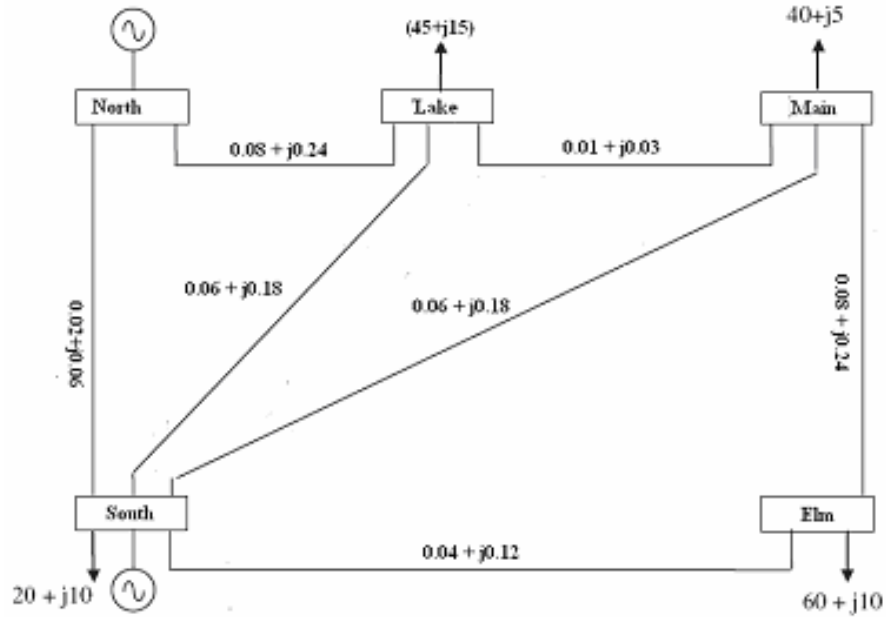
$$P_i = P_j = \frac{V_i V_j}{X} \sin \delta \quad \text{ve} \quad Q_j = -\frac{V_j^2}{X} + \frac{V_i V_j}{X} \cos \delta \quad \text{bilinen bağıntılar elde edilir.}$$

C. Test Sistemleri

Bu bölümde 4 ve 5. bölümlerde statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilen test sistemleri tanıtılmıştır.

C.1. Beş baralı Stag-El Abiad sistemi

Şekil C.1'de 5 baralı iki makinalı test sistemi görülmektedir. Generatör verileri Tablo C.1, hatların şönt admitans değerleri Tablo C.2 'de verilmiştir.



Şekil C.1. Beş baralı Stag-El Abiad sistemi (Baz güç: 100 MVA) [17]

Tablo C.1 Beş baralı Stag El-Abiad sisteminin hat verileri

Generatör baraları	H(sn)	x_d
North	50	$j0.25$
South	1	$j1.5$

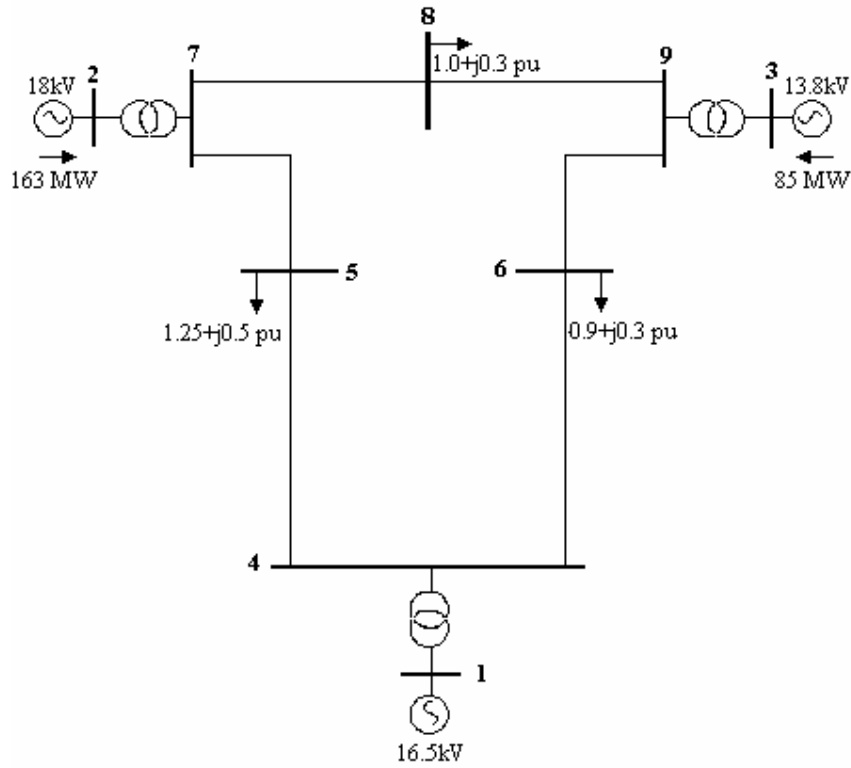
Tablo C.2 Beş baralı Stag El-Abiad sisteminin generatör verileri

Hatların bağlı olduğu baralar	Hatların şönt admitans değerleri ($y/2$)
North-South	$j0.03$
North-Lake	$j0.025$
South-Lake	$j0.02$
South-Main	$j0.02$
South-Elm	$j0.015$
Lake-Main	$j0.01$
Main-Elm	$j0.025$

C.2. Dokuz baralı WSCC sistemi

Bölüm 5.4’de analizi gerçekleştirilen 9 baralı güç sistemi Şekil C.2’de gösterilmiştir. Burada sisteminin baz değerleri $S_{\text{baz}} = 100\text{MVA}$, $V_{\text{baz}} = 230\text{ kV}$ olarak alınmıştır. Yük baralarından çekilen güçler pu cinsinden verilmiştir.

İletim hattına ait bilgiler Tablo C.3’de ,Transformatör bilgileri Tablo C.4’de, Generatör ve generatör baralarına ait veriler Tablo C.5’de verilmiştir. 3 numaralı bara salınım barası olarak seçilmiştir.



Şekil C.2. Dokuz baralı WSCC sistemi

Tablo C.3. Dokuz baralı WSCC sisteminin hat verileri

Hatların bağlı olduğu baralar	Hatların Ömik direnç değerleri (R)	Hatların endüktif reaktans değerleri (X)	Hatların şönt admitans değerleri (y/2)
4-5	0.0100	0.0850	0.1760
4-6	0.0170	0.0920	0.1580
6-9	0.0390	0.1700	0.3580
7-8	0.0085	0.0720	0.1490
5-7	0.0320	0.1610	0.3060
8-9	0.0119	0.1008	0.0522

Tablo C.4. Dokuz baralı WSCC sisteminin transformatör verileri

Transformatörlerin bağlı olduğu baralar	Transformatörlerin direnç değerleri (R _t)	Transformatörlerin kaçak reaktans değerleri (X)	Transformatörlerin dönüştürme oranları (a:1)
2-7	0.0000	0.0625	1.0000
3-9	0.0000	0.0586	1.0000
1-4	0.0000	0.0576	1.0000

Tablo C.5. Dokuz baralı WSCC sisteminin generatör ve generatör baralarına ait veriler

Generatör barası	Gerilim (V)	Açı (δ)	H(s)	X _d	X _q	X' _d
1	1.0400	0.0000	23.64	0.1460	0.0969	0.0608
2	1.0250		6.40	0.8958	0.8645	0.1198
3	1.0250		3.01	1.3125	1.2578	0.1813

ÖZGEÇMİŞ

KADİR ABACI

1969 yılında Gaziantep’te doğdu. İlk-Orta ve Lise eğitimlerini burada tamamladıktan sonra 1989 yılında İTÜ Sakarya Mühendislik Fakültesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği bölümüne girdi. 1993 yılında bu bölümden mezun oldu. Askerlik görevini yedek subay olarak tamamladıktan sonra çeşitli kamu ve özel kuruluşlarda görev yaptı. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elektrik Anabilim dalında yüksek lisans çalışmalarına başladı. 2002 yılında bu bölümden mezun olarak aynı yıl bu bölümde doktora çalışmalarına başladı. Halen bu çalışmalarına devam etmekte olan Kadir Abacı, evli ve bir çocuk babasıdır.