

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM
ÇÖKMELERİ VE ÇATALLAŞMA NOKTALARININ
DİNAMİK OLARAK TESPİT EDİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Elektrik Yüksek Mühendisi Metin VARAN

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK VE ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Yılmaz UYAROĞLU

Haziran 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

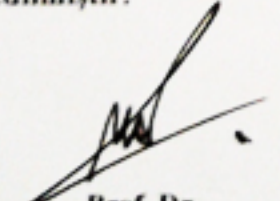
ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM
ÇÖKMELERİ VE ÇATALLAŞMA NOKTALARININ
DİNAMİK OLARAK TESPİT EDİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Elektrik Yüksek Mühendisi Metin VARAN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK VE ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 13 / 06 /2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirligi ile kabul edilmiştir.

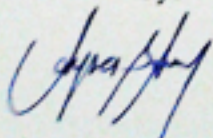

Prof. Dr.
Mehmet Ali YALÇIN
Jüri Başkanı

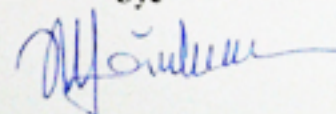
Yrd.Doç. Dr.
Yılmaz UYAROĞLU
Üye

Yrd. Doç. Dr.
Hayrettin EVİRGEN
Üye

Doç. Dr.
Ayşen Basa ARSOY
Üye

Yrd. Doç. Dr.
Nuran YÖRÜKEREN
Üye





ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında çalışmalarımı yönlendirerek beni destekleyen, uluslararası bir çok yayın faaliyetlerimizde teşviki, enerjisi ve fedakarlıklarıyla, akademik cesaret ve özgüven hislerini fazlasıyla bende oluşturan, doktora tezimin başlangıcından bitimine kadar yardımlarını ve katkılarını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Yılmaz UYAROĞLU'na, engin öngörüsü ve tüm içtenliği ile proje ve tez faaliyetlerimizde bizi teşvik eden kıymetli hocam sayın Yrd. Doç Dr. Hayrettin EVİRGEN'e, eşim, annem ve babama, desteğini gördüğüm tüm arkadaşlara sonsuz teşekkürler....

Adapazarı, Mayıs 2012

Metin VARAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xxvi
ÖZET.....	xxvii
SUMMARY.....	xxviii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tez İçeriği ve Literatür Taraması.....	3
1.3. Tezin Organizasyonu.....	8
BÖLÜM 2.	
ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK ANALİZİ.....	11
2.1. Elektrik Güç Sistemlerinde Kararlılık.....	11
2.1.1. Rotor açısı kararlılığı.....	13
2.1.1.1. Küçük işaret kararlılığı.....	17
2.1.1.2. Geçici hal kararlılığı.....	19
2.1.2. Gerilim kararlılığı.....	21
2.1.2.1. Büyük bozulma etkili gerilim kararlılığı.....	27
2.1.2.2. Küçük bozulma etkili gerilim kararlılığı.....	27
2.2. Elektrik Güç Sistemlerinde Gerilim Çökmeleri.....	27

BÖLÜM 3.

ÇATALLAŞMA TEORİSİ VE ÇATALLAŞMA NOKTALARININ DİNAMİK TESPİT EDİLMESİ ALGORİTMALARI.....	30
3.1. Dinamik Sistemler Teorisi	30
3.1.1. Durum uzayları ve vektör alanlar	32
3.1.2. Faz portreleri.....	35
3.2. Çatallaşmalar.....	36
3.3. Çatallaşma Teorisi.....	37
3.3.1. Transkritik çatallaşma.....	37
3.3.2. Pitchfork çatallaşması.....	38
3.3.3. Eyer noktası çatallaşması.....	39
3.3.4. Hopf çatallaşması.....	40
3.3.4.1. Üst kritik hopf çatallaşması.....	42
3.3.4.2. Alt kritik hopf çatallaşması.....	43
3.3.5. Periyot ikiye katlama çatallaşması.....	44
3.3.6. Limit döngüleri ve periyodik yörüngeler.....	45
3.3.7. Tuhaf çekiciler.....	46
3.4. Periyodik Yörüngelerin Tuhaf Çekicilere Dönüşmesi Örnekleri....	47
3.4.1. Rössler çekici üzerinden izah edilmesi.....	48
3.4.2. Lojistik harita sistemi üzerinden izah edilmesi.....	50
3.4.3. Henon harita sistemi üzerinden izah edilmesi.....	51
3.5. Süreklilik Metodu ve Çatallaşma Noktalarının Dinamik Tespit Edilmesi Algoritmaları.....	52
3.5.1. Pseudo-ArcLength süreklilik metodu.....	53
3.6. Lineer Olmayan Ark Ocağı Yüğü İçeren Güç Sistemi Dinamik Modeli.....	59
3.7. Lineer Olmayan Ark Ocağı Yüğü İçeren Güç Sistemi İçin Çatallaşma Analizi.....	61
3.7.1. L-Güç sistemi hat endüktansı çatallaşma parametresi seçilerek yapılan çatallaşma analizi.....	63
3.7.2. R- Güç sistemi hat direnci çatallaşma parametresi seçilerek yapılan çatallaşma analizi.....	65

BÖLÜM 4.

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM ÇÖKMELERİ VE ÇATALLAŞMA NOKTALARININ DİNAMİK TESPİT EDİLMESİ.....	68
4.1. Giriş.....	68
4.2. Prototip Bir Güç Sisteminde Denge Durumunu Kaybetme Hali.....	70
4.3. Gerilim Çökmeleri Tespit İndeksi.....	73
4.4. Lineer Olmayan Yükler İçeren Üç Baralı Dinamik Güç Sistemi Modeli.....	74
4.5. Doğrusal Olmayan Yük İçeren Üç Baralı Güç Sisteminin Dinamik Çatallaşma Analizlerinin Yapılması.....	77
4.6. Üç Baralı Güç Sisteminin $D=0.12$ Parametresi Seçimi Dahilinde Çatallaşma Noktalarının İncelemesi.....	79
4.6.1. Birinci adım çatallaşma analizi.....	81
4.6.1.1. $Q1=11.45$ değerinde oluşan eyer noktası çatallaşmasının etkileri.....	82
4.6.2. İkinci ve üçüncü adım çatallaşma analizi.....	84
4.6.2.1. $Q1=11.41$ değerinde oluşan periyot ikiye katlama çatallaşmasının etkileri.....	87
4.6.2.2. $Q1=11.320030$ değerinde oluşan hopf çatallaşmasının etkileri.....	93
4.6.2.3. $Q1=11.324206$ değerinde oluşan periyot ikiye katlama çatallaşmasının etkileri.....	104
4.6.2.4. $Q1=11.270136$ değerinde oluşan eyer noktası çatallaşmasının etkileri.....	111
4.7. Üç Baralı Güç Sisteminin $D=0.08$ Parametresi Seçimi Dahilinde Çatallaşma Noktalarının İncelemesi.....	116
4.7.1. Birinci ve ikinci adım çatallaşma analizi.....	117
4.7.2. Üçüncü adım çatallaşma analizi.....	118
4.7.3. Dördüncü adım çatallaşma analizi.....	120

BÖLÜM 5.	
İYİLEŞTİRİCİ MÜDAHALE ALGORİTMALARI.....	122
5.1.Giriş.....	122
5.2. Elektrik Güç İletim Sistemlerinde Reaktif Güç Kontrolü.....	123
5.2.1. Şönt elemanlar.....	123
5.2.2. Seri elemanlar.....	124
5.2.3. Facts teknolojisi.....	124
5.3. Doğrusal Olmayan Yükler İçeren Üç Baralı Güç Sistemine SVC Uygulanması.....	125
5.4. Elektrik Ark Ocağı Yüğü İçeren Güç Sistemine TCSC Uygulanması	129
5.4.1. TCSC bağılı güç sistemi için L-güç sistemi hat endüktansı çatallaşma parametresi seçilerek yapılan çatallaşma analizi...	131
5.4.2. TCSC bağılı güç sistemi için R-güç sistemi hat direnci çatallaşma parametresi seçilerek yapılan çatallaşma analizi...	132
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	133
KAYNAKLAR.....	137
EKLER.....	145
EK-A Uygulamada Kullanılan AUTO ve ODE Dosyaları	146
EK-B Tüm Çatallaşma Noktaları Veri Listesi.....	149
EK-C Elektrik Güç Sistemlerinin Modellenmesi.....	164
ÖZGEÇMİŞ.....	188

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

t_0	: Başlangıç zamanı
t_f	: Bitiş zamanı
x	: Durum vektörü
μ	: Bağımsız değişken bir parametre
r	: Bağımsız değişken bir parametre
J	: Jacobiyen matrisi
G	: Hattın kondüktansı
λ	: Çatallaşma parametresi
X_s	: Stator reaktansı
X_m	: Manyetik reaktans
X_r	: Rotor reaktansı
w	: Açısal hız
M	: Makine atalet momenti
T_e	: Makinede ani elektriksel tork
T_m	: Makinede ani meknanik tork
s	: Asenkron motorda kayma
$P_s(V)$: Sürekli hal aktif yük fonksiyonu
$Q_s(V)$: Sürekli hal reaktif yük fonksiyonu
P	: Ani aktif güç
Q	: Ani reaktif güç
α_s	: Sürekli hal aktif güç için gerilimin üstel sabiti
β	: Sürekli hal reaktif güç için gerilimin üstel sabiti
T_e	: Makinenin uyarma sabiti
K_e	: Uyarma kontrol kazancı
H_m	: Motor ataleti
X^*	: Denge noktaları

e_{md}^1	: Boyuna eksen gerilimi
e_{mq}^1	: Enine eksen gerilimi
V_{ds}	: Statorun boyuna eksen gerilimi
V_{qs}	: Statorun enine eksen gerilimi
T_0^1	: Rotor açık devre zaman sabiti
S	: Görünür güç
Z	: Empedans
$\cos\varphi$: Güç faktörü
C	: Kapasitör
K_{qv}	: Asenkron motor dinamiğinden gelen sabitler
K_{qw}	: Asenkron motor dinamiğinden gelen sabitler
K_{qv2}	: Asenkron motor dinamiğinden gelen sabitler
K_{pv}	: Asenkron motor dinamiğinden gelen sabitler
K_{pw}	: Asenkron motor dinamiğinden gelen sabitler
M	: Generatörün atalet momenti
D	: Generatörün sönümlenme sabiti
P_m	: Generatör mekanik gücü
δ_m	: Generatör açısı
w_m	: Generatör açısal hızı
δ	: Yük açısı
V	: Yük gerilimi
$Y1$: Generatör açısı
$Y2$: Generatör açısal hızı
$Y3$: Yük açısı
$Y4$: Yük gerilimi
P_0	: Asenkron motorun sabit aktif gücü
Q_0	: Asenkron motorun sabit reaktif gücü
Y_0	: Sonsuz bara admitansı
θ_0	: Sonsuz bara admitans açısı
V_0	: Sonsuz bara gerilimi
Y_m	: Generatör açısı
θ_m	: Generatör admitans açısı
\dot{I}_0	: İlk koşullar

e_{fd}	Exciter gerilimi
e'_q	Kuadratik eksenin transient reaktans gerilimi
e''_q	Kuadratik eksen alt-transient reaktans gerilimi
e''_d	Doğrudan eksen alt-transient reaktans gerilimi
$v_t, v_d, v_q,$	Armatür gerilimi doğrudan ve kuadratik eksen bileşeni
i_t, i_d, i_q	Armatür akimi doğrudan ve kuadratik eksen bileşeni
i_D, i_Q	Doğrudan ve kuadratik eksen sönümlenme sargi akimi
λ_d	Doğrudan eksen bileşenli pseudo sargi armatür aki bağıntısı
λ_q	Kuadratik eksen bileşenli pseudo sargi armatür aki bağıntısı
λ_f	Alan sargisi aki bağıntısı
λ_D	Doğrudan eksen bileşenli sönümlenme sargi aki bağıntısı
λ_Q	Kuadratik eksen bileşenli sönümlenme sargi aki bağıntısı
r_a	Stator sargi direnci
r_a	Alan direnci
L_d, L_q	Doğrudan ve kuadratik eksen pseudo sargi armatür özindüktansı
L_f	Kutup (Alan) sargisi özindüktansı
L_{md}	Armatür devresi ve bobin sargi arası özindüktans
x_d, x_q	Makine armatür devresi doğrudan ve kuadratik tepkisi (reaktansı)
x'_d	Makinanın doğrudan bileşenli geçici tepki
x_f	Kutup (Alan) sargi tepkisi
x_D	Doğrudan bileşenli sönümlenme sargi tepkisi
x_Q	Kuadratik eksen sönümlenme sargisi reaktansı
x_{md}	Armatür devresi ve alan sargisi arasındaki ikili reaktans
x_{mQ}	Armatür devresi ve doğrudan eksenli sön. sargisi arasındaki reakt.
x_{fD}	Alan ve doğrudan eksenli sönümlenme sargisi arasındaki reaktans
w_s	Senkron makinanın senkron hızı
f	Elektromanyetik salınım frekansı
T'_{d0}	Makinanın doğrudan eksen açık devre zaman sabiti
T''_{d0}	Makinanın doğrudan eksen açık devre alt-transient zaman sabiti
T'_{q0}	Makinanın kuadratik eksen açık devre alt-transient zaman sabiti
T_E	Exciter zaman sabiti
K_E	Exciter kontrolü kazancı
δ	Makinanın güç açısı

P_e, P_m	Makinanın elektriksel ve mekanik güçleri
H	Makinanın atalet momenti
x_p, x_q	Yüke ait aktif ve reaktif güçlere ait durum değişkenleri
$P_s(V), Q_s(V)$	Aktif ve reaktif güçlere ait sürekli hal yük fonksiyonu
$P_t(V), Q_t(V)$	Aktif ve reaktif güçlere ait transient hal yük fonksiyonu
P_0, P_0	Nominal gerilimdeki aktif ve reaktif güçler
α_s, β_s	Aktif ve reaktif güçlerin sürekli haldeki gerilim üstelleri
d_2^1, d_1^1, d_0^1	Aktif gücün sürekli haldeki yük fonksiyonu katsayısı
h_2^1, h_1^1, h_0^1	Reaktif gücün sürekli haldeki yük fonksiyonu katsayısı
α_t, β_t	Aktif ve reaktif güçlerin transient gerilim üstelleri
c_2, c_1, c_0	Aktif gücün sürekli haldeki yük fonksiyonu katsayısı
e_2, e_1, e_0	Reaktif gücün sürekli haldeki yük fonksiyonu katsayısı
α_f, β_f	Aktif ve reaktif güçlerin transient gerilim üstelleri
f_0, f	Nominal ve ani frekans
G, B	Kondüktans ve süseptans
X_s, X_m, X_r	Stator, manyetiklenme ve rotor reaktansları
X'	Transient reaktans
R_s, R_r	Stator ve rotor dirençleri
T_0^1	Rotorun açık devre zaman sabiti
H_m	Asenkron motor atalet sabiti
e_{md}^1, e_{mq}^1	Transient reaktans için doğrudan ve kuadratik eksen gerilimleri
v_{ds}, v_{qs}	Asenkron motor statoru için doğrudan ve kuadratik eksen gerilimleri
i_{ds}, i_{qs}	Asenkron motor statoru için doğrudan ve kuadratik eksen akımları
w_m, w_0	Rotor ve stator alanları arasındaki açısal hız
T_e, T_m	Elektriksel ve mekanik tork
T_{10}	Yük torku sabiti
FACTS	Esnek AC iletim sistemi cihazları
UPFC	Birleşik güç ağı kontrolörü
SSSC	Statik senkron seri kompanzatörü
STATCOM	Statik senkron kompanzatör
SVC	Statik VAR kompanzatörü
GDLM	Generik dinamik yük modeli
VCPI	Gerilim çökmesi sınırı göstergesi

SIM	Basitleştirilmiş asenkron motor
DIM	Detaylı asenkron motor
PSS	Güç sistemi dengeleyicileri
EPRI	Amerikan Elektrik Güç Araştırma Enstitü
BPA	Bonneville Güç Sistemi İdaresi
NSF	Amerikan Ulusal Bilim Kurumu
WSCC	Amerikan Batı Güç Sistemleri Koordinasyon Konseyi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Güç Sistemlerinin Kararlılığını Sınıflandırılması.....	12
Şekil 2.2.	İki Makinalı Bir Güç Sisteminin Tek Hat Diyagramı.....	14
Şekil 2.3.	İki Makinalı Güç Sistemine Ait Güç-Açı Eğrisi.....	14
Şekil 2.4.	Generatör ve Motor Gerilimleri Arasındaki Fazor Diyagramı İlişkisi.....	15
Şekil 2.5.	İki Makinalı Güç Sistemine Ait Güç-Açı Eğrisi.....	15
Şekil 2.6.	Sistemin Küçük Bozucu Etkiye Karşı Cevabı(AVR yok İken Sabit Alan Gerilimli)	18
Şekil 2.7.	Sistemin Küçük Bozucu Etkiye Karşı Cevabı(AVR var İken Uyarma Kontrollü)	18
Şekil 2.8.	Geçici Hal Bozulmasına Karşın Rotor Açısı Cevabı.....	20
Şekil 2.9.	Basit Bir Radyal Güç Sistemi.....	22
Şekil 2.10.	İki Uçlu Radyal Şebeye Ait Yük Talebinin Fonksiyonu Olarak Hat Sonu Gerilimi, Akımı ve Gücü.....	23
Şekil 2.11.	İki Uçlu Radyal Şebeye Ait Güç-Gerilim Karakteristiği.....	24
Şekil 2.12.	İki Uçlu Radyal Şebenin Farklı Yük Gücü Faktörlerine Ait Güç-Gerilim Karakteristiği.....	25
Şekil 2.13.	İki Uçlu Radyal Şebenin Farklı PR/PRMAX Oranlarına Ait Reaktif Güç-Gerilim Karakteristiği.....	25
Şekil 3.1.	Dinamik Sistemlere Genel Bir Bakış.....	30
Şekil 3.2.	Harmonik Osilatörün Durum Uzayından Bir Yörünge Gösterimi	33
Şekil 3.3.	a)- $y=dx/dt$ ye Ait Vektör Alan Çizgileri b)- $x=dy/dt$ ye Ait Vektör Alan Çizgileri.....	33
Şekil 3.4.	$y+2=dy/dx$ ye Ait Vektör Alan Çizgileri.....	34

Şekil 3.5.	İki Boyutlu Durum Uzayındaki Vektör Alanlar Çizgisel Örnekler a)- Çekici: Her İki Özdeğer Negatif ve Reel b)- İtici: Her İki Özdeğer Pozitif ve Reel c)- Saddle-Eyer Durumu.....	35
Şekil 3.6.	İki Boyutlu Durum Uzayındaki Vektör Alanlar Spiral Örnekler a)-Spiral Yapıda Merkez : özdeğerlerin sadece imajiner kısımları mevcuttur. b)-Spiral Yapıda Çekici : özdeğerlerin reel kısmı negatif ve kompleks eşleniktir. c)-Spiral Yapıda Çekici : özdeğerlerin reel kısmı pozitif ve kompleks eşleniktir.	35
Şekil 3.7.	Rössler Osilatörüne ait $c=13$ değerinde $x-z$ Faz Portre Gösterimi	36
Şekil 3.8.	Transkritik Çatallaşmasında Çeşitli Parametre Durumları.....	38
Şekil 3.9.	Verilen Sistem İçin r -Parametresine Göre Çatallaşma Diyagramı	38
Şekil 3.10.	Pitchfork Çatallaşmasında Çeşitli Parametre Durumları.....	39
Şekil 3.11	Verilen Sistem İçin r -Parametresine Göre Çatallaşma Diyagramı	39
Şekil 3.12.	Eyer Noktası Çatallaşmasında Çeşitli Parametre Durumları.....	40
Şekil 3.13	a)-Eyer Noktası, Transkritik ve Pitchfork Çatallaşmaları İçin Özdeğerlerin Genel Değişim Profili b)-Hopf Çatallaşmaları İçin Özdeğerlerin Genel Değişim Profili	41
Şekil 3.14.	Üst Kritik Hopf Çatallaşması.....	42
Şekil 3.15.	Üst Kritik Hopf Çatallaşmasının Kararlılık Değişimi ve Oluşan Limit Döngüler.....	42
Şekil 3.16.	Alt Kritik Hopf çatallaşması.....	43
Şekil 3.17.	Alt kritik Hopf Çatallaşmasının Kararlılık Değişimi ve Oluşan Limit Döngüler.....	44
Şekil 3.18.	a)-Periyot-1 den Periyot-2 'ye Katlamalı Çatallaşma b)-Periyot-1 den Periyot-2 'ye, Periyot-4 ve Periyot-8'e Kaskat Katlamalı Çatallaşma.....	44
Şekil 3.19.	Vanderpol Osilatörünün Faz Portresi Üzerinde Oluşan Limit Döngüler.....	45
Şekil 3.20.	Kararlı ve Kararsız Limit Döngülerin Sarmal Yapısı.....	46

Şekil 3.21.	Kaotik İlginç Çekicilere Doğru Giden Dinamik Bir Sistemin Niteliksel Dinamiklerinin Muhtemel Değişim Rotaları.....	48
Şekil 3.22.	Sabit Parametreleri $a=b=0.10$ Olan Rössler Sisteminde c parametresinin değiştirilmesi ile oluşan $x-z$ Faz Portesi Üzerinden Periyodik İkiye Katlama Rotasının Kaos Çekiciye Dönüşmesi Aşamaları.....	49
Şekil 3.23.	$f(x)=Ax(1-x)$ Lojistik Harita Çatallaşma Diyagramı.....	50
Şekil 3.24.	a)- $f(x)=Ax(1-x)$ Periyod-2/ Kaos Çekeri Faz Geçişi Çatallaşma Diyagramı b)- $f(x)=Ax(1-x)$ Kaos Çekeri/Periyod-3/ Kaos Çekeri Faz Geçişi Çatallaşma Diyagramı.....	51
Şekil 3.25.	Henon Haritası Çatallaşma Diyagramı.....	52
Şekil 3.26.	Pseudo-ArcLength Süreklilik Metodu Geometrik İfadesi.....	54
Şekil 3.27.	Dinamik Çatallaşma Noktası Tespit Algoritması Master Çalışma Yapısı.....	55
Şekil 3.28.	a)- ODE Çözücünün Kullanabileceği Sayısal Çözüm Metotları b)- Runge Kutta-4 Sayısal Analiz Yöntemi Algoritması.....	56
Şekil 3.29.	a)- Merkezi Çatallaşmaların Tespit Edilmesi Akış Diyagramı b)- Çatallaşma Noktalarının Dinamik Tespiti Algoritmasında Çatallaşmalara Ait Yörünge Tespitlerinin Süreklilik Çevrimleriyle Elde Edilmesi Akış Diyagramı.....	57
Şekil 3.30.	AC Beslemeli Ark Ocağı Yüğü İçeren Güç Sistemi Modeli.....	60
Şekil 3.31.	AC Beslemeli Ark Ocağına Ait Bobin Akımının Sabit Bir Değere Oturması.....	62
Şekil 3.32.	Birinci Ve İkinci Adım Çatallaşma Diyagramı.....	63
Şekil 3.33.	$L=0.4590677$ Güç Sistemi Endüktansı Değeri için Bobin Akımı-Kapasitör Gerilimi Faz Portresi.....	64
Şekil 3.34.	$L=0.4590677$ Güç Sistemi Endüktansı Değeri için Elektrot Akımı-Ark Yarıçapı Faz Portresi.....	65
Şekil 3.35.	Birinci ve İkinci Adım Çatallaşma Diyagramı.....	65
Şekil 4.1.	Sistem Dinamikleri ve Çatallaşma.....	70
Şekil 4.2.	Çatallaşma Anında ve Öncesindeki Durum Uzayı dinamikleri.....	71
Şekil 4.3.	$\lambda=(V,Q)$ için İki Boyutlu Yük Parametresi Uzayı.....	73

Şekil 4.4.	Çatallaşma Anında ve Öncesindeki Gerilim Fazörleri.....	74
Şekil 4.5.	Lineer Olmayan Yükler İçeren Dinamik Güç Modeli.....	75
Şekil 4.6.	Dinamik Analiz Ortamında Güç Sistemi Modelinin ODE Formatında Oluşturulması.....	78
Şekil 4.7.	$D=0.12$ ve $Q_1=10.80$ Değeri İçin Yük Gerilimi- Zaman Değişimi	79
Şekil 4.8.	$D=0.12$ ve $Q_1=10.80$ Değeri İçin Tüm Durum Değişkenlerine İlişkin Elde Edilen Veri Listesi.....	80
Şekil 4.9.	$D=0.12$ Parametresi için Çatallaşma Diyagramı.....	80
Şekil 4.10.	$P_1=3.74321354$ Çatallaşma Noktası Sınırlarında Yük Gerilimi- Zaman Değişimi.....	81
Şekil 4.11.	$D=0.12$ Parametresi için 1. Adım Çatallaşma Diyagramı.....	82
Şekil 4.12.	$Q_1=11.45$ Çatallaşma Noktası Sınırlarında Yük Gerilimi-Zaman Değişimi.....	83
Şekil 4.13.	$Q_1=11.4456$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi- Zaman Değişimi.....	83
Şekil 4.14.	a)- $Q_1=11.4456$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi- Yük Açısı Faz Portresi b)- $Q_1=11.4456$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Generatör Açısı- Generatör Açısız Hızı Faz Portresi.....	84
Şekil 4.15.	$D=0.12$ Parametresi için 2. Adım Çatallaşma Diyagramı.....	85
Şekil 4.16.	$D=0.12$ Parametresi için 3. Adım Çatallaşma Diyagramı.....	86
Şekil 4.17.	$D=0.12$ Parametresi için 3. Adım Çatallaşma Diyagramının Büyütülmüş Gösterimi.....	86
Şekil 4.18.	$Q_1=11.4100$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi- Zaman Değişimi.....	87
Şekil 4.19.	a)- $Q_1=11.4100$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi- Yük Açısı Faz Portresi b)- $Q_1=11.4100$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı- Generatör Açısız Hızı Faz Portresi.....	87
Şekil 4.20.	$Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi- Zaman Değişimi.....	88

Şekil 4.21.	a)- $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	b)- $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi.....	89
Şekil 4.22.	$Q_1=11.3960$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	89
Şekil 4.23.	a)- $Q_1=11.3960$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	b)- $Q_1=11.3960$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi.....	90
Şekil 4.24.	a)- $Q_1=11.4020$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	b)- $Q_1=11.4020$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi	
	c)- $Q_1=11.4052$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	d)- $Q_1=11.4052$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi	
	e)- $Q_1=11.4060$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	f)- $Q_1=11.4060$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi	
	g)- $Q_1=11.4076$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	h)- $Q_1=11.4076$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi	
	i)- $Q_1=11.4100$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	j)- $Q_1=11.4100$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi	
	k)- $Q_1=11.4116$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	

	l)- $Q_1=11.4116$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı- Generatör Açısal Hızı Faz Portresi	
	m)- $Q_1=11.4124$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi- Yük Açısı Faz Portresi	
	n)- $Q_1=11.4124$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı- Generatör Açısal Hızı Faz Portresi.....	91
Şekil 4.25.	a)- $Q_1=11.4052$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi- Zaman Değişimi	
	b)- $Q_1=11.4052$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı- Zaman Değişimi	
	c)- $Q_1=11.4116$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi- Zaman Değişimi	
	d)- $Q_1=11.4116$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı- Zaman Değişimi	
	e)- $Q_1=11.4124$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi- Zaman Değişimi	
	f)- $Q_1=11.4124$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi.....	92
Şekil 4.26.	$Q_1=11.320030$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi- Zaman Değişimi.....	94
Şekil 4.27.	$Q_1=11.3200$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Oluşan Hopf Çatallaşması Noktasında Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	94
Şekil 4.28.	$Q_1=11.3200$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Oluşan Hopf Çatallaşması Noktasında Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi.....	95
Şekil 4.29.	a)- $Q_1=11.3185$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi- Yük Açısı Faz Portresi	
	b)- $Q_1=11.3185$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi- Yük Açısı Faz Portresi.....	95
Şekil 4.30.	$Q_1=11.3185$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi- Zaman Değişimi.....	96
Şekil 4.31.	$Q_1=11.3185$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi.....	96

Şekil 4.32.	a)- $Q_1=11.3215$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	b)- $Q_1=11.3215$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	c)- $Q_1=11.3255$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	d)- $Q_1=11.3255$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi.....	97
Şekil 4.33.	a)- $Q_1=11.3215$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	b)- $Q_1=11.3255$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi.....	98
Şekil 4.34.	a)- $Q_1=11.3215$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi	
	b)- $Q_1=11.3255$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi.....	99
Şekil 4.35.	a)- $Q_1=11.3285$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	b)- $Q_1=11.3285$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi	
	c)- $Q_1=11.3300$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	d)- $Q_1=11.3300$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi	
	e)- $Q_1=11.3350$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	f)- $Q_1=11.3350$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi	
	g)- $Q_1=11.3390$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	h)- $Q_1=11.3390$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi	

- i)- $Q_1=11.3400$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
- j)- $Q_1=11.3400$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi
- k)- $Q_1=11.3420$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
- l)- $Q_1=11.3420$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi..... 100

Şekil 4.36.

- a)- $Q_1=11.3285$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
- b)- $Q_1=11.3285$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
- c)- $Q_1=11.3330$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
- d)- $Q_1=11.3330$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
- e)- $Q_1=11.3350$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
- f)- $Q_1=11.3350$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
- g)- $Q_1=11.3390$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
- h)- $Q_1=11.3390$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
- i)- $Q_1=11.3400$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
- j)- $Q_1=11.3400$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
- k)- $Q_1=11.3420$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
- l)- $Q_1=11.3420$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi..... 101

- Şekil 4.37. a)- $Q_1=11.3450$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
b)- $Q_1=11.3450$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
c)- $Q_1=11.3475$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
d)- $Q_1=11.3475$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
e)- $Q_1=11.3510$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
f)- $Q_1=11.3510$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
g)- $Q_1=11.3600$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
h)- $Q_1=11.3600$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
i)- $Q_1=11.3700$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
j)- $Q_1=11.3700$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
k)- $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
l)- $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi..... 102

- Şekil 4.38. a)- $Q_1=11.3600$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
b)- $Q_1=11.3600$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
c)- $Q_1=11.3700$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
d)- $Q_1=11.3700$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
e)- $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-

	Zaman Değişimi	
	f)- $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi.....	104
Şekil 4.39.	a)- $Q_1=11.324206$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	b)- $Q_1=11.324206$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi	
	c)- $Q_1=11.324206$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	d)- $Q_1=11.324206$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi.....	105
Şekil 4.40.	a)- $Q_1=11.3235$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	b)- $Q_1=11.3235$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi	
	c)- $Q_1=11.3196$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	d)- $Q_1=11.3196$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi	
	e)- $Q_1=11.3157$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	f)- $Q_1=11.3157$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi	
	g)- $Q_1=11.3092$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	h)- $Q_1=11.3092$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi.....	106
Şekil 4.41.	a)- $Q_1=11.3235$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	b)- $Q_1=11.3235$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi	
	c)- $Q_1=11.3092$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	

	d)- $Q_1=11.3092$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi.....	107
Şekil 4.42.	a)- $Q_1=11.28712$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	b)- $Q_1=11.28712$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi	
	c)- $Q_1=11.28710$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	d)- $Q_1=11.28710$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi	
	e)- $Q_1=11.27020$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	f)- $Q_1=11.27020$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi.....	108
Şekil 4.43.	a)- $Q_1=11.3248$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	b)- $Q_1=11.3248$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi	
	c)- $Q_1=11.326833$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	d)- $Q_1=11.326833$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi	
	e)- $Q_1=326834$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	f)- $Q_1=326834$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi.....	110
Şekil 4.44.	a)- $Q_1=11.3248$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	b)- $Q_1=11.3248$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi	
	c)- $Q_1=11.326833$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	d)- $Q_1=11.326833$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-	

	Zaman Değişimi	
	e)- $Q_1=11.326834$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	f)- $Q_1=11.326834$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi.....	111
Şekil 4.45.	a)- $Q_1=11.270136$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	b)- $Q_1=11.270136$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi.....	112
Şekil 4.46.	a)- $Q_1=11.270136$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	b)- $Q_1=11.270136$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi.....	112
Şekil 4.47.	a)- $Q_1=11.2600$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	b)- $Q_1=11.2600$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi	
	c)- $Q_1=11.2650$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	d)- $Q_1=11.2650$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi	
	e)- $Q_1=11.2700$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	f)- $Q_1=11.2700$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi.....	113
Şekil 4.48.	a)- $Q_1=11.2600$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	b)- $Q_1=11.2600$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi	
	c)- $Q_1=11.2650$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	d)- $Q_1=11.2650$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi	

	e)- $Q_1=11.2700$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	f)- $Q_1=11.2700$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi.....	114
Şekil 4.49.	a)- $Q_1=11.270156$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	b)- $Q_1=11.270156$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi	
	c)- $Q_1=11.2830$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	d)- $Q_1=11.2830$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi	
	e)- $Q_1=11.2900$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi	
	f)- $Q_1=11.2900$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi.....	115
Şekil 4.50.	a)- $Q_1=11.270156$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	b)- $Q_1=11.270156$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi	
	c)- $Q_1=11.2830$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	d)- $Q_1=11.2830$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi	
	e)- $Q_1=11.2900$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi	
	f)- $Q_1=11.2900$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi.....	116
Şekil 4.51.	$D=0.08$ ve $Q_1=10.80$ Değeri İçin Yük Gerilimi- Zaman Değişimi.....	117
Şekil 4.52.	$D=0.08$ Parametresi için Birinci ve İkinci Adım Çatallaşma Diyagramı.....	118
Şekil 4.53.	$D=0.08$ Parametresi için Üçüncü Adım Çatallaşma Diyagramı	119

Şekil 4.54.	D=0.08 Parametresi için Dördüncü Adım Çatallaşma Diyagramı	120
Şekil 5.1.	Lineer Olmayan Yükler İçeren SVC Bağlı Dinamik Güç Modeli	125
Şekil 5.2.	SVC Modeli.....	126
Şekil 5.3.	Statik Geribeslemeli SVC Kontrol Şeması.....	126
Şekil 5.4.	SVC Bağlı Değilken Elde Edilen Çatallaşma Diyagramı.....	128
Şekil 5.5.	SVC Bağlı İken Elde Edilen Çatallaşma Diyagramı.....	128
Şekil 5.6.	SVC'li ve SVC'siz Yük Barası Geriliminin Zamana Göre Değişimi.....	129
Şekil 5.7.	TCSC Bağlı Elektrik Ark Ocağı Yüğü İçeren Güç Sistemi Modeli.....	130
Şekil 5.8.	TCSC Bağlı Güç Sisteminde Birinci ve İkinci Adım Çatallaşma Diyagramı.....	131
Şekil 5.9.	TCSC Bağlı Güç Sisteminde Birinci ve İkinci Adım Çatallaşma Diyagramı.....	132

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1.	Elektrik Ark Ocağı Yüğü İçeren Güç Sistemi Parametreleri.....	61
Tablo 5.1.	Ark Ocağı Yüğü İçeren Güç Sistemine Ait Parametreler.....	131
Tablo 5.2.	Ark Ocağı Yüğü ile Güç Sistemi Arasına Bağlanan TCSC'ye Ait Tasarım Parametreleri.....	131

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Elektrik Güç Sistemleri, Gerilim Çökmeleri, Kararlılık Analizi, Çatallaşma Noktalarının Tespiti, Reaktif Güç Talebi, Dinamik Analiz

Güç sistemi üzerinde statik analiz, modal analiz, sürekli güç akışı analizi, tekil değer ayrıştırması analizi, ve çatallaşma analizi gibi metotlar ile gerilim kararlılığı başta olmak üzere, güç sisteminin maksimum yüklenebilirlik sınırı, kararlılık sınırı ve meydana gelebilecek kararsızlık mekanizmaları hakkında öngörüler geliştirilmesi, detaylı iyileştirme algoritmaları ve erken müdahale araçları oluşturulması önemlidir. Q-V eğrisi analiz metodu güç akışı programlarının özellikle maksimum güç transferi şartlarına yakın çalışma bölgelerinde P-V eğrileri ve güç akışı hesaplamalarında oluşan yakınsama hatalarının zorluklarının üstesinden gelmek amacıyla kullanılan önemli bir araçtır. Bu analiz yönteminin en bilinen uygulamalarının başında hiç şüphesiz, Q-V eğrileri üzerinde yapılan çatallaşma analizleri gelmektedir. Çatallaşma analizi güç sistemlerinde işletme ve planlama aşamalarında, dinamik sistem analizi incelemelerinde özellikle de gerilim kararlılığı menşeli reaktif güç planlamalarında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir.

Bu tezde doğrusal olmayan ve yoğun reaktif güç talep eden dinamik yüklerin bulunduğu üç baralı bir güç sistemi üzerinden reaktif güce bağlı gerilim çökme safhaları incelenmiştir. Yapılan dinamik analizde farklı reaktif güç talebi değerlerinde sistemin Q-V eğrileri üzerinde tespiti yapılan hopf, eyer noktası ve periyot ikiye katlama gibi çatallaşmalar için periyodik yörünge analizleri yapılarak, bu çatallaşma oluşumlarının sistem üzerinde fiziksel etkileri irdelenmiştir. Bundan başka periyot yörüngelerinin kaosa bir başka ifade ile kontrol edilemezliğe sürüklendiği değişim aşamaları incelenmiştir. Bu bilgiler ışığında özellikle hopf ve periyot ikiye katlama çatallaşmalarında meydana gelen periyodik- 2^n yörüngelerin önce limit döngülerine daha sonra ardışıl bir şekilde ilerleyerek tuhaf çekere(strange attractor) ondan sonra kararsızlığını kaybetmiş olarak periyodik- $2n+1$ yörüngesine dönüşebildiği bundan en sonra da geri döndürülemeyecek bir karmaşıklıkla tam bir kaosa sürüklenebileceği gösterilmiştir. Çalışmanın iyileştirici müdahale kısmında reaktif güce maruz üç baralı güç sistemi için yüklü baraya periyodik yörünge takibi yapılarak reaktif güç temininin ilgili bara üzerinde oluşması muhtemel kritik çatallaşmaları elimine ederek diğer çatallaşma oluşumlarını da daha yüksek reaktif güç talebi değerlerine öteleyeceği, bundan başka yapılan iyileştirmelerin ilgili baranın yüklenebilirlik sınırlarını genişlettiği gösterilmiştir. Bu tezde ağırlıklı olarak Q-V eğrilerin üzerinden incelemesi yapılan güç sisteminin uzun dönem ve kısa dönem gerilim kararlılık analizlerinde ve gerilim çökmelerine doğru sürüklenen sistem davranışlarının tespit edilmesinde, dinamik çatallaşma noktası tespiti algoritmalarının çoklu kararlılık analiz araçlarının yardımcı bir unsuru olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

VOLTAGE COLLAPSE EVENTS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS AND DYNAMIC DETERMINATION OF BIFURCATION POINTS

SUMMARY

Keywords: Electrical Power Systems, Voltage Collapses, Stability Analysis, Determination of Bifurcation Points, Reactive Power Demands, Dynamic Analysis

For the aim for forecasting stability and remedial actions in electrical power systems it is crucial of using static analysis, modal analysis, power flow analysis singular value decomposition and bifurcation analysis methods. The Q-V curve method has been adopted by many utilities because of its advantages on convergence and direct relationship with reactive compensation. Bifurcation analysis is mainly used along with Q-V curve analysis.

In this thesis, voltage collapse formation phases induced by a dynamic non-linear and intense reactive power demanded load, have been investigated on a three-bus power system. Formation of Hopf bifurcation, period doubling bifurcation and saddle node bifurcation on Q-V curve have been discussed with their effects on physical system dynamics along with reactive power demand value and initial condition of power system parameters. By the sight of sensitivity for initial condition rule for chaotic systems, formation of cascading period orbits and doublings has also been traced near bifurcation points phase by phase. In remedial action part of this thesis, it has been demonstrated that procedures of reactive power injections in heavily reactive loaded busbar with tracking formation of periodic orbits on Q-V curves, eliminate viable bifurcations and change them with fewer viable ones. After applying this remedial action scheme on heavily reactive loaded busbar, loadability level of mentioned busbar was enhanced into larger levels. With holding detailed cross-check analyses for effects of bifurcation formation on Q-V curve, It has been proved that applying the algorithms for dynamic detection of bifurcation points used in this thesis, strengthens capabilities of multi-stability assistant tools for short-term and long-term voltage stability analysis in electrical power systems.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Günümüzün hızlı teknolojik gelişmelerine paralel olarak elektrik enerjisine olan talep de aynı ölçüde artmaktadır. Bu enerji taleplerine cevap vermesi gereken ve doğasında çok ciddi doğrusal olmayan özellikler barındıran büyük bir enterkonnekte güç sistemi, sürekli haldeki bir çalışma noktasından uzaklaştığı zaman çok karmaşık davranışlar gösterebilmektedir. Son birkaç on yılda rapor edilen enterkonnekte güç sistemlerinin kısmi veyahut tamamen devre dışı kaldığı vakalar bu enterkonnekte sistemin, bünyesinde meydana gelen hatalara vermiş olduğu dinamik cevaplardan ötürü meydana gelmiştir. Sürekli yük artımı ile birlikte ekonomik ve çevresel baskılar enterkonnekte güç sistemlerini kararlılık limitine yakın noktalarda çalışmaya zorladığından kararlılık sınırları azalmaya başlamış ve enterkonnekte güç sistemleri literatüründe gerilim kararlılığı kritik bir problem olmaya başlamıştır [1].

Gerilim kararlılığı ve güvenliği üzerine, EPRI ve NSF'nin sponsorluklarında birçok uluslararası uygulamalı ekip çalışmaları düzenlenerek, bu problemlerin önemli bir sebebinin sistemlerin çok yüklü olarak çalıştırılmaları olduğu ve bu durumun şebekeler üzerinde beklenmedik farklı davranışlar oluşturabileceği tespitleri yinelenmiştir[2,3,4]. Bu bağlamda gelinen nokta sürekli artan güç ihtiyaçlarına cevap verebilmek için öncelikle yeni üretim tesisleri kurmanın kaçınılmaz olduğu gerçeğidir. Bununla beraber gerek halihazırda kullanıcılara hizmet veren güç hatları gerekse de yeni kurulacak üretim tesislerinden elektriksel yüklerin dinamik davranışlarına ve meydana gelebilecek bozucu etkilere (paralel iletim hatlarından birisinin devre dışı kalması, yıldırım darbesi etkileri, kısa devreler veya büyük miktarlarda yük almalar gibi) daha hızla cevap verebilmeleri için sistem üzerinde statik analiz, modal analiz, sürekli güç akışı analizi, tekil değer ayrıştırması analizi, ve çatallaşma analizi gibi metotlar ile gerilim kararlılığı başta olmak üzere, güç sisteminin maksimum yüklenebilirlik sınırı, kararlılık sınırı ve meydana gelebilecek

kararsızlık mekanizmaları hakkında öngörüler geliştirilmesi , detaylı iyileştirme algoritmaları ve erken müdahale araçları arasında uygun koordinasyonların oluşturulması gereğidir. Analiz ve mevcut sistem verileri arasında uygun koordinasyon prosedürlerinin oluşturulması ve iyileştirme algoritmalarının hazır hale getirilmesi ile gerilim kararlılığını öncelikle etkileyen üretim tesislerinde kullanılan senkron generatörlerin dış etkenler dolayısıyla senkronizmadan kopması, yük taleplerini karşılamaya çalışan belirli sistem baralarına yeterli reaktif gücün verilemeyişi, güç sisteminin ilişkili olduğu yük dinamiklerinin detaylı bilinmemesi gibi yüksek risk durumları asgariye indirilebilir.

Aşırı çalışma koşulları altında, büyük bir enterkonnekte güç sisteminin veya elektrik üretim tesisinin devre dışı kalmasına neden olan, oluşan kesintilerin hem üretici hem tüketici tarafında meydana getirdiği iş kaybı yanında; generatörler, trafolar, kesiciler gibi sistem ekipmanları üzerinde oluşan bozucu etkileri olan gerilim çökmesi olarak da adlandırılan yeni bir kararsızlık problemiyle karşı karşıya kalınmaktadır. Bunun neticesinde, araştırmacıların bu konuya olan çalışma ilgisi artmış ve gerilim kararsızlığı noktalarının tahmin edilmesi, tanımlanması ve nihayetinde sistemi gerilim çökmelerine götürebilecek bu noktalardan uzak durulmasının, güç sistemleri planlama ve işletmesinde hayati bir role sahipliği pekişmiştir.

Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin tüm baralarda kabul edilebilir gerilimler mertebesinde kalabilme durumu olup, bu kararlılık sistemin normal çalışma şartları için olduğu gibi salınım hallerinde de bu durumu sağlaması olarak tanımlanır[5]. Gerilim kararsızlığı gerilim kararlılığının yok olmasıdır ve gerilimde artma ve azalma gibi sonuçlar doğurmaktadır. Gerilim kararsızlığının birincil nedeni, normal olmayan sistem çalışmaları veya kontrolör davranışları altında, yük taleplerini karşılamaya çalışan belirli sistem baralarına yeterli reaktif gücün verilemeyişidir [8]. Bundan başka güç sisteminde generatörler arasında bir dengesizlik esnasında bir gerilim düşümü meydana geldiğinde yük, iletim sistemi bileşenleri ve sistem kayıpları da bir gerilim kararsızlığı artışına neden olabilirler.

Dinamik bir sistemde bir parametre değişirse, sistemin faz portresi de bir takım değişiklikler gösterecektir. Çatallaşmalar doğrusal olmayan sistemler için iyi bilinen

bir terim olup, varlıkları sistemi kaotik davranışlar içine sürükleyen bir yapıdadır ve varlıkları bir çok fiziksel sistemde gösterilmiştir[7,8]. Bütün sistem modelleri için, çatallasmalar kararlı çalışma bölgelerinin oldukça dar olduğu çok yüklü olan sistemlerde görülür ve bu dar aralıkta sistem küçük bir sarsılmaya karşı kararlılığını muhafaza edemeyerek kararsız hale gelir. Geçen yirmi yıl süresince elektrik güç sistemlerinde, kaos ve çatallaşmayı içine alan doğrusal olmayan olaylar bir çok formda etkilerini göstermiştir. Çatallaşma teorisi kullanılarak, gerilim çökmesi ve salınım kavramı gibi elektrik güç sistemlerinde oldukça farklı türde kararlılık problemleri analizi yapılabilir. Dolayısıyla, çatallaşma analizi güç şebekeleri kararlılık çalışmalarında önemli bir yer tutar.

Çatallaşma teorisi faz portrelerinde oluşan denge noktaları, periyodik yörüngeleri ve daha karmaşık olan ilginç çekicilerin görünüp kaybolması şeklinde bu niteliksel değişimleri inceler. Doğrusal olmayan dinamik sistemlerde bazı kararlılığın kaybedilmesi mekanizmaları hem yerel hem de global olarak doğal olarak çatallaşmalarla ilişkilidir[7]. Gerilim kararlılığı analizi elektrik güç sistemi dinamik modelinin denge noktalarının oluştuğu veya gözden kaybolduğu sistem şartlarının belirlenmesini içermekte olup, bu noktalar ele alınan güç sistemi modeli için bazı çatallaşma noktaları ile ilişkilidir. Elektrik güç sistemlerinde bu teori özellikle de gerilim kararlılığı ve gerilim çökmeleri ilişkisini izah etmek için kullanılmıştır[8,9].

1.2. Literatür Taraması

Elektrik güç sistemlerinde gerilim çökmesi, sistem taleplerinin belli limitlerin ötesinde olması durumu için söz konusu olup özellikle de istenen limitlerin altında veya üstünde olan reaktif güç değerleri dolayısıyla meydana gelmektedir. Bundan başka güç sistemi salınımları, özellikle de elektromekanik düşük frekans salınımları güç sistemleri planlama ve işletmesinde önemli bir unsurdur. Elektrik güç sistemlerinin kaos teorisinin kullanılarak analizi özellikle çatallaşma teorisi paraleliyle sistem üzerinde iyileştirici algoritmalar geliştirme safhalarına ulaşmıştır. Bu bağlamda, Koppel ve Washburn [9] elektrik güç sistemlerinde geçici hal kararlılığı analizleri modelinde yer alan ikinci dereceden bağımsız salınım denklemlerinin bazı enerji yüzeylerinde kaotik hareketleri incelemiştir. Varaiya

[10] klasik modelin Arnold difüzyonu adını verdiği kaotik davranış gösterdiğini anlatmıştır. Kaplan ve Yardeni [11] senkron generatörlerin modelleme ve simulasyonlarında kullanılan üç fazlı osilatör modelinin kaotik davranışını incelemişlerdir. Nayfeh [12] tek makineli yarı-sonsuz bara sisteminin salınımsal çözümlerinin kararlılığını kaosla neticelenen seri periyodik ikiye katlama çatallaşmaları ile kaybettiğini incelemiştir. Lai generatör-sonsuz bara modeli için kaotik hareketleri analiz etmişlerdir [13]. Ajjarapu ve Lee [14,15], 1989'da Chiang ve Dobson tarafından geliştirilen [16] örnek güç sistemi modelinin çatallaşmalar kaynaklı iki niteliksel farklı sistem kararsızlıklarını raporlamışlardır. Bu çalışmalarında kaskat periyot ikiye katlama ile kaosa neden olan salınım tipli kararsızlıkla alakalı gerilim çökmesi olasılığı üzerinde durmuşlardır. Bu özel davranış hali, ele alınan parametre değeri ile ilgilidir. Abed [17], Ajjarapu ve Lee tarafından geliştirilen aynı güç sisteminin indirgenmiş modeli üzerinden kaotik davranışları incelemişlerdir. Chiang [18] aynı model üzerinde güç spektrumu ve Lyapunov üstellerini kullanarak kaosu doğrulamıştır.

[19]'da güç sistem modellerinde karşılaşılan birçok farklı çatallaşma tiplerinin kapsamlı özeti sunulmuştur, ve yazarlar büyük dinamik sistemler için farklı kararlılık bölgelerine ilişkin tam bir sınıflandırma yapmışlardır. Bu sınıflandırmada sistemin parametre uzayının, çatallaşma yüzeyleri tarafından sınırlandırılan yapısal kararlılık bölgelerinden oluştuğunu göz önüne almışlardır. İşte bu yüzeyler eğer-noktası, hopf, tekil tesirli ve limit tesirli gibi farklı çatallaşmalar tarafından belirlenirler. Bir çok çatallaşma tipi arasında güç sistemleri için en tehlikeli olan çatallaşmalar eyer noktası çatallaşması (SNB), limit tesirli ve Hopf (HB) çatallaşmalarıdır. Elektrik güç sistemleri için bu tip çatallaşmalar statik gerilim çökmesi problemlerinin başlıca sebebi olup, bu durumun varlığı bir çok makale ve araştırma raporlarında ortaya koyulmuştur [20]-[27]. Örneğin limit tesirli çatallaşmalar, [28] ve [29] çalışmalarında belirtildiği üzere daha çok güç sisteminde kontrolör limitlerinde görülür, özellikle de generatör reaktif güç limitlerinde, bir çok gerçek vakada bu çatallaşmalar SNB çatallaşmasından daha fazla gerilim çökmesine neden olduğu gösterilmiştir. Güç sistemleri literatüründe, SNB çatallaşmaları ve gerilim çökmesi problemi arasında doğrudan bir ilişki olduğu bir çok yayında gösterilmiştir [30]-[33]. H. G. Kwatny ve A. K. Pasrija güç sistemlerinde SNB çatallaşmalarının varlığını göstererek, gerilim

çökmesi ile ilişkisini göstermişlerdir[30]. I. Dobson ve H. D. Chiang, gerilim çökmesi problemlerinin analizini SNB 'nin merkez manifold teorisini kullanarak yapmışlardır[28]. M. M. Begovic ve A. G. Phadke, gerçek güç sistemlerinde, bir çok dinamik gerilim çökmesi simülasyonlarında, çökme olaylarının sistem jakobiyenlerinin özel tekillikleri ile ilişkilerini vurgulamışlardır[32]. C. A. Canizares yük modelinin SNB yi nasıl etkilediğini ve pratik simülasyonlarla bunun gerilim çökmeleri ile ilişkilerini tartışmıştır[33]. Bütün gerilim çökme vakaları SNB ve HB çatallaşmaları ile ilişkilidir diye bir hükümde bulunmak doğru olmamakla birlikte, bu hükmü destekleyecek diğer sebepler 1993'de CIGRE tarafından hazırlanan teknik raporda gösterilmiştir[1-3,25]. Bazı gerilim çökmeleri vakaları, sistemin hızlı dinamiklerinden kaynaklanmakta olup bunu doğrudan çatallaşma ile ilişkilendirmek doğru değildir. Bu hızlı dinamiklerin tesirinde güç sistemi kararlı bölgeden çıkarak, gerilim problemlerinin görüldüğü çalışma bölgelerine geçer. Sistem parametrelerinin yarı-sürekli-hal(quasi steady-state)'de değişerek, sistemin çatallaşma noktasına yaklaştığı özel bir durum söz konusu olduğundan, çatallaşma ile alakalı gerilim kararsızlıkları, "statik gerilim çökme" olarak kategorize edilir. Diğer yandan tüm gerilim çökme vakaları SNB veya HB dolayısıyla oluşmuştur diye bir ifade de doğru değildir.

I. Dobson, L. Lu, ve Y. Hu, statik gerilim çökmesi veya güç sistemlerinde SNB noktalarına en kısa mesafe fikrini [34]'de çalışılmışlardır. Yazarlar bu çalışmalarında bazı karakteristiklere sahip doğrusal olmayan bir sistem modelinin, karakteristiği özel parametre uzayına sahip olan bir sistem yükü altında en yakın SNB'ye olan uzaklığının hesaplanması konusunu tartışmışlardır ve bu metodolojinin uygulamaya geçirilmesini ele almışlardır.

Lee ve Ajarapu 1995 yılında birlikte yaptığı çalışmalarında iki basit test sistemi modellenerek, tek parametre değişimine göre kararlılık analizi yapılmıştır ve P-V eğrilerindeki tüm çatallaşmalarla alakalı kararlılık bölgeleri tanımlanmıştır[35]. Overbye ve DeMarco güç sistemi denge noktalarının kararlılık bölgeleri üzerinde SNB çatallaşmasının etkilerini geçici enerji fonksiyonlarını kullanarak inceleyerek, sistemin SNB ye yaklaştığı durumda kararlılık bölgesinin sürekli azalarak çatallaşma noktasında sıfır değerine geldiğini göstermişlerdir[36]. Canizares 1998 yılında

yaptığı çalışmasında enerji fonksiyonlarını şönt ve seri reaktif güç kompanzasyonlarının bu kararlılık noktaları üzerindeki tesirini göstermiştir[37]. Tipik olarak, farklı kararlılık problemleri ile ilişkili çatallaşmalar, yerel çatallaşmalar olup, sistemi modelleyen diferansiyel cebri denklemlerin çalışma noktaları etrafında özdeğerlerin lineerleştirilmesine esasına dayanır. Bu denge noktaları tipik olarak güç akışı analizi yapılarak elde edilir. Formülasyonunun basit olması dolayısıyla, bazı sistem parametreleri(genellikle yük parametresi) değiştiğinden çeşitli çalışma noktaları elde edilir. Bu noktalar daha sonra, özdeğer analizi sonrasında sistemin kararlı bölgelerini belirlemek üzere kullanılan nose veya P-V eğrileri eldesi için kullanılır. Bazı özel durumlarda nose eğrisi, sistemin çatallaşma diyagramının elde için doğrudan kullanılabilirken[38], bazı durumlar için bu mümkün değildir[39]. Lesieutre, Sauer ve Pai birlikte yaptıkları iki çalışmalarında , P-V eğrileri elde edilen bir güç sisteminin kararlı çalışma bölgelerinin tespit edilmesi için diğer gizli bağımsız parametrelerinde hesaba katılması gerektiğini göstermişlerdir[39]-[40]. Örneğin bir güç akışı hesaplaması yapılırken model güç sistemi için generatör terminal gerilimi sabit kabul edilir, oysa detaylı AVR modelinde gerilimin sabitlendiği değere oluşan gerilim düşümleri dahil edilmemiştir ve bu durum P-V eğrisi üzerindeki her noktada hesaba katılmalıdır

SNB çatallaşması durumunda, sistemin Jakobiyeni ve/veya durum matrisinin sürekli hal çözümlerinin kaybolması şeklinde sonuçlanması, ki burada limit tesirli çatallaşma tipi durumunda olduğu gibi sistem kontrollerinin(generator reaktif güç limiti) sınırlara ulaşmasından dolayı oluşan sürekli hal çözümlerinin yokluğu sözkonusudur. Her iki çatallaşma tipi de sistemi gerilim çökmesine doğru sürükler[36].

Diğer yandan HB ise sistemi salınımsal kararsızlığa itebilecek limit çevrimler veya periyodik yörüngeler oluşturur. Bu durumun model örnekleri [14,29,41,42]'de, pratik örnekleri [43,44]'de verilmiştir. Hopf çatallaşmasında, salınımların etkisiyle güç sisteminde oluşan ani değişimler neticesinde sistemin özdeğerlerinin sol-yarım düzlemleden sağ yarım düzleme geçmesi sözkonusudur. Diğer bir ifadeyle sistemin denge halindeki çalışma noktaları özdeğerlerinin kompleks eşlenik bir çift olması ve karmaşık düzlemde imajiner eksenini kesmesi durumu sistemde hopf varlığına bir

işarettir. HB çatallaşmaları değişken sönümleme, elektrik torkuna bağımlı frekans ve gerilim kontrolü gibi olaylarla ilişkilidir ve tipik olarak beklenmedik sistem olayları tarafından tetiklenirler. Genellikle bu tür çatallaşmalar ağır yüklü sistemlerde görülür. 10 Ağustos 1996 tarihli WSCC şebekesi sistem bozulması ve 2 Mayıs 1995 Sri-Lanka şebekesi bozulmalarında HB tesirli sistem çökmelerine rastlanmıştır. Sistemin kararsızlığı aç, frekans ve gerilim gibi durum değişkenlerinin sürekli olarak değişen veya bir salınım davranışı(gerilim düşümü ile gerilim çökmeleri, frekans ve aç artışı problemleri ile senkronizmanın bozulması) halinde olması şeklinde bir yansımada bulunur. HB noktalarını tahmin edip kontrol etmekle, sistemin büyük bir çökme içerisine girmesine operatör müdahalesi ile engel olunabildiği kabul edilmektedir. Özelde bir çok gösterge tahmin edilebilir ve bazı durumlarda lineer profiller bu tip çatallaşma noktalarına olan mesafenin hızlıca tahmin edilmesini öngörür. Dolayısıyla operatör için daha önleyici ve doğrulayıcı bir karar oluşturulması mümkün hale gelir.

Literatürde araştırmacıların çoğu HB noktalarının bulunması yerine, varlığını göstermekle ilgilenmektedirler. Verilen sistem parametrelerinin HB noktalarına mesafesinin ölçüldüğü bir indeks araç çok faydalı olacaktır. Bu konuda optimizasyon teknikleri kullanılarak yapılan çalışmalar olmakla beraber, sürekli sistem değişim topolojisini hesaplama ve optimize etme ihtiyacı daha elzemdir. [4]'nolu kaynakta, indeks olarak kritik özdeğerlerin reel kısmını kullanarak yapılan dinamik sistem çalışması izah edilmiştir. Ancak elektrik güç sisteminin aşırı doğrusal olmayan yapısı, bu yöntemin uygulanabilirliğini zayıflattığı bu çalışmada izah edilmiştir. [45]'de kapalı çevrim izleme sistemi ile HB kaynaklı kararsızlıkları tespit etme için bir çalışma önerilmiştir, bu çalışmada kararsızlığa yaklaşıırken bir uyarı da bulunmak fikri işlenmiştir. Ancak böyle bir kararsızlık olayı, indeks süresiz ve yumuşak olduğundan çok erkenden tahmin edilmesi mümkün değildir. Problemler yüklenme seviyelerini tahmin etmede, yarı lineer bir profil ile bu indeksin tahmin edilmesi yöntemi hem planlamada hem işletme safhalarında daha kullanışlıdır. Problemi iyi tahmin için, bir ölçüm(yük atma) yapılmalıdır.

Çatallaşma teorisi kullanılarak, gerilim çökmesi ve salınım kavramı gibi elektrik güç sistemlerinde oldukça farklı türde kararlılık problemleri analizi yapılabilir. Bu analiz

çalışmalarının olmazsa olmazlarından biri generatör, trafo, iletim hatlarının model içerisinde tanımlanması işlemi gibi, sistemi kararsızlığa götürecektir olan doğrusal olmayan dinamik yük modelinin de detaylı olarak tanımlanması aşamasıdır. Doğrusal olmayan yükün düzgün olarak tanımlanması analiz sonuçlarında önemli bir etkiye sahiptir. Buraya kadar literatürde çataallaşma teorisi ve elektrik güç sistemlerinde bu teorisinin statik ve dinamik gerilim kararlılığını analiz etmede kullanılışı ile alakalı yapılagelmiş çalışmalar geniş bir biçimde anlatıldı. Elektrik güç literatüründe, bir güç sistemini genelde kararsızlığa özelde de gerilim çökmesine doğru götürecektir kritik çataallaşma noktalarının dinamik olarak tespit edilmesi üzerine kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu konuyla alakalı çalışmaların çoğu patentler eşliğinde geliştirildiği için konu ile çok yoğun teorik bilgiler ve ilgili broşürel bilgiler dışında pek çalışma bulmak mümkün değildir. Fakat dinamik çataallaşma tespiti algoritmaları özellikle kritik yüklenme seviyelerinde reaktif güç tayini konusunda P-V eğrilerinin yakınsama hataları dolayısıyla Q-V eğrileri üzerinden tatbik edilerek 90'lı yıllardan itibaren BPA ve WSCC işletmelerinde yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Sistemde bulunması muhtemel çataallaşma noktalarının dinamik olarak tespit edilmesi ve bu tespit çerçevesinde sistem üzerinde iyileştirici müdahale algoritmalarının oluşturulması bu tez çalışmasının ana hedefi olmuştur.

1.3. Tezin Organizasyonu

Bu çalışmanın 2. bölümünde genelde elektrik güç sistemlerinde kararlılık ve gerilim kararlılığı problemi olmak üzere, özelde de gerilim çökmeleri vakaları ele alınmıştır. 3. bölümde dinamik sistemler teorisi anlatılmış ve dinamik sistem analiz araçları olan vektör alanlar, faz portreleri, durum uzayları, ve çataallaşmalar tarif edilmiştir. Dinamik sistemler teorisi ile ilgili belli başlı kavramların açıklamaları verildikten sonra çataallaşma teorisi çeşitleriyle birlikte tanımlanmış ve çataallaşmaların dinamik sistem teorisindeki önemi irdelenmiştir. Bundan başka dinamik sistemlerde limit döngüler, periyodik yörüngeler ve tuhaf çekiciler gibi kavramlar çataallaşma teorisi üzerinden detaylandırılmıştır. Üçüncü bölümde son olarak dinamik çataallaşma algoritmaları ve bu algoritmaların temelini teşkil eden direk ve süreklilik metodlarının izahatı yapılmıştır. Çalışma yapısı akış diyagramları ile ifade edilen

dinamik çatallaşma tespiti algoritmalarının başarımı, literatürün saygın dergilerinde son yıllarda yaygın olarak tartışılan aşırı değişken ve yüksek karmaşıklıklara sahip ark ocağı dinamik yükü içeren güç sistemine ait çatallaşma analizleri çalışmalarını üzerinden gösterilmiştir.

4. bölümde, aşırı doğrusal olmayan yüklere maruz üç baralı bir güç sistemi üzerinden kararlı bir durumdan kararsızlığa doğru sürüklenen bir senaryo dahilinde sistemin çatallaşma noktaları ve çatallaşma türleri tespit edilmiştir , tespit edilen ve türü kategorize edilen bu çatallaşma noktalarının sistem üzerinde ne tür bir etkiye sahip olduğu detaylı periyodik yörünge ve kararlılık analizleri yapılarak ifade edilmiştir.

Çalışmanın beşinci bölümü olan iyileştirici müdahale algoritmaları kısmında üç baralı güç sisteminde tespit edilen kritik çatallaşmaların SVC kullanılarak daha az tehlikeli çatallaşmalarla değiştirilmesi ve sistemin reaktif güç yüklenebilirlik limitlerinin yükseltilmesi yapılmıştır. İyileştirme müdahaleleri bölümünün ikinci kısmında beşinci bölümde hat direnci ve endüktansı parametreleri çatallaşma parametresi seçilerek kritik hat parametresinde hopf ve eyer noktası gibi kritik çatallaşma varlıkları gösterilen oluşturduğu iç ve dış harmoniklerin hat parametrelerini değiştirmeye başladığı elektrik ark ocağı yükü içeren güç sistem için tasarlanan TCSC kompanzatörü ile kritik hopf ve eyer noktası çatallaşmalarının temizlemesinin yanında sistemin değişen güç sistemi hat direnci ve endüktansı değerlerinde kararlı çalışma bölgelerinin genişletildiği gösterilmiştir.

Çalışmanın ekler kısmında (EK-C) elektrik güç sistemlerinin sayısal ortamda modellenmesi üzerine detaylı bilgiler verilmiştir. Bu modelleme çalışmaları içerisinde generatörler, trafolar, iletim hatları ve yüklerin sistemde nasıl gösterileceği detaylı olarak anlatılmıştır.

Sonuçlar ve öneriler kısmında akıllı şebekelere doğru kayan elektrik güç sistemleri altyapısında, EPRI ve ENTSO gibi kuruluşlar tarafından da desteklenen BPA ve WSCC işletmelerinde kullanılmakta olan ve halen geliştirilmesi devam eden “Online Güç Sistemi Kararlılık İzleme ve Değerlendime” sistemlerinde kullanılan çok sayıda kararlılık ve erken müdahale analiz araçlarının varlığına dikkat çekilmiş ve bu

Çalışmada kurgusu yapılan dinamik çatallaşma noktası tespiti algoritmalarının çoklu kararlılık ve erken müdahale analiz araçlarının yardımcı bir unsuru olarak kullanılabileceği gösterilerek bu araçlar arasında uygun koordinasyonların sağlanması koşuluyla daha etkin erken müdahale yönergeleri oluşturmanın mümkün olduğunun altı çizilmiştir.

BÖLÜM 2. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN KARARLILIK ANALİZİ

2.1. Elektrik Güç Sistemlerinde Kararlılık

Güç sistemlerinde kararlılık problemi, en basit ve en genel şekli ile bir bozucu etkiye maruz kalan sistemin bu bozucu etki sonrasında kabul edilebilir dengeli bir çalışma noktasına dönebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır [2,4,6].

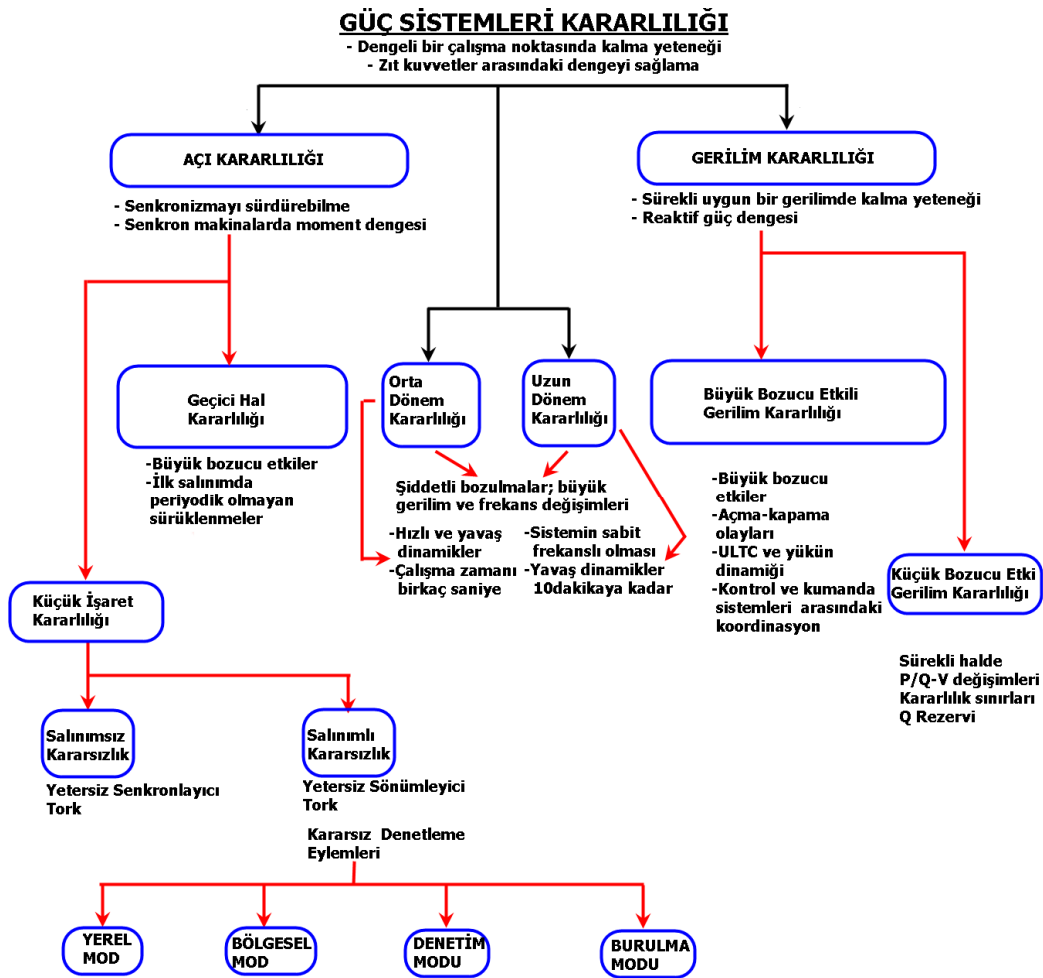
Kararlılığın tanımını daha iyi ve daha anlaşılır bir şekilde yapabilmek için öncelikle kararsızlığın ne olduğunun tanımlanması gerekir. Kararsızlık, farklı biçimlerde tanımlanabilmekte ve bu konuda sisteme ait farklı değişkenler referans olarak alınabilmektedir. Örneğin enerji sistemleri araştırmalarında, enterkonnekte güç sisteminin tamamen yada kısmen senkronizma dışı kalması ve bunun sonucu olarak enerji üretimi ile dağıtımının sağlanamaması kararsızlık olarak değerlendirilmiştir.

Enerji üretimi noktasında sistem kararlılığı, sistem bünyesinde çalışan bütün senkron makinaların senkronizma şartlarını sağlamaları ile ölçeklenebilir. Bu şartlar arasında, sistem dahilinde çalışan generatör frekanslarının aynı olması ve bu makinalara ait rotor açılarının birbirlerine göre kararlı olması sayılabilir[4,5].

Kararlılığın olmazsa olmaz şartı, senkronizmanın sağlanması , bunun içinde rotor açısının kabul edilebilir sınırlar dahilinde olmasıdır. Genelde bu açının 90° sınırını aşmaması ve sistem senkronizmasının kritik alt sınırı olan rotor açısının da altına düşmemesi istenir. Aksi takdirde açının kararlılık sınırlarına getirilmesi mümkün olmayabilir. Bunun yanısıra, kararsızlık sadece senkronizmadan ayrılma ve sistemin ahenginin bozulması şeklinde sonuçlanmayabilir. Bundan başka yük geriliminin de belli sınırlar dışına çıkması da kararsızlık problemi olarak değerlendirilmiştir. Bu tür kararsızlık problemleri, elektrik güç mühendisliği literatüründe gerilim kararlılığı adı altında çok detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu haliyle kararlılık, büyük güçlü bir

sistemin beslediği geniş bir bölgede yük gerilimlerinin korunması olarak da ifade edilebilir. Gerilim kararlılığı konusu ayrı bir başlıkta daha detaylı bir şekilde incelenecektir.

Sonuç olarak, kararlılığın etüd edilmesinde ilgilenilen konu, bir bozucu etkiye maruz kaldığında, güç sisteminin gösterdiği davranışın nasıl olacağı hususunu aydınlatmaktır. Söz konusu bu bozucu etkiler büyük yada küçük olabilir. Kısa yada uzun süreli olabilir. Örneğin; iletim hattı yada baralarda oluşan şiddetli kısa devreler, büyük bir yükün veya generatörün devre dışı kalması sonucu oluşan ve sistemin önemli bir kısmını etkileyen salınımlar büyük bozucu etkiler olarak kendini gösterirken, sistem üzerinde küçük yüklere ait salınımların ve kısa devrelerin olması küçük etkiler olarak değerlendirilir.



Şekil 2.1. Güç Sistemlerinin Kararlılığını Sınıflandırılması

Şekil 2.1'de tezin bu bölümünde anlatılan kararlılık kavramlarının sınıflandırılması yer almaktadır. Bu sınıflandırma dünya literatüründe kabul görmekte ve kullanılmaktadır.

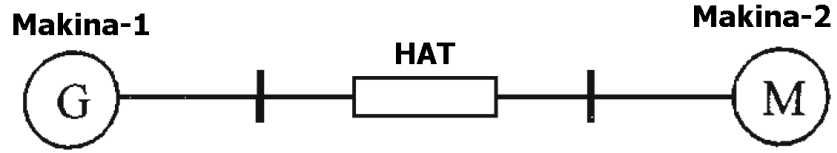
2.1.1. Rotor açısı kararlılığı

Rotor açısı kararlılığı, sistemin kararlılığında rotor açısının kıstas alınması ile ortaya atılmış olan bir tanımdır. Özellikle gerilim kararlılığı araştırmalarının yoğunlaşması bir kısım literatürlerde rotor açısı ve gerilim kararlılığı şeklinde iki üst başlığın kullanılmasına yol açmıştır . Şimdiye kadar kararlılık tanımlarında vurgulanmakta olan sistemin bozucu etki sonrası kabul edilebilir bir çalışma noktasına gelmesiydi. Rotor açısının bozucu etki sonrası kabul edilebilir değerler arasında kalması generatörlerin kararlılığı açısından fikir vermektedir. Özellikle çok makinalı sistemlerde generatörler arasındaki açı farklılıkları önem arz etmektedir.

Enerji sistemlerinde oluşan yük değişimleri sistemde dinamik değişkenlerin salınımlara maruz kalmasına neden olabilmektedir. Bu değişkenlerden biri olan rotor açısında salınımlar meydana gelebilmektedir. Bu salınımlar bazen sistemi kararsızlığa götürmektedir. Rotor açısı kararlılığı analizlerini yapabilmek için sistemin doğasında var olan bu elektromekanik osilasyonların incelenmesi gerekir. Özellikle küçük bozucu etkiler olarak adlandırılan düşük frekanslı osilasyonlar, generatörün rotor açısında düşük frekanslı değişmelere yol açacak ve bu değişmelerde çıkış gücüne olduğu gibi etki edecektir.

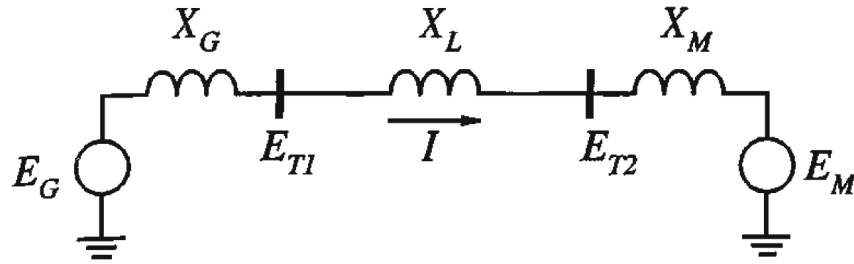
Rotor açısı kararlılığı analizlerinde açı ile elektriksel çıkış gücü arasındaki ilişkinin ve senkron generatör parametrelerinin bu ilişkiye etkisinin bilinmesi zorunludur. Bilindiği gibi, senkron makinalarda ikaz ve endüvi sargıları olarak iki temel bileşen bulunmaktadır. Bu sargıların bulunduğu kısımlara rotor ve stator denilmektedir. Rotor, milinin bağlı olduğu bir tahrik elemanı grubu tarafından döndürüldüğünde, endüvi sargılarında (stator) döner magnetik alan endükleyecektir. Bu alanın endüklenmesi için rotorda yer alan bu sargıların (ikaz-alan sargıları) uyarılması gerekmektedir. Bu döner magnetik alan sonucu statorda gerilim endüklenmektedir.

Endüklenen bu alternatif gerilimin frekansı, rotor hızına ve kutup sayısına bağlıdır[5].



Şekil 2.2. İki Makinalı Bir Güç Sisteminin Tek Hat Diyagramı

Şekil 2.2'de görülen sistem iki makina ve bunları birbirine bağlayan iletim hattından oluşmaktadır. İletim hattının seri direnci ile şönt admitansı ihmal edilmiştir.



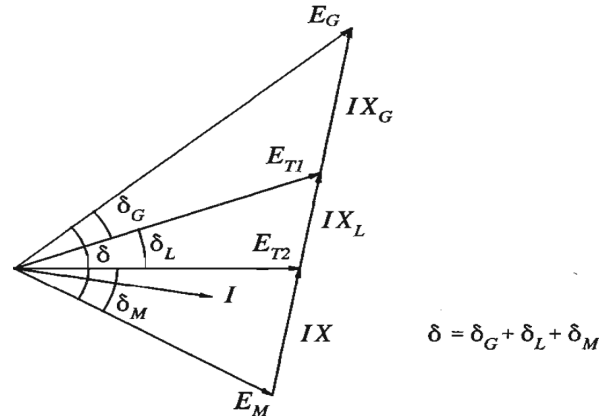
Şekil 2.3. İki Makinalı Bir Güç Sisteminin İdealleştirilmiş Modeli

Şekil 2.3'de aynı sistemin idealleştirilmiş modeli verilmiştir. Generatörden motora aktarılan güç, iki makinanın rotor açıları arasındaki farkın fonksiyonudur. Bu açı farkı üç bileşenden meydana gelmektedir;

δ_G -Generatör iç açısı (generator rotorunun, stator döner alanına göre açısı)

δ_L -Generatör ve motor terminal gerilimleri arasındaki açı farkı (generator stator alanının, motora göre açısı)

δ_M -Motor iç açısı (motorun rotorunun, stator döner alanı arasındaki açısal fark).



Şekil 2.4. Generatör ve Motor Gerilimleri Arasındaki Fazor Diyagramı İlişkisi

Şekil 2.4'de generatör ve motor gerilimleri arasındaki fazor diyagram ilişkileri gösterilmiştir.

Generatörden motora iletilen güç Denklem 2.1 'de verilmektedir.

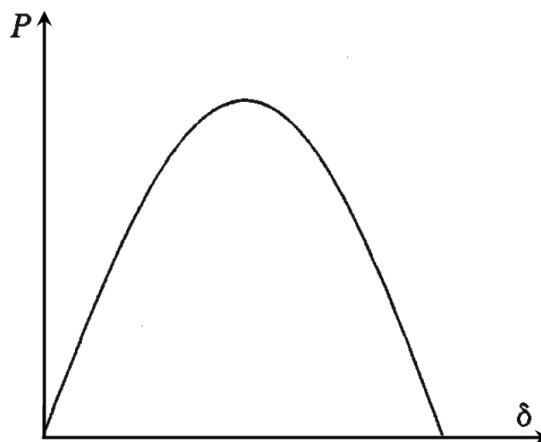
$$P = \frac{E_G E_M}{X_{TRANS}} \sin(\delta) \quad (2.1)$$

Burada δ -açı ve X_{TRANS} 2 makinalı sisteminin toplam empedansı, aşağıdaki ifade ile gösterilir.

$$X_{TRANS} = X_G + X_L + X_M \quad (2.2)$$

$$\delta_{TRANS} = \delta_G + \delta_L + \delta_M \quad (2.3)$$

(2.1) eşitliğinde verilen güç transferinin eğrisel ifadesi Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. İki Makinalı Güç Sistemine Ait Güç-Açı Eğrisi

Dinamik kararlılık analizlerinde regülatörlerin devreye girmesi sonucu bu eğri sinüs formundan uzaklaşmaktadır[4-6,22].

Kararlılık zıt kuvvetler arasındaki dengeli bir durumdur. Birbirine paralel bağlı olan senkron makinelerin mekanizması, bir başka makinenin düzenleyici kuvveti sayesinde senkronizmada kalmayı sürdürmektedir. Sürekli durumda mekanik giriş gücü (yada momenti) ile elektriksel çıkış gücü (ya da momenti) birbirine eşit olduğundan hız sabit olmaktadır. Eğer bir bozucu etki sonucu sistem bu denge durumundan ayrılırsa, makina hızlanır ya da yavaşlar. Eğer bir generatör geçici olarak ya da bozucu etki sonucu dinamik elemanların devreye girmesiyle (yani elektriksel gücün artmasıyla) diğerinden daha hızlı tahrik edilirse, rotorun açıl konumu hızı yavaş olan makinaya göre ileride olacaktır. Açıl farkın artışı ile güç-açı değişim eğrisine bağlı olarak yavaş makinadan hızlı makinaya doğru yükün bir kısmı transfer edilir. Hızlı makina daha fazla yükü üzerine alır. Bu transfer hız farkının ve açıl farkın azaltılması içindir. Yük açısı 90° 'ye ulaştığında maksimum güç iletimi sağlanır ancak makina çok fazla hızlanır. Bundan sonra makina senkronizmadan ayrılır ve koruma elemanları devreye girer. Verilen herhangi bir durum için sistemin kararlılığı, yeterli düzenleyici moment ile rotorun açıl konumundaki sapmalara bağlıdır. Senkronizmanın kaybı, bir makina ile sistemin geri kalanı ya da makina grupları arasında oluşabilir. İkinci durumda, diğerlerinden ayrıldıktan sonra her grup içinde senkronizmayı sürdürebilir. Bir senkron makinenin elektriksel momentindeki değişim aşağıdaki şekilde verilebilir;

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (2.4)$$

Burada $T_s \Delta \delta$ rotor açısındaki değişimle aynı fazda olan moment değişimi bileşenidir ve senkronlayıcı moment bileşeni olarak adlandırılır. T_s senkronlayıcı moment katsayısıdır. $T_D \Delta \omega$ ise hızdaki sapmalar ile aynı fazda olan sönümleyici moment bileşenidir. T_D 'de sönümleyici moment katsayısıdır.

Sistemin kararlılığı, her bir senkron makina için her iki moment bileşeninin varlığına bağlıdır. Yeterli senkronlayıcı momentin olmaması rotor açısında periyodik olmayan salınımların oluşmasıyla sonuçlanır. Diğer bir deyişle sönümleyici momentin yeterli olmayışı osilasyonlu kararsızlığa yol açar. Analizlerde kolaylık olması için

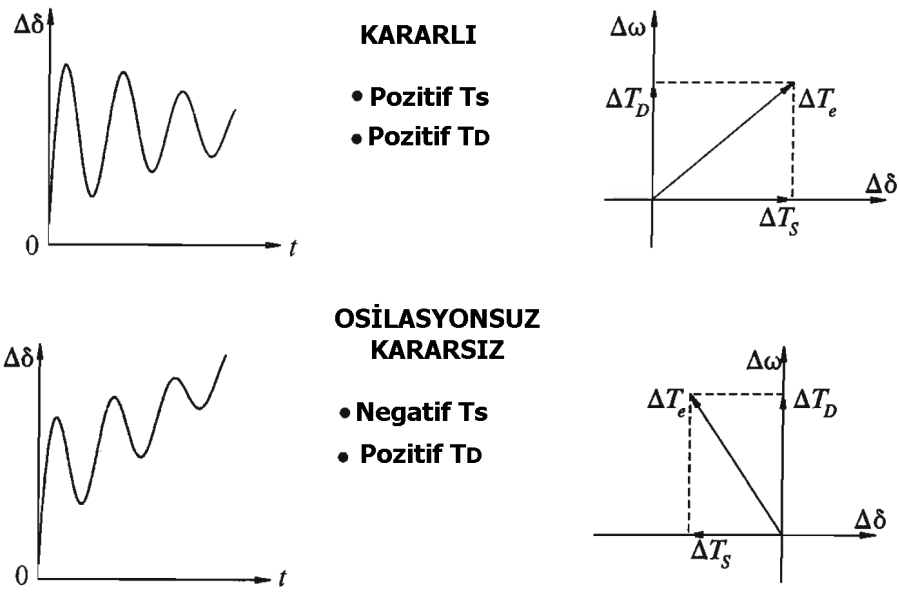
kararlılık olayları aşağıdaki iki kategoride sınıflandırılmıştır. Daha önce de söylendiği gibi bu tür sınıflandırmalar konusunda dünya genelinde kesin bir standart yoktur.

2.1.1.1. Küçük işaret (Küçük bozucu etki) kararlılığı

Küçük işaret kararlılığı (KİK), küçük bozucu etkiler (KBE) altında güç sisteminin senkronizmayı sürdürebilme yeteneği olarak tanımlanır. Yükteki küçük değişimlerden dolayı bu bozucu etkiler sistemde sürekli olarak meydana gelmektedir. Düşük frekanslı (0.2-2 Hz arası) ve uzun süreli (1-40 saniye) olan bu bozucu etkilere karşı sistemin mekanik elemanlarının harekete geçerek cevap vermesi, analizlerde klasik yolları ve modelleri kullanmamızı engeller. Dinamik karaktere sahip olan regülatörler, sistemin dinamik yapısına katkıda bulunur. Sistemin analizlerinde lineerleştirilmiş denklemler kullanılmaya başlanır. Kararsızlık iki şekilde ortaya çıkar;

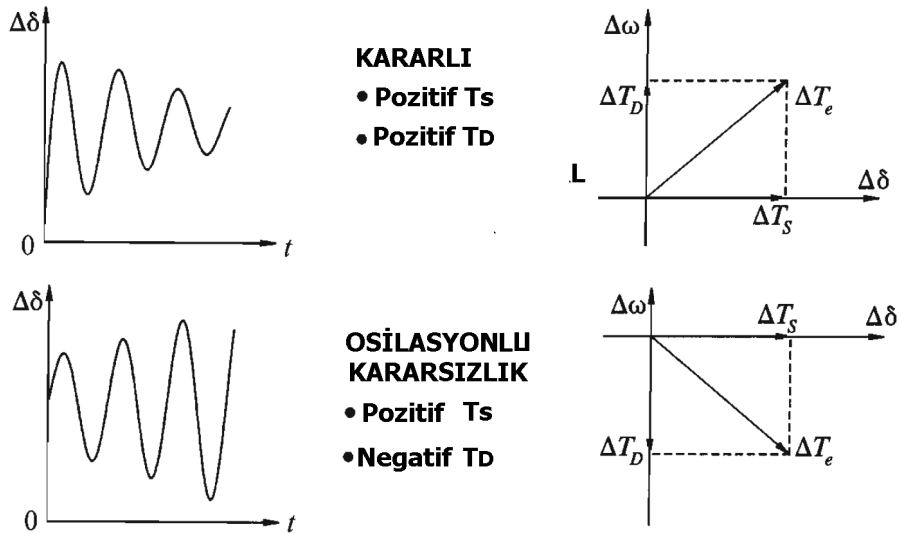
- a. Yeterli miktarda senkronlayıcı momentin olmaması sonucu rotor açısında sürekli bir artış oluşur.
- b. Sönümleyici momentin yetersiz kalmasından dolayı, artan genlikte rotor osilasyonları oluşur.

Sistemin küçük etkilere cevabı, iletim sistemine ve generatörün uyarma kontrolüne bağlıdır. Büyük bir sisteme bağlı bir generatör için, otomatik gerilim regülatörlerinin (AVR) olmaması, yani alan geriliminin sabit olması durumunda, kararsızlık yeterli senkronlayıcı momentin olmamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.6. Sistemin Küçük Bozucu Etkiye Karşı Cevabı(AVR yok İken- Sabit Alan Gerilimli)

Bu durum, Şekil 2.6'da görüldüğü gibi osilasyonsuz mod şeklinde kararsızlıkla sonuçlanır. Otomatik gerilim regülatörlerinin sürekli olarak çalışmasıyla KİK, sistem osilasyonlarının yeterince çabuk söndürülemediği problemi şeklinde ortaya çıkar. Kararsızlık ise, osilasyon genliğinin giderek artması şeklinde olmaktadır.



Şekil 2.7. Sistemin Küçük Bozucu Etkiye Karşı Cevabı(AVR var İken- Uyarma Kontrollü)

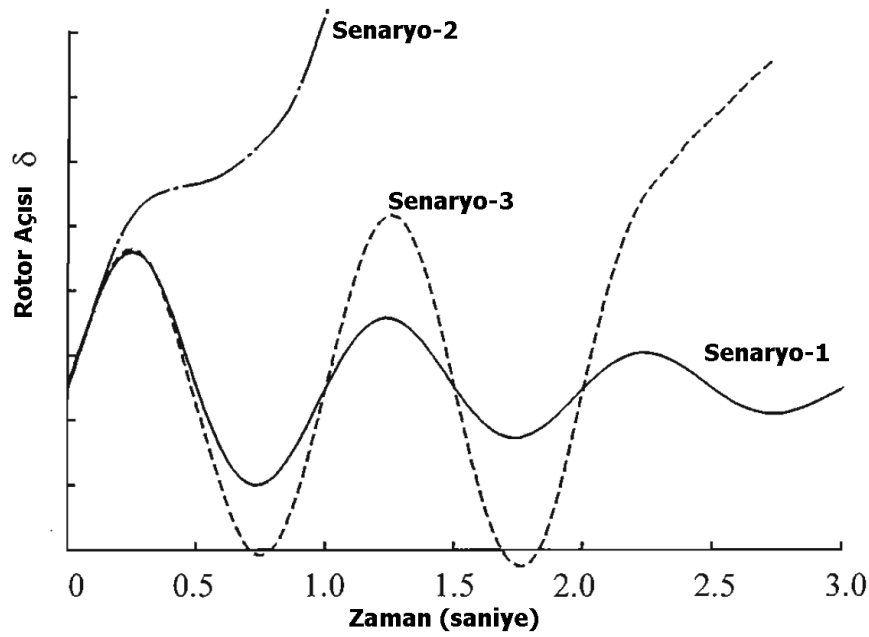
Şekil 2.7'de otomatik gerilim regülatörleri ile generatörün cevabı görülmektedir. Günümüzde işletilen güç sistemlerinde, KİK yaygın olarak yetersiz sönmeye sahip

olamayan osilasyonlar şeklinde kendini gösterir. Aşağıda belirtilen türdeki osilasyonlar genelde bu grubun üyeleridir;

- a. Yerel modlar veya makina-sistem modları üretim istasyonlarında sistemin geri kalan kısmına göre oluşan salınım birimleriyle alakalıdır. Buradaki yerel terimi, osilasyonun tek bir istasyonda veya güç sisteminin küçük bir kısmında lokalize edildiği anlamına gelmektedir.
- b. Bölgelerarası modlar, bir bölgede yer alan birden çok makinanın, diğer bölgelerdeki makinalara karşı yaptığı salınımlar ile alakalıdır.
- c. Denetim modları ise, üretim birimleri ve diğer kontroller ile alakalı olup. Zayıf ayarlı tahrik elemanları, hız kontrollörleri, HVDC çevricileri ve SVC'ler bu modlar arasında sayılabilecek kararsızlık kaynaklarıdır.
- d. Burulma modları, türbin-generatör şaft sistem döner bileşenleriyle alakalı olup, tahrik elemanları kontrollörü, hız kontrolörleri, HVDC kontrolleri ve SVC' li hatlar arasında meydana gelen etkileşimler kaynaklı osilasyonlardır.

2.1.1.2. Geçici hal kararlılığı

Gecici hal kararlılığı (GHK), KİK'dan farklı olarak büyük şiddetli, ani bozucu etkilere maruz kalan sistemin kararlılığını sürdürebilme kabiliyeti olarak algılanmaktadır. GHK'da şiddetli kısa devreler, çok büyük miktarda yük değişimleri gibi sistemde önemli dalgalanmalara yol açacak etkiler söz konusudur. Bu etkiler bir saniyeden daha kısa sürede meydana gelir, ne koruma elemanları ne de generatörün mekanik regülatörleri bu etkilere yeterince hızlı cevap verebilirler. Rotor açısında büyük salınımlar oluşur. Bu tür kısa devre şeklindeki bozucu etkiler kesicilerin arıza bölgesini şebekeden tamamen ayırması ile giderilebilir. Şiddetli bir bozucu etkiye maruz kalan büyük sistemlerde, rotor açısının ilk salınımı kararlılık hakkında ipucu verir. İlk salınımlarda açı kritik değeri aşıyorsa kesicilerin arızalı bölgeyi şebekeden ayırması bile generatörlerin aşırı hızlanmasını önleyemez. Bu yüzden arıza olduktan sonraki birkaç saniyelik süre içinde sistemin hali belli olur.



Şekil 2.8. Geçici Hal Bozulmasına Karşın Rotor Açısı Cevabı

Şekil 2.8'de çeşitli durumlar için geçici bozucu etkilere karşı generatör rotor açısının değişimi verilmektedir. İlk senaryoda açı salınım yapmakta ve bu salınımların genlikleri giderek küçülmektedir. Generatör bir süre sonra kararlı hale gelecektir. İkinci senaryoda açı kısa sürede büyük bir ivme ile artmaktadır. Senkronizmadan ayrılma meydana gelecektir. Yeterli miktarda senkronlayıcı moment olmadığı için açı salınım yapmadan çok hızlı biçimde artmıştır. Üçüncü senaryoda ise, giderek artan genlikte salınımlar meydana gelmektedir. Bu durumda ilk salınımda kararlı gibi görülen sistem, geçici hal süresi sonrasındaki salınımlarında kararsızlığa gitmektedir. Bu gibi durumlar KİK olaylarında rastlanılan durumlardır. Ayrıca GHK analizlerinde generatörün mekanik giriş gücü ve momentinin değişmediği kabul edilir. Çünkü olayın meydana geliş süresi 3-5 saniye ile sınırlı olup, mekanik regülatörler devreye girmemiştir.

Dinamik kararlılık terimi, literatürde rotor açısı kararlılığını ifade etme de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanısıra kararlılık sınıflandırılmasında sözü geçen dinamik kararlılık kavramı, üzerinde tartışmalar olan bir kavramdır. K.Amerikan literatüründe otomatik gerilim regülatörlerinin daha kısa zamanda (mekanik regülatörlere göre) cevap vermesinden dolayı sürekli hal incelemelerinden farklı

düşünülmüştür. KİK ile dinamik kararlılık aynı anlamda kullanılmıştır. Alman ve Fransız literatüründe ise GHK ile birlikte anılmıştır[4-7,22,55].

2.1.2. Gerilim kararlılığı

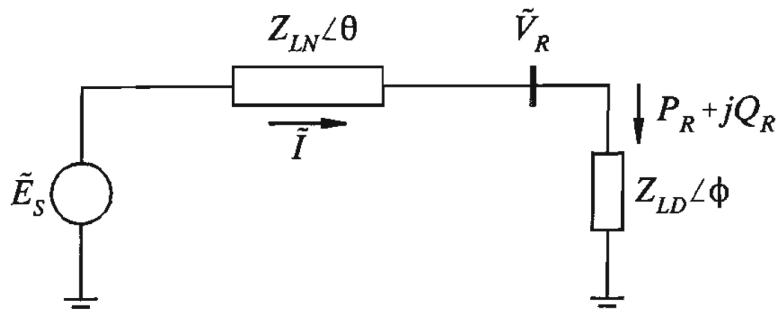
Gerilim kararlılığı, bir enerji sisteminin yük baralarının gerilimlerinin genliklerini, gerek sürekli halde gerekse de geçici olaylar esnasında, belirli işletme limitleri içinde tutabilme yeteneği olarak tanımlanabilir(IEEE-CIGRE, 2004). Bir elektrik güç sisteminin gerilimi; sistem üzerinde beklenmedik bir arıza, yük talebinde ani bir artış, sistem şartlarında ani bir değişim gibi etkilerle ani bir değişime maruz kalabilir. Bu değişimler kısa veya uzun dönemde sistemin gerilim kararlılığını etkiler. Gerilim kararsızlığının birincil ve ana nedeni, normal olmayan sistem çalışmaları ve kontrolör davranışları altında, güç sisteminin yük taleplerini karşılamaya çalışan belirli sistem baralarının reaktif güç taleplerine yeterli cevabı veremeyişi olarak ifade edilebilir[4,6,54].

Küçük bozulmaların olduğu güç sistemlerinde gerilim kararlılığı kriteri, sisteme bağlı bulunan tüm bara değerlerinin oluşturduğu çalışma noktasında, reaktif güç enjeksiyonu yapılan baranın bu güç arttırımına bara geriliminin artması şeklinde cevap vermesi şeklinde ifade edilir. Sistem üzerindeki herhangi bir bara, reaktif güç artışına bara geriliminin azalması olarak cevap veriyorsa ya reaktif güç enjekte edilen bara veyahut tüm sistem gerilim kararsızlığı içerisinde denilebilir.

Bundan başka, bara gerilimindeki sürekli artış, rotor açısının bozulması ile de ilişkilendirilebilir. Örneğin birbirleri arasında senkronizması bozulan, iki senkron makina grubu arasındaki rotor açısı farkının 180° 'ye dereceye yaklaşma veya bu değeri aşma durumu, iki senkron makina grubunun arasında bulunun şebeke geriliminin çok düşük seviyelerde seyretmesiyle neticelenir. Tabi çalışmanın bu kısmında rotor açısı senkronizması bozulan bir iletim sisteminin gerilim kararsızlığı konusu detaylandırılmayacağı için bu konu farklı kararsızlık unsurlarının ayrı etkileri yanında birbirleri içerisinde de ilişkisel varlığına örnek olması açısından olarak ifade edilmiştir [4,6].

Gerilim kararsızlığı daha çok lokal bir kavram olarak bilinirken, kaskat etki ile tüm sistem üzerinde görünmesi de muhtemeldir. Gerilim çökmesi olarak tanımlanan bu durum, sadece gerilim kararsızlığı ile açıklanamayacak derecede karmaşık bir olaydır. Gerilim çökmesi olayı, sistemi gerilim düşümüne doğru götüren bir çok olaylar etkisi ve bunların birbiri aralarındaki etkileşimleri ile oluşan ve nihayetinde çığ etkisi olarak bilinen bir durumdur.

Gerilim kararsızlığı durumu bir çok farklı yolla meydana gelebilir. Bunun en basit şekli Şekil 2.9’de gösterilen iki uçlu radyal bir şebeke üzerinde anlatılacaktır.



Şekil 2.9. Basit Bir Radyal Güç Sistemi

Şekilde görüldüğü üzere şebeke E_S sabit gerilim kaynağı seri bir empedans (Z_{LN}) hattı üzerinden bir yükü (Z_{LD}) beslemektedir. Burada \tilde{I} akım ifadesi

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{E}_S}{\tilde{Z}_{LN} + \tilde{Z}_{LD}} \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada \tilde{I} ve \tilde{E}_S fazör gösterimli akım ve gerilim değerleri olup, hat ve yük empedans fazör ifadeleri

$$\tilde{Z}_{LN} = Z_{LN} \angle \theta \quad \text{ve} \quad \tilde{Z}_{LD} = Z_{LD} \angle \phi \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir.

Akımın büyüklüğü

$$I = \frac{E_S}{\sqrt{(Z_{LN} \cos \theta + Z_{LD} \cos \phi)^2 + (Z_{LN} \sin \theta + Z_{LD} \sin \phi)^2}} \quad (2.7)$$

İfadesiyle verilir. Bu ifade aşağıdaki gibi de yazılabilir;

$$I = \frac{E_S}{\sqrt{F} Z_{LN}}, \text{ burada } F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right)^2 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right) \cos(\theta - \phi) \text{ 'dir.}$$

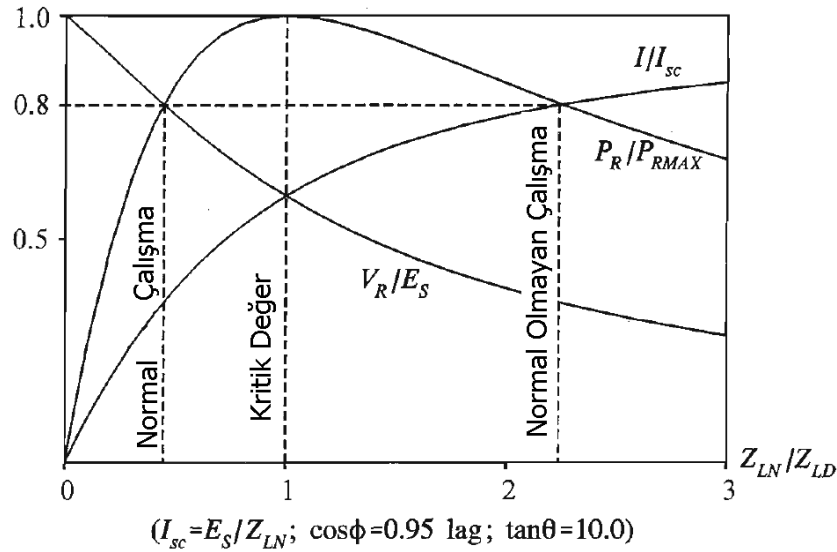
Hat sonu geriliminin genliği

$$\begin{aligned} V_R &= Z_{LD} I \\ &= \frac{Z_{LD}}{\sqrt{F} Z_{LN}} E_S \end{aligned} \quad (2.8)$$

olup, yüke aktarılan güç,

$$\begin{aligned} P_R &= V_R I \cos \phi \\ &= \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_S}{Z_{LN}} \right)^2 \cos \phi \end{aligned} \quad (2.9)$$

denklemlerle ifade edilir.

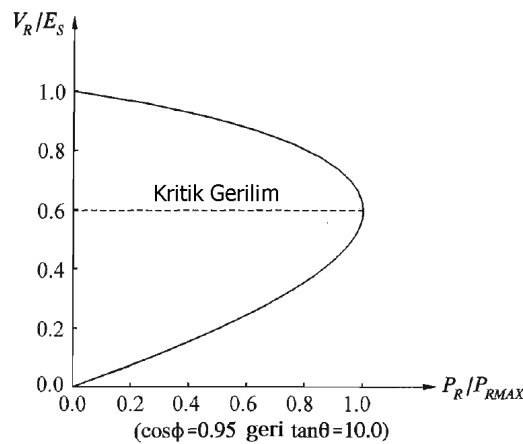


Şekil 2.10. İki Uçlu Radyal Şebeye Ait Yük Talebinin Fonksiyonu Olarak Hat Sonu Gerilimi, Akımı ve Gücü

I , V_R ve P_R ye ait $V-Z_{LN}/Z_{LD}$ eğrileri Şekil 2.10' da verilmiştir. Şekilde de belirtildiği üzere Z_{LN}/Z_{LD} için $\tan \theta = 10.0$ ve $\cos \phi = 0.95$ değerindedir. Z_{LD} 'nin azaltılmasıyla arttırılan yük talebi sonucu ilk önce hızlı bir değişim gösteren P_R 'deki artış daha sonra en üst noktaya çıkmadan yavaşlamakta daha sonra da azalmaya başlamaktadır. Burada sabit bir gerilim altında bir empedans üzerinde maksimum

güç transferinin yapıldığı görülmektedir. Hat üzerinde gerilim düşüşümü V_R 'ye eşit olduğu zaman, ki bu $Z_{LN}/Z_{LD}=1$ anlamına gelmektedir, transfer edilen güç maksimuma çıkmaktadır. Z_{LD} kademeli olarak azaltılmaya başlandığında I artar ve V_R azalır. Başlangıçta Z_{LD} 'nin yüksek değerlerinde, I daki artış V_R 'deki azalıştan baskın olur ve dolayısıyla Z_{LD} 'nin azalmasıyla P_R ani bir artışa geçer. Z_{LD} değeri Z_{LN} 'ye yaklaşınca, I üzerindeki azalma etkisi V_R üzerindeki azalma etkisinden çok az bir baskınlık seyredir. Z_{LD} Z_{LN} 'den düşük olmaya başlayınca V_R üzerindeki düşüş I üzerindeki düşüşe baskın hale gelir. Bu da toplamda P_R 'nin azalması olarak kendini gösterir.

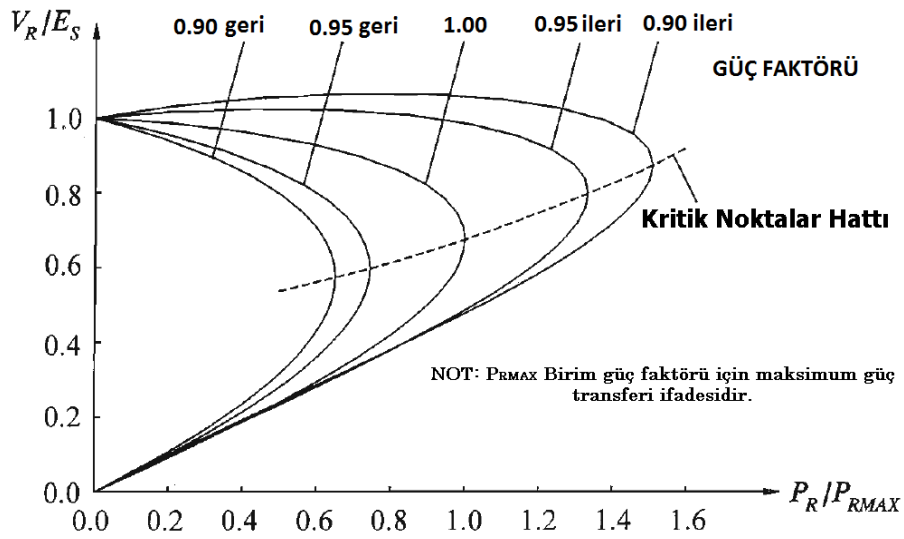
Maksimum gücün transfer edilebileceği sınır olan “kritik çalışma noktası”, kararlı çalışmanın da son noktasıdır. Bu noktadan sonraki artan yük talebi (azalan yük empedansı), sonrası yüke aktarılan güç üzerindeki kontrolün yitirilmesine sebep olacaktır. Yükün karakteristiğine göre yük gerilimi ilerleyen bir şekilde azalmaya başlayacaktır. Sabit-empedans statik yük karakteristiği için sistem istenen güç ve gerilim seviyesinin altında sabitlenirken, sabit-güç yük karakteristiği altında sistem yük barasındaki gerilimin kararsızlığı daha sonra da gerilimin çökmesi ile sonuçlanacaktır. Daha farklı yük karakteristikleri için gerilimin nihai durumu iletim hattının ve yükün kompozit karakteri tarafından belirlenir. Eğer yük bir otomatik kademe değiştirici transformatör üzerinden besleniyorsa, kademe değiştiricisi yük gerilimini arttırmak için devreye girecektir. Bunu yapmak için yükün sistem tarafından görünen efektif empedansını azaltmaya çalışacaktır. Bu da nihai olarak V_R 'yi daha fazla arttıracak ve gerilimde sürekli devam eden bir azalmaya sebep olacaktır. Bu olay gerilim kararsızlığının en açık ve basit formudur.



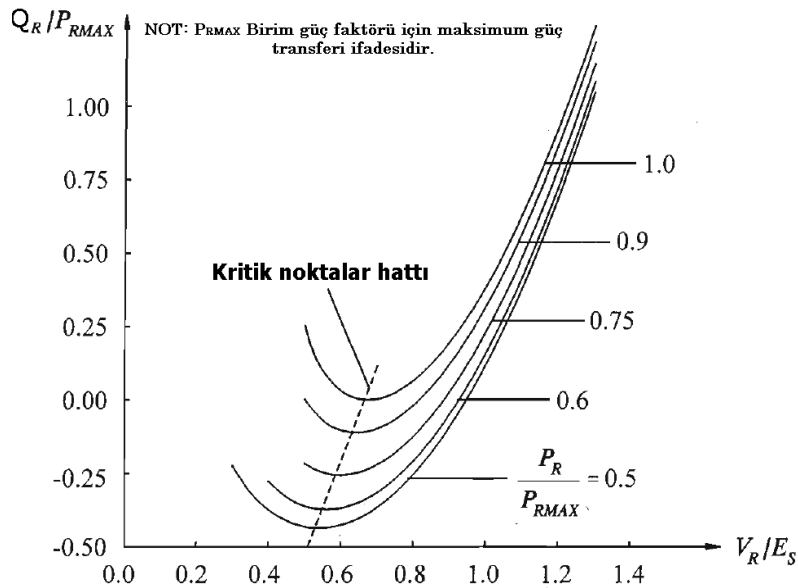
Şekil 2.11. İki Uçlu Radyal Şebeye Ait Güç-Gerilim Karakteristiği

Gerilim kararlılığı açısından P_R ve V_R arasındaki ilişki oldukça ilginçtir. Bu ilişki Şekil 2.11 'de yükün güç faktörünün 0.95 olduğu değer için gösterilmiştir.

2.8 ve 2.9 eşitliklerinde yük-güç faktörünün güç-gerilim karakteristiği üzerinde etkisi gösterilmektedir. İletim hattı üzerindeki gerilim düşümü aktif ve reaktif güçlerin bir fonksiyonu olduğu için böyle bir sonuç ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda denilebilir ki, gerilim kararlılığı aslında P,Q ve V arasındaki bir ilişkiler zincirine bağlıdır. Bu ilişkiler Şekil 2.12 ve 2.13'de verilmiştir.



Şekil 2.12. İki Uçlu Radyal Şebenin Farklı Yük Gücü Faktörlerine Ait Güç-Gerilim Karakteristiği



Şekil 2.13. İki Uçlu Radyal Şebenin Farklı P_R/P_{RMAX} Oranlarına Ait Reaktif Güç-Gerilim Karakteristiği

Şekil 2.12’de, Şekil 2.9’da verilen güç sistemi için farklı yük güç faktörleri altında P-V eğrileri gösterilmektedir. Noktalı çizgilerle çizilen hat kritik çalışma bölgesini temsil etmektedir. Normalde sistemin sadece kritik noktalarının üzerindeki çalışma noktalarında çalışması istenir. Bu noktaya yakın çalışma bölgeleri esnasında yükün karakteristiğinin ani bir değişimi (Q_R artışı- veya-yükün güç faktörünün ani düşümü), sistemi istenilmeyen, muhtemel kararsız çalışma bölgelerine, ki eğride P-V nin altında kalan kısım , götürebilir.

Hat sonundaki yüklere ve kompanzasyon cihazlarına ait reaktif güçlerin karakteristiği Şekil 2.13’de açıkça gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen eğri aileleri sabit bir P_R değeri için, V_R ve Q_R arasındaki değişim ilişkisini göstermektedir. Kararlı bölgede dQ_R/dV_R türevi pozitif iken kararsız bölgede bu türev negatiftir. Kritik noktada dQ_R/dV_R türevinin değeri 0’a eşittir. dQ_R/dV_R türevinin negatif olduğu bölgede sistemi tekrar kararlı bölgeye taşımak için yüksek Q/V kazancının sağlanacağı reaktif güç kompanzasyonu yapılmalıdır.

Yukarıdaki gerilim kararlılığı tanımı temel alınarak güç sistemleri kararlılığının farklı yönlerini anlayabilmek mümkün hale gelir. Burada örneğin anlatıldığı model, oldukça basit ve yalın bir model olduğu için gerilim kararlılığına etki edebilecek karmaşık parametre etkileri üzerinde detaylı analiz yorumları yapılamamıştır. Daha karmaşık güç sistemlerinde iletim hattının uzunluğu, güç transfer seviyeleri, reaktif güç kompanzasyon cihazlarının karakteristikleri, generatörün reaktif güç kapasite limitleri, yük karakteristikleri gibi etkiler gerilim kararlılığı üzerinde önemli etkilerde bulunur. Bazı durumlarda da birçok farklı koruma ve kontrol sistemlerinin planlanlı olmayan etkileri gerilim kararlılığı üzerinde etkili olabilmektedir.

Gerilim kararlılığı incelemelerinde aynı rotor açısı kararlılığında olduğu gibi dinamik, küçük bozucu etkiler, büyük bozucu etkiler gibi faktör ve sınıflandırmalara gidilmektedir.

2.1.2.1. Büyük bozulma etkili gerilim kararlılığı

Büyük bozulmaların olduğu gerilim kararlılığı; sistemde büyük arızalar oluşması, büyük ölçekli üretim makinalarının devre dışı kalması gibi sistemin geniş bozulmalara maruz kaldığı durumlarda gerilim kararlılığını korumak amacıyla yapılan kontrol müdahale yeteneğidir. Bu yetenek, sistemin yük karakteristiğine ve sistemin ayırık ve sürekli kontrol ve koruma elemanlarının karakteristiğine bağlıdır. Büyük ölçekli bozulma kararlılığı analizleri için sistemin lineer olmayan dinamik performansının belli bir süre izlenmesi bundan başka sistem ile kademe değiştirici trafolar(KDT), generatör alan sargı akımı sınırlayıcılarının etkileşimlerinin analiz edilmesi gerekir. Bu izleme süresi bir kaç saniyeden onlarca dakikalar mertebesinde olabilir. Dolayısıyla sistemin sağlıklı analizi için uzun dönemli dinamik sistem izlemesi yapılmalıdır.

2.1.2.2. Küçük bozulma etkili gerilim kararlılığı

Küçük bozulmaların olduğu gerilim kararlılığı, sistem yükü üzerinde giderek artan küçük bozulmaların olduğu durumlara sistemin gerilimi korumak adına cevap verebilme yeteneği olarak tanımlanır. Bu tür gerilim kararlılığının başarımı; yükün karakteristiğine, sürekli ve ayırık kontrol durumuna bağlıdır. Bu kavram sistemin küçük bozulmalara karşı vereceği cevabı kategorize etmek açısından önemlidir .

Gerilim kararsızlığı sistemde çoğu zaman tek başına bulunmaz. Bu kararsızlıkla birlikte açılı kararsızlığı birbirini tetikleyen ve bozulma zincirini devam ettiren faktörlerdir. Hangisinin hangisini ne kadar tetiklediğini ölçmek oldukça zordur. Ancak sistem üzerinde kararsızlığın açılı kararsızlığı mı gerilim kararsızlığı mı olduğunun tespit edilmesi sistemin iyileşmesi adına bulunulacak müdahalenin prosedürünün belirlenmesi açısından önemlidir[2-6,45].

2.2. Elektrik Güç Sistemlerinde Gerilim Çökmeleri

Gerilim çökmesi 10 ms. ile 1 dakikalık süre boyunca anma geriliminin efektif değerinin % 10'u ile % 90'ı arasındaki bir değere düşmesi olarak tanımlanır. %

10'luk bir gerilim çökmesi gerilimin etkin değerindeki % 10'luk bir azalma ile 0,9 birim değerlik değere düşmesi anlamına gelmektedir. Gerilim çökmesi endüstriyel ve ticari tüketicilerin en çok karşılaştığı ve etkilendiği olaylardan birisidir.

Gerilim çökmeleri enerji dağıtım sisteminde arızalar, sisteme bağlı yüklerin aniden artması, atmosferik olaylar veya asenkron motor gibi büyük bir yükün devreye girmesi sonucunda oluşabilir. Enerji sisteminde birtakım arızaları önlemek mümkün değildir. Örneğin yıldırım ve benzeri bir olay sonucu gerilim çökmesi meydana geldiğinde, gerilim anma değerinin % 50'sine kadar olan değere 4 veya 7 periyoda kadar süre için düşebilir. Bu gerilim seviyesinde bir çok yük devre dışı kalır. Gerilim çökmesinin sonucunda oluşabilecek durumlardan birisi yüklerin özellikle motorların devreden çıkması veya verimlerinin düşmesidir. Gerilim çökmelerine cihazların duyarlılığı rasgele oluşabilir. Gerilimle ilgili bozulmaların % 87 'si gerilim çökmeleri ile ilgilidir. Enerji iletim ve dağıtım sisteminde meydana gelen arızaların büyük bir çoğunluğu tek faz nötr arızalarıdır.

Gerilim çökmesi, kesilmesi ve dalgalanmasını hesaplamak için iki tip standart vardır. Bunlar IEC 61000-4-30 [2] and IEEE Std. 1159-1995 [3]'dir. Bunlardan IEC 61000-4-30 [13] standardında;

- a. Bir elektrik sistemindeki gerilim çökmesi geçici olarak gerilimin belirli bir eşik değerinden aşağı doğru azalmasıyla meydana gelir.
- b. Gerilim kesilmesi, bir elektrik sisteminde gerilimin belli bir eşik değerinden azalmasıyla oluşur.
- c. Gerilim yükselmesi ise bir elektrik sisteminde gerilimin geçici olarak belli bir eşik seviyesinden artmasıyla meydana gelir.

tanımlamalara sahipken;

IEEE Std. 1159-1995 [13] standardında belirtilen tanım şu şekildedir;

- a. Gerilim çökmesi bir dakika içinde yarım periyotluk güç frekansında gerilimin etkin değerinin 0.1 ve 0.9 pu arasında azalmasıdır.
- b. Gerilim kesilmesi 3 sn. ve yarım periyot arasındaki bir zaman diliminde bir veya daha fazla ki fazda kısa süreli olan gerilim kaybıdır.

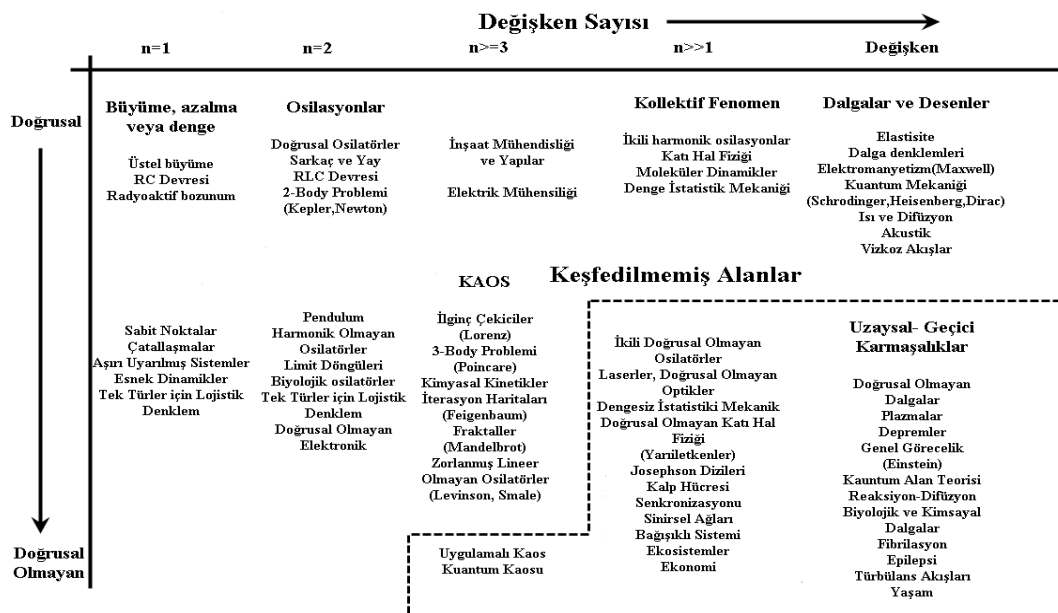
- c. Gerilim yükselmesi bir dakika içindeki yarım periyotluk güç frekansında gerilimin artmasıdır.
- d. Gerilim çökmesi üç fazın eşik değerinin üzerinde bulunduğu zaman ve fazlardan birinin eşik değerinin altına indiği zaman gerilim çökmesi başlar [2,7]. Gerilim çökmesindeki eşik değeri referans geriliminin %90 seçilir.
- e. Gerilimde ki kesilmeler bir fazın eşik değerinin üzerinde olduğu ve üç fazın eşik değerinin altında olduğu durumlarda başlar [2,7]. Gerilim kesilmesindeki eşik değeri referans geriliminin %10 seçilir.

Gerilim yükselmesi üç fazın eşik değerinin altında olduğu ve bir fazın eşik değerinin üzerinde olduğu ve en az bir fazın eşik değerinin üzerinde olduğu zaman gerilim yükselmesi başlar [2,7]. Gerilim yükselmesindeki eşik değeri referans geriliminin %110 seçilir.

BÖLÜM 3. ÇATALLAŞMA TEORİSİ VE ÇATALLAŞMA NOKTALARININ DİNAMİK TESPİT EDİLMESİ ALGORİTMALARI

3.1. Dinamik Sistemler Teorisi

Genel olarak bir sistem çok sayıda yalın bileşen kombinasyonundan oluşan tekil bir varlıktır. Durum olarak adlandırılan, bu yalın bileşenler birbirleriyle belli değişken kümeleri dahilinde ilişkili olup, sistemin herhangi bir zamandaki bütünsel durumunu temsil ederler. Bu açıklamalar dahilinde dinamik sistem, durumu zamanla değişen bir sistem, dinamik sistemler teorisi de değişen bu sistem davranışının matematiksel ilişkilerini belirlemekle ilgilenen bir teori olarak tanımlanabilir. Şekil 3.1’de dinamik sistemler genel olarak, doğrusallık ve değişken sayısı matrisi eşliğinde kategorize edilmiştir. Bu kategori matrisinde keskin sınırlar olmamakla beraber dinamik sistemlerin genel bir çerçevesi çizilmiştir. Çizilen bu çerçevede de görüldüğü üzere çatallaşmalar, limit döngüler ve tuhaf çekiciler değişken sayısının 1, 3 ve 5 arası olan doğrusal olmayan dinamik sistem analizlerinde kullanılır.



Şekil 3.1. Dinamik Sistemlere Genel Bir Bakış

Dinamik sistemler teorisi, temelleri geçen yüzyılda atılmış olan modern bir alandır. Bugün bu alan üzerinde, teorik ve uygulamalı olmak üzere yoğun çalışmalar yapılmakta ve bu alana olan ilgi her geçen gün daha da artmaktadır. Bu teorinin temel başarım koşulu, dinamik sistemlerin durum kümelerinin sistemin gelecekte davranışının nasıl olacağını doğru bir şekilde öngörüsünü yapacak zengin bir matematiksel tanımlamasının yapılmış olmasıdır. Yeterince zengin olarak matematiksel modeli oluşturulan dinamik bir sistemin herhangi bir zamandaki durumu, sistemin başlangıç durumu ve mevcut girdilerine bağlı olarak ele alınan sisteme uygun dinamik analizinin yapılmasıyla öngörülebilir[57,58,88].

Fen ve mühendisliğin bir çok alanında dinamik sistemler

$$\dot{x} = f(x, \lambda, m) \quad (3.1)$$

formunda ifade edilen lineer olmayan adi difansiyel denklem takımlarıyla temsil edilmektedir. Burada x , n -boyutlu durum vektörü, λ ve m bağımsız parametreler ve f de n boyutlu lineer olmayan fonksiyonlar vektörüdür. Dinamik sistemler çekiciler, limit döngüleri, zıplama fenomeni, histerisis, frekans kilitleme ve kaos gibi ilginç lineer olmayan dinamik davranışlara ev sahipliği yapmaktadırlar. Çatallaşma teorisi doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde anahtar rol oynamaktadır. Böyle ilginç ve açıklanması zor görünen davranışlar sistemin çatallaşma dinamiklerinin ortaya çıkarılmasıyla mümkün hale getirilebilir. Bu da, (3.1) denklemiyle verilen sistemin $(n+m)$ boyutlu durum parametreleri uzayındaki denge ve periyodik çözümlerinin varlığına neden olan, bu çözümlerin kaybolmasını sağlayan veya çözümlerin kararlılığını değiştiren tüm kritik noktalarının tespit edilmesiyle elde edilebilir.

Çatallaşma teorisi ile elde edilen sonuçlar bu çatallaşma noktaları çevresinde sistemin muhtemel dinamik davranışlarını anlamlandırmak için kullanılır. Bu bağlamda tüm çatallaşma analizleri sistemin tüm denge ve periyodik çözümlerinin tespit edilmesiyle başlar. Sistemin denge çözümleri, durum-parametreleri uzayında yüzeyler oluştururlar. Örneğin 1 durum değişkeni ve 2 parametreye sahip, $(1+2)$ boyutlu durum parametresi uzayındaki bir sistem 2 boyutlu bir denge çözümü yüzeyi oluşturur. Bundan büyük boyutlardaki çok parametli sistemler için denge çözümlerinin hesaplanması ve görsel hale getirilmesi oldukça zor bir süreçtir. Çatallaşma diyagramları, böyle bir hedefi yerine getirmek için, sistemin denge

çözümleri eğrilerinin çatallaşma parametresi olarak seçilen parametre dışında diğer tüm parametrelerin sabit bir değeri alınarak , bu parametrenin farklı değerlerinde çözüm eğrilerinin değişimini ortaya koyan bir gösterim biçimidir. Sistem parametreleri arasında çok sayıda çatallaşma parametresi ayrı ayrı ele alınarak sistemin genelini ifade edecek bir portre elde edilebilirken, iki parametre ve üç parametrelilik dinamik çatallaşma algoritmaları kullanılarak daha az sayıda diyagramla sistemin durum kestirimi yapılabilmektedir.

3.1.1. Durum uzayları ve vektör alanlar

Dinamik sistemlerde adi (ordinary) ve parçalı (partial) diferansiyel denklemler olmak üzere iki tür diferansiyel yoğun olarak incelenir. Durum uzayları ve vektör alanlarını daha detaylı açıklamak için harmonik osilatör olarak adlandırılan sarkaç dinamiği incelenecektir. Buna göre sarkaç dinamiğinin modeli aşağıdaki formda yazılabilir;

$$f(x) = m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx \quad (3.2)$$

Bu ifadede t ile gösterilen bir adet bağımsız değişken olduğu için adi diferansiyel formunda bir denklemdir.

$\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ türev ifadesi olmak üzere ve x_1, x_2, \dots, x_n sistemin durum değişkenlerini temsil etmek üzere

$\dot{x}_1 = x_2$ dönüşümü (3.2) denklemini içerir;

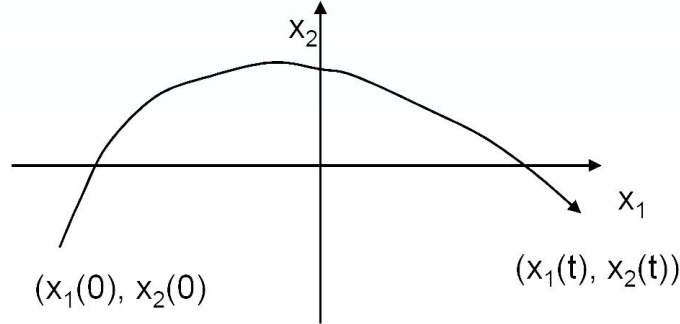
$m \dot{x}_2 = -bx_2 - kx_1$ elde edilir. Bu ifade de tekrar düzenlenirse

$$\dot{x}_2 = -\frac{b}{m}x_2 - \frac{k}{m}x_1 \quad (3.3)$$

ifadesi yazılabilir.

Bu sarkaç dinamiği denkleminde belli ilk koşullar için $x_1(t)$ ve $x_2(t)$ şeklinde bir çözümümüz olduğunu varsayalım. Bunlar sırasıyla sarkaçın pozisyonunu ve hızını belirler. Buna göre (x_1, x_2) koordinatlarında durum uzayında $(x_1(t), x_2(t))$ çözümü bir eğri boyunca hareket eden bir noktaya karşılık gelir. Bu eğriye yörünge (trajectory) adı verilir. Bu eğrinin bulunduğu uzaya da durum (state space) veya faz

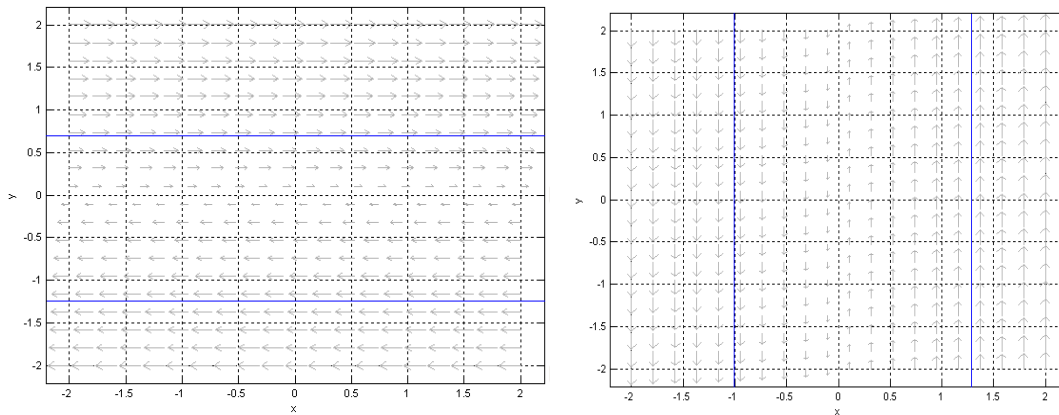
uzayı (phase space) adı verilir. Şekil 3.2’de bu dinamik sisteme ait durum uzayından bir yörünge gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Harmonik Osilatörün Durum Uzayından Bir Yörünge Gösterimi

(3.1) ifadesinde verilen dinamik bir sistemin davranışları analiz edilirken sistemin başlangıç koşullarıyla başlayan eğrisinin hesaplanması gerekir. Çoğu zaman sistemin tüm eğrilerini hesaplamaya gerek yoktur. (3.1) ifadesinde eşitliğin sol tarafında kalan türevli ifade sistemin durum değişkenlerinin değişim hızlarını temsil eder. Bu durum değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilen bir vektördür. O halde bu eşitlik durum uzayının her noktasında bir vektöre karşılık gelir. Böylelikle bu dinamik sistemin analizi, sistemin vektör alanlarının incelenmesiyle yapılabilir. (3.1) ifadesinin sol tarafında kalan türevli ifadenin sifıra eşit olduğu yerler dinamik sistemin denge noktalarını temsil eder. Aşağıda $y = \frac{dx}{dt}$, $x = \frac{dy}{dt}$ ve $y + 6 = \frac{dy}{dx}$

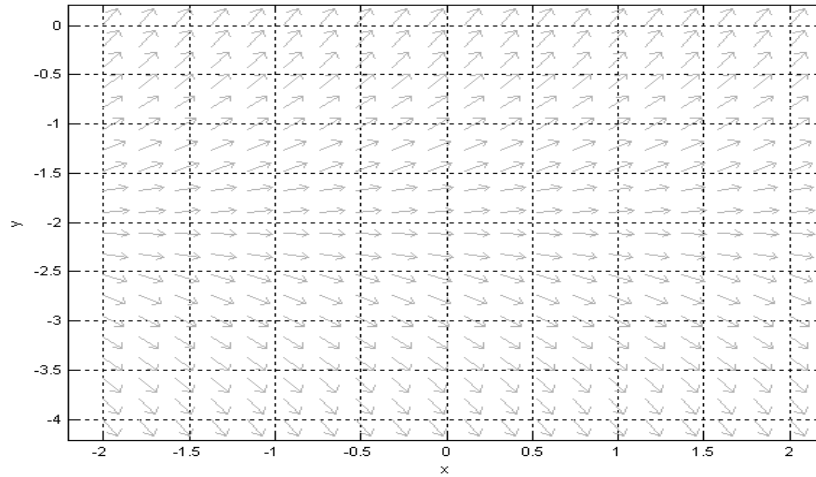
’e ait vektör alan çizgileri(vector/direction fields) sırasıyla gösterilmiştir;



(a)

(b)

Şekil 3.3. a)- $y = \frac{dx}{dt}$ ye Ait Vektör Alan Çizgileri b)- $x = \frac{dy}{dt}$ ye Ait Vektör Alan Çizgileri



Şekil 3.4. $y+2=dy/dx$ ye Ait Vektör Alan Çizgileri

Vektör alanlarının davranışı durum uzayında bölgeden bölgeye değişebilir veyahut sistemin belli aralıklarda birden fazla denge noktası olabilir. Bu durumda vektör alanları lokal olarak incelenir. Başka bir ifadeyle, vektör alanları lineer bölgelere bölünür ve herbir bölge ayrı ayrı incelenerek sistemin geneli üzerinde davranışları açığa çıkartılır. Bu lokal analiz yapılırken sistemin jakobiyen matrisinden yararlanır[83]. Vektör alanlarının temel özellikleri jakobiyen matrisinin denge noktalarındaki özdeğerleri incelenerek yapılır. Aşağıdaki gibi verilen bir sistem için;

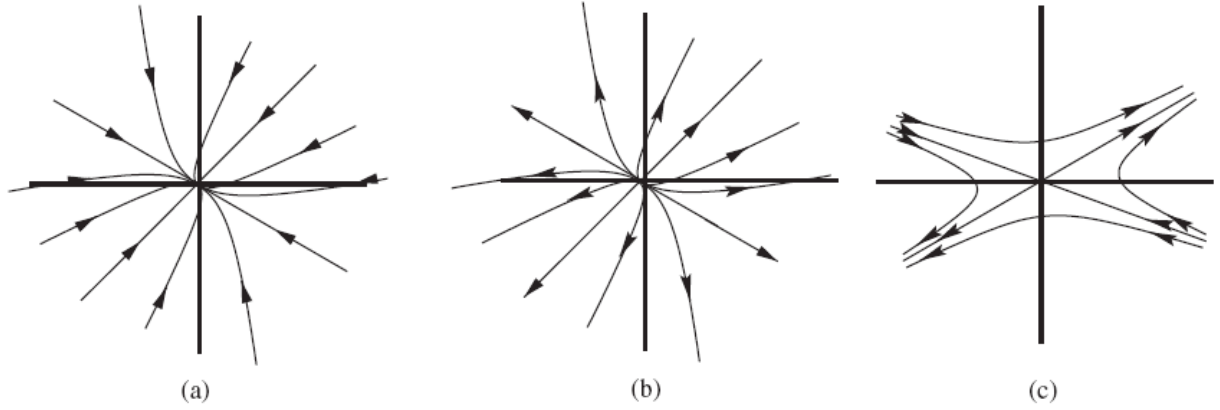
$$\begin{aligned} \dot{x} &= f_1(x, y) \\ \dot{y} &= f_2(x, y) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Denge noktaları x^* ve y^* olsun. Sistemin denge noktalarındaki jakobiyen matrisi

$$F(x^*, y^*) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

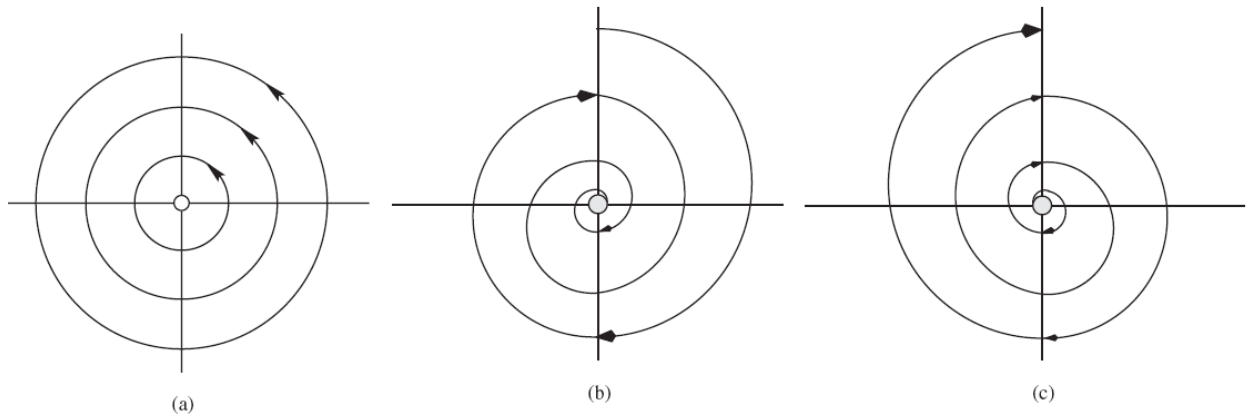
şeklinde yazılabilir. Sisteme ait özdeğerler negatif ise sistem kararlı, pozitif ise sistem kararsızdır denir. Bazı özdeğerler reel ve negatif iken bazıları reel ve pozitif ise sistem özdeğerleri negatif ve reel olan bölgelerde kararlı diğer yerlerde kararsızdır[58]. Özdeğerlerin reel kısımları yok sadece imajiner kısımları varsa

sistem sönümlenme yapmadan salınım yapar. Buna merkez denir. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da bu durumlar gösterilmiştir.



Şekil 3.5. İki Boyutlu Durum Uzayındaki Vektör Alanlar Çizgisel Örnekler

a)- çekici: her iki özdeğer negatif ve reel b)- itici: her iki özdeğer pozitif ve reel c)- saddle-eğir durumu : bir özdeğer negatif ve reel diğer özdeğer pozitif ve reel



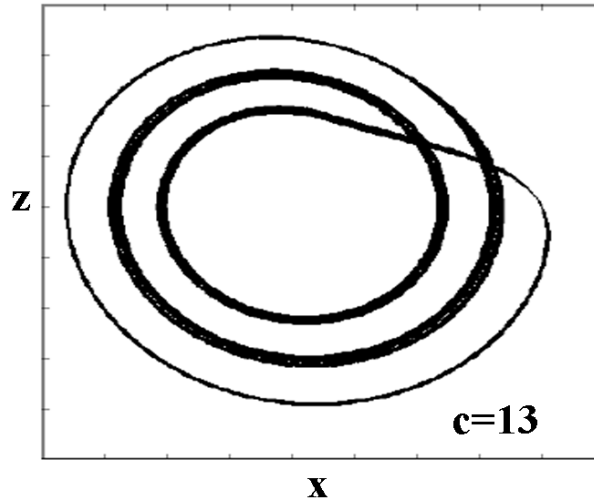
Şekil 3.6. İki Boyutlu Durum Uzayındaki Vektör Alanlar Spiral Örnekler

a)- spiral yapıda merkez: özdeğerlerin sadece imajiner kısımları mevcuttur. b)- spirial yapıda çekici: özdeğerlerin reel kısmı negatif ve kompleks eşleniktir c)- spirial yapıda çekici: özdeğerlerin reel kısmı pozitif ve kompleks eşleniktir

3.1.2. Faz portreleri

Faz portresi dinamik bir sistemin faz uzayındaki yörüngelerinin geometrik temsili olarak tanımlanabilir. Herbir başlangıç şartları kümesi farklı bir eğri veyahut bir nokta ile temsil edilir. Faz portreleri dinamik sistem analizlerinde olmazsa olmaz bir fenomendir. Bu portreler sistemin durum uzayındaki tipik yörünge çizimlerinden

meydana gelir[88]. Bu yörüngeler sistemin seçilen parametreler için çekici bir sistem mi, itici bir sistem mi veyahut limit döngüsü içerisinde mi gibi hayati sorularına net cevaplar verir.



Şekil 3.7. Rössler Osilatörüne ait $c=13$ değerinde x - z Faz Portre Gösterimi

Dinamik sistemlere ait faz portreleri sistemin yörüngelerini (oklarla) sürekli hal durumlarını (noktalarla) ve kararsız sürekli hal davranışlarını (çemberlerle) temsil eder. Faz portrelerinin eksenleri sistemin durum değişkenlerinden oluşur. Şekil 3.7’de Rössler osilatörüne ait x - z durum değişkenleri için faz portresi gösterimi verilmiştir.

3.2. Çatallaşmalar

Çatallaşma olayı doğal bilimlerde çok önemli bir rol oynamaktadır. Doğal bilimlerde nitel hareketi değişen birçok sistem vardır. Nitel hareketin değişimi, sistemin denge noktalarının sayısının veya sistemin karalılığının değişimini ifade etmektedir. Bu değişimler sistemin içerdiği parametrelerin kritik değerlerinde meydana gelir. Sistemde değişime neden olan kritik parametre değerlerine çatallaşma noktaları denir. Bu bağlamda çatallaşma, sistemin nitel hareketini değiştirmesi olayıdır. Sonuç olarak doğal bilimlerde, sistemler genelde bir veya birden fazla parametre içerdiğinden, çatallaşma problemini içeren birçok olayla karşılaşırız. Örneğin, bir eksen etrafında dönen bir akışkanının belli açısal hızlarda daha önceden

var olan denge durumunu değiştirerek yeni denge durumları oluşturduğunu, yani hareketini değiştirdiğini gözlemleriz. Burada akışkanın açısal hızını sistemin parametresi olarak dūřünebiliriz. Bu durumda akışkanın denge durumunu değiştiren açısal hız değerleri de bu sistemin çatallaşma noktalarını temsil eder. Bu olay çatallaşma olayını açıklamak için kullanılan iyi bir örnek olup, bu teorinin oluşturulduğu ilk yıllarda çok incelenmiş olan bir olaydır[88].

3.3. Çatallaşma Teorisi

Çatallaşma teorisi, dinamik sistemler teorisinin bir alanı olup bu teori dinamik sistemlerde faz portresi ailelerinde, parametre ailelerinin değişmesiyle meydana gelen niteliksel değişimleri inceler. Bu değişimlerin yapısında oldukça yüksek karmaşalar mevcuttur. (3.1) denkleminde ifade edilmiş bir dinamik sistemi ele alalım. Burada x , n boyutlu bir durum vektörü, λ ise zamanla değişen sistem parameteresini temsil etsin. λ değiştikçe durum vektörü x ve onun jakobiyen matrisi olan df/dx in özdeğerleri de değişir. Denge noktasında \dot{x} sıfır olur.

$$\dot{x} = f(x, \lambda) = 0$$

Çatallaşma teorisi λ değiştikçe $x(\lambda)$ çözümlerinin nasıl atallaştığı ile ilgilenir.

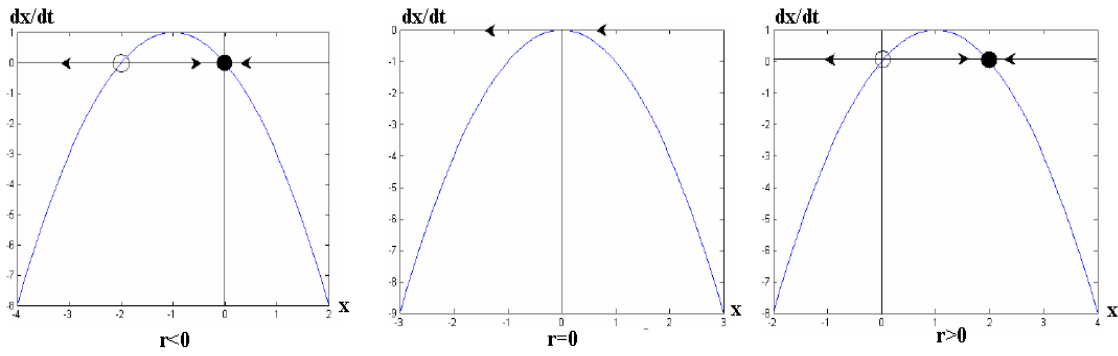
3.3.1. Transkritik atallaşma

Bazı durumlarda sistem parametresinin her değeri için bir denge noktası vardır.

Örneğin

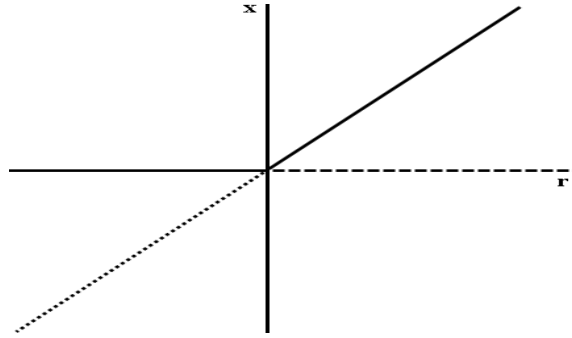
$$\dot{x} = rx - x^2 \tag{3.6}$$

dinamik sistemi için r 'nin her değeri için $x=0$ 'da denge noktası vardır. $r<0$ için $x=r$ için kararsız bir denge noktası ve $x=0$ için kararlı bir denge noktası vardır. $r=0$ da iki denge nokta çarpışır ve $r>0$ için $x=r$ kararsız denge noktasına dönüşür. Transkritik atallaşmada denge noktası kaybolmaz fakat kararlı ve kararsız denge noktaları çarpışmadan sonra yer değiştirir.



Şekil 3.8. Transkritik Çatallaşmasında Çeşitli Parametre Durumları

Transkritik çatallaşmasına ait yukarıdaki üç parametre durumunu temsil eden çatallaşma diyagramı aşağıdaki gibidir.



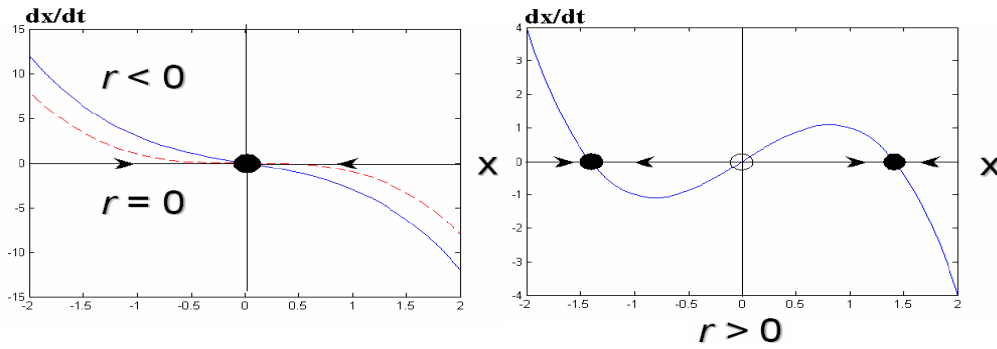
Şekil 3.9. Verilen Sistem İçin r-Parametresine Göre Çatallaşma Diyagramı

3.3.2. Pitchfork çatallaşması

Pitchfork çatallaşması sistemdeki simetrisle ilişkilidir. Örneğin normal formu

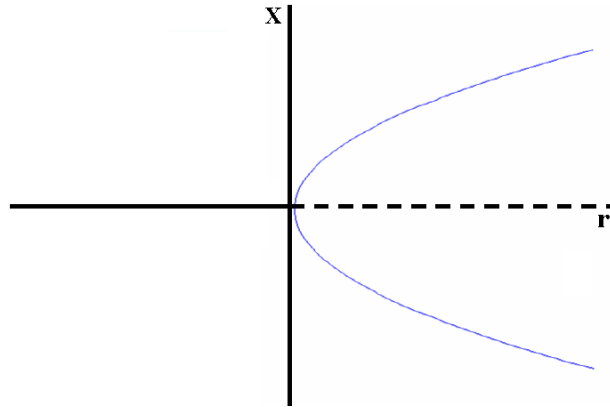
$$\dot{x} = rx - x^3 \quad (3.7)$$

olan bir sistemi ele alalım. Burada $r < 0$ iken denge noktası orjindedir ve kararlı bir haldedir. $r = 0$ olduğunda orjin hala kararlıdır fakat güçlü değildir. $r > 0$ olduğunda orjin kararsız hale gelmektedir. Burada $x = \pm\sqrt{r}$ noktasında iki yeni denge noktası oluşur oluşan bu noktalar birbirlerine göre simetriktir.



Şekil 3.10. Pitchfork Çatallaşmasında Çeşitli Parametre Durumları

Pitchfork çatallaşmasına ait yukarıdaki üç parametre durumunu temsil eden çatallaşma diyagramı aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.11. Verilen Sistem İçin r -Parametresine Göre Çatallaşma Diyagramı

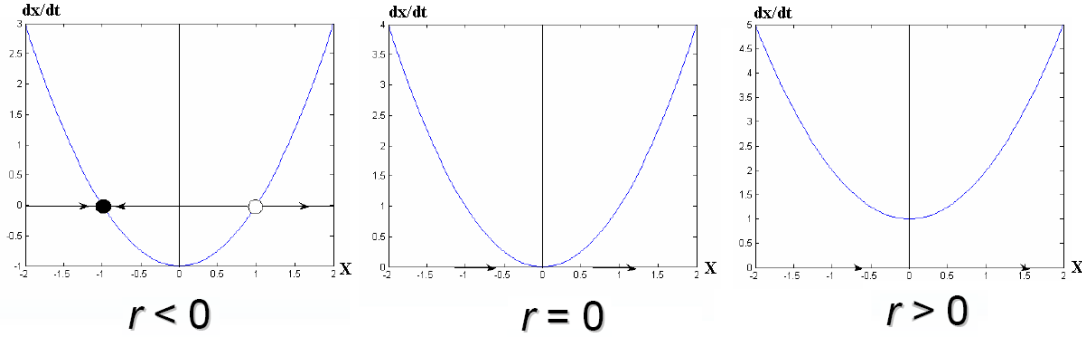
3.3.3. Eyer noktası çatallaşması (Saddle node bifurcation-SNB)

Bu çatallaşma türünde sistem parametresi değiştikçe sistemin denge noktaları birbirine doğru gelir, çarpışır ve yok olur. Eyer noktası çatallaşmasında sistem jakobiyen matrisinin özdeğerlerinin reel kısmı sıfır veya özdeğerleri imajiner eksen kesen bir çift karmaşık eşlenik şekindedir[59,38]. Örneğin normal formu

$$\dot{x} = r + x^2 \quad (3.8)$$

olan bir sistemi ele alalım. Burada r sistem parametresidir. Bu parametre pozitif, negatif veya sıfır olabilir. r negatif olduğunda iki adet denge noktası oluşur. Bunlardan biri kararlı ise diğeri kararsızdır. $r=0$ 'da denge noktaları yarı kararlı sabit bir noktada birleşirler. Bu nokta oldukça hassastır. $r>0$ olur olmaz denge noktaları

kaybolur. Burada $r=0$ 'da çatallaşma meydana gelir. $r<0$ ve $r>0$ 'da vektör alanları birbirinden çok farklıdır. Aşağıdaki şekilde bu farklar açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.12. Eyer Noktası Çatallaşmasında Çeşitli Parametre Durumları

Eyer noktası çatallaşması en basit çatallaşma tipidir. Bu çatallaşma sabit noktaların (fixed points) nasıl ortaya çıktığını ve nasıl ortadan kalktığını göstermektedir[63,84,88]. Bu çatallaşmanın formu şu şekildedir;

$$\dot{x} = \mu - x^2 \quad (3.9)$$

Çatallaşma denge çözümleri $\mu > 0$ için oluşur ve $x = \pm\sqrt{\mu}$ dir.

Burada $x = +\sqrt{\mu}$ kökü kararlı olduğu halde $x = -\sqrt{\mu}$ kökü kararsızdır.

Eyer noktası çatallaşma şartı aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$f(x^*, \mu) = 0$$

$$\frac{df}{dx} = 0, \frac{df}{d\mu} = 0, \frac{d^2 f}{dx^2} = 0 \quad (3.10)$$

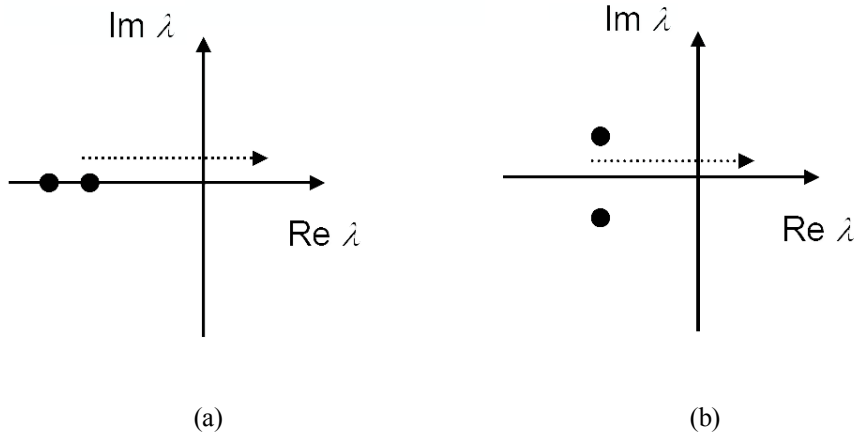
3.3.4. Hopf çatallaşması (Hopf bifurcation-HB)

Eyer noktası çatallaşmasında sisteme ait jakobiyen matrisinin özdeğerlerinin reel kısmı sıfır veya özdeğerleri imajiner eksenini kesen bir çift karmaşık eşlenik şeklindeki. Hopf çatallaşması, hiçbir zaman sıfır olmayan hızla reel eksene geçen dinamik jakobiyenin 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.

λ parametresi değiştiği zaman kompleks eşlenik bir çift ya sağa yada sola imajiner eksenden hareket eder. Bu durumda kararlı veya kararsız, sistem salınımları da denilen limit döngüler gözükecek yada gözden kaybolacaktır. 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 kümesini 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.

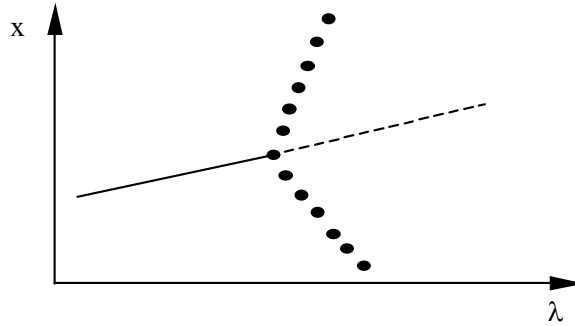


Şekil 3.13. a)- Eyer Noktası, Transkritik ve Pitchfork Çatallaşmaları İçin Özdeğerlerin Genel Değişim Profili b)- Hopf Çatallaşmaları İçin Özdeğerlerin Genel Değişim Profili

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 [63,84,88].

3.3.4.1. Üst kritik hopf çatallaşması

Çatallaşmanın her iki kısmı üzerinde yerel olarak kararlı çözümlere sahiptir. Bu yüzden bir üst kritik hopf çatallaşması, limit döngü ve durağan kol arasındaki kararlılığın değişimine dahil edilebilmektedir. Kararlı bir limit döngü çatallaşmada üretilir ve kararlı bir denge noktası, sonunda kararlı limit döngü çekici bölgesinde, artan genlikli salınımlarla kararsız duruma geçmektedir(Şekil 3.14).

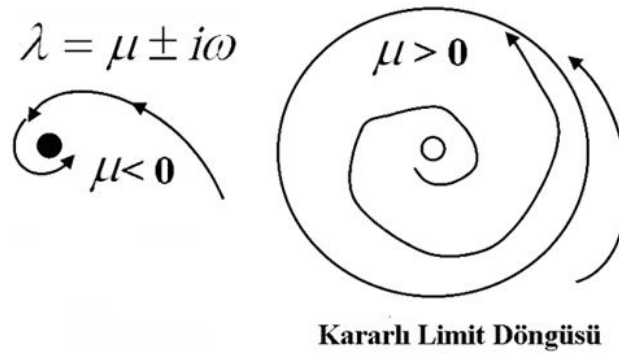


Şekil 3.14. Üst kritik Hopf çatallaşması

Bundan başka aşağıda verilen dinamik sistem için hopf çatallaşması analizi yapılırsa;

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \mu \cdot r - r^3 \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega - br^2 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Burada, $\mu = \text{Re}(\lambda)$ başlangıç azalması yavaşlamaya başlar ve μ_c kritik değerinden itibaren artış yönünde değişime uğrar.



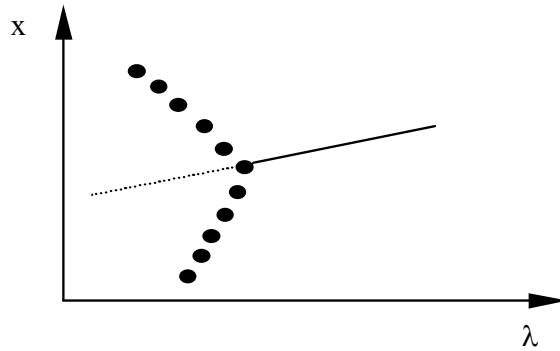
Şekil 3.15. Üst kritik Hopf Çatallaşmasının Kararlılık Değişimi ve Oluşan Limit Döngüler

Bu noktadan itibaren salınımlar küçük genlikli sinusoidal ve limit döngülü işaret formunda oluşmaya başlar. Bu dinamik sistem için sabit noktanın kararlılığını μ parametresi belirlerken, ω parametresi salınımın frekans ve yönünü belirler ve b parametresi ise daha büyük salınımlarda frekansın genlik üzerindeki bağımlılığını belirler.

3.3.4.2. 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 3.16).

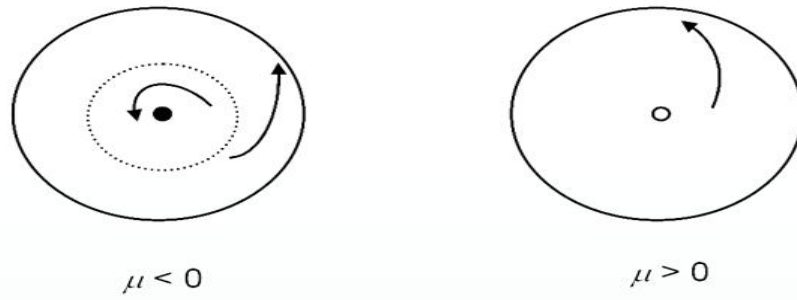


Şekil 3.16. Alt kritik Hopf çatallaşması

Aşağıda verilen dinamik sistem için hopf çatallaşması analizi yapılırsa;

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \mu r + r^3 - r^5 \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega + br^2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Burada küplü terimin işaret değişimi sistemin kararlılığını doğrudan etkiler. $\mu < 0$ için iki adet çekici (attractor) vardır. Bunlardan biri kararlı bir limit döngüsü diğeri orjinde oluşan kararlı sabit noktadır.

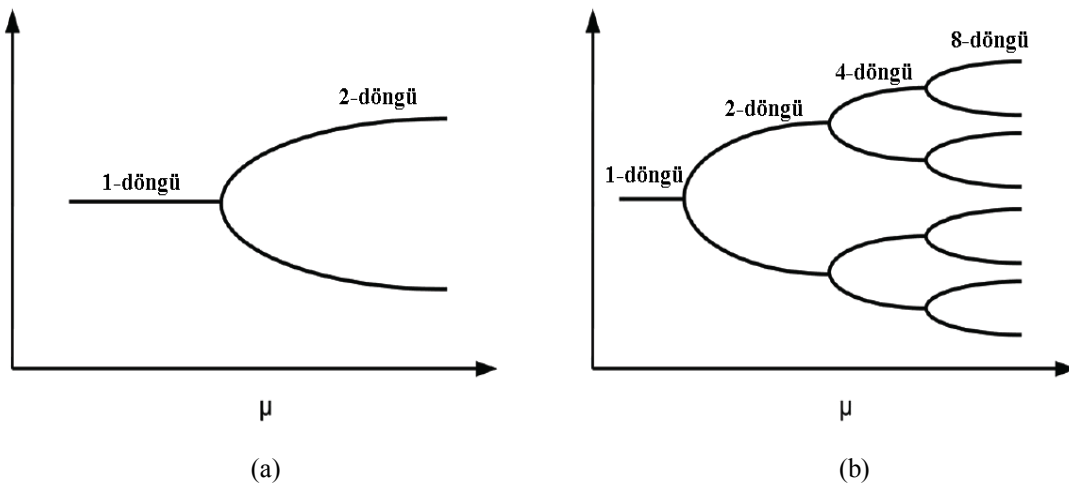


Şekil 3.17. Alt kritik Hopf Çatallaşmasının Kararlılık Değişimi ve Oluşan Limit Döngüler

Bunların arasında kararsız bir limit döngüsü daha vardır. μ sıfıra giderken kararsız limit döngü azalmaya başlar ve orjine doğru çekilmeye başlayarak orjini kararsız hale getirir.

3.3.5. Periyot ikiye katlama çatallaşması (Period doubling bifurcation-PDB)

Kararlı bir periyot- k döngüsü ($k \geq 1$), μ parametresinin $\mu = \mu_0$ noktasına ait değerinden itibaren kararlılığını kaybedip, period- $2k$ 'da aynı noktada kararlılığını tekrar kazanıyorsa genel olarak $\mu = \mu_0$ 'da sistem periyodik ikiye katlamalı bir çatallaşmaya sahiptir denir. Bu sistemin değişim zincirinde sistemin bazı şartları altında μ 'nün daha geniş aralıklarında incelemeler devam ettirilirse bu periyodik katlamaların çok sayıda olduğu da görülebilir. Bu tür periyot çatallaşmalarına kaskat periyodik çatallaşmalar adı verilir[87,88,56]. Aşağıdaki şekilde 2 döngülü ve 8 döngülü periyodik çatallaşma örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.18. a)- Periyot-1 den Periyot-2 'ye Katlamalı Çatallaşma b)- Periyot-1 den Periyot-2 'ye, Periyot-4 ve Periyot-8'e Kaskat Katlamalı Çatallaşma

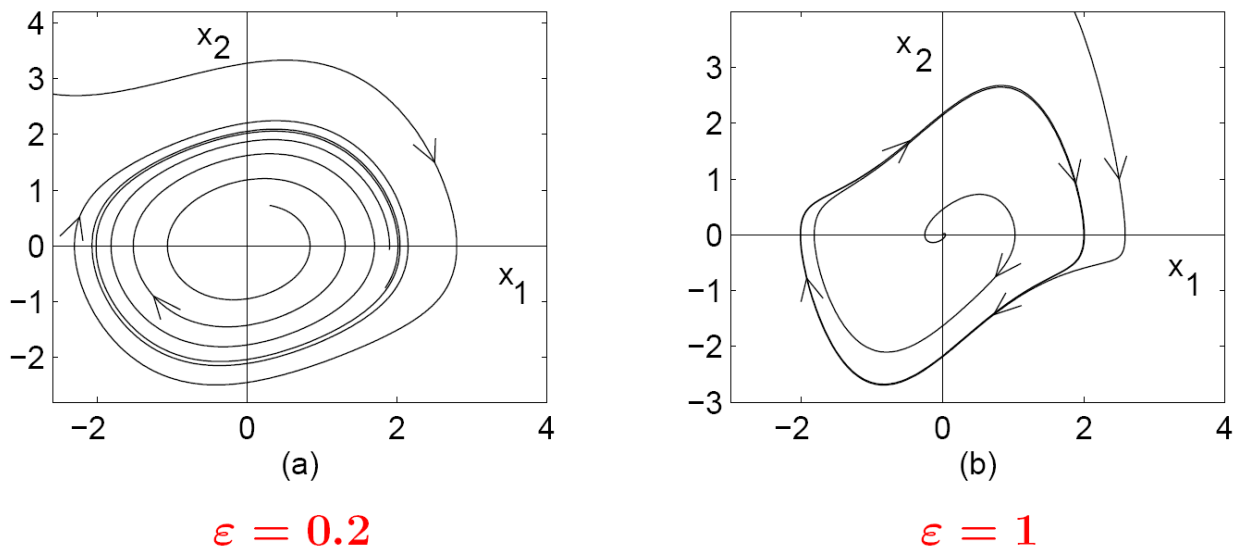
3.3.6. Limit döngüleri (Limit cycles) ve periyodik yörüngeler

Limit döngü, komşu yörüngelerinin kapalı olmadığı spiral olarak bu döngüye yaklaşan veya bu döngüden uzaklaşan bir geometriye sahip olduğu, izole ve kapalı bir yörüngeyi belirtir. Buradan limit döngülerin sadece doğrusal olamayan sistemlerde görülebileceğini söylemek gerekir. Doğrusal sistemlerde kapalı yörüngelere sahip salınımların etrafındaki döngülerde kapalı yörüngelere sahip olur. $f(\theta) = dt\theta/dt$ de olduğu gibi. Kararlı bir limit döngü tek olup, etrafındaki tüm yörüngeleri kendi üzerine doğru çeker[86-88]. Vanderpol osilatörü dinamik sistemini ele alacak olursak;

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -x_1 + \varepsilon(1 - x_1^2)x_2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

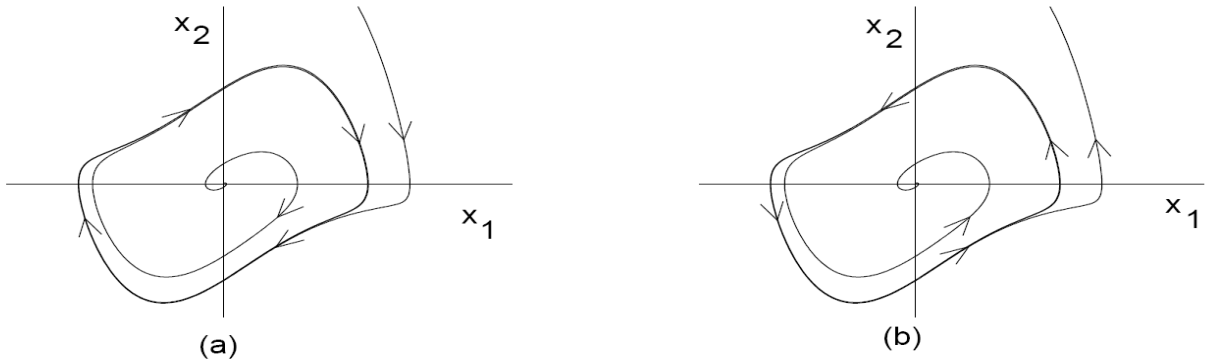
ε 'nun farklı değerleri için faz portrelerinde meydana gelen limit döngülerini inceleyelim.

Buna göre;



Şekil 3.19. Vanderpol Osilatörünün Faz Portresi Üzerinde Oluşan Limit Döngüler

Yukarıdaki şekilde Vanderpol osilatörü için ε 'nin farklı değerlerinde meydana gelen limit portreleri görülmektedir. Buna göre ε 'nin 0.2 değerinde sistem dinamiklerinden meydana gelen osilasyonlar ε 'nin 1 değeri için kararlı limit döngüsüne dönüştüğü görülür.



Kararlı Limit Döngü

Kararsız Limit Döngü

Şekil 3.20. Kararlı ve Kararsız Limit Döngülerin Sarmal Yapısı

Kararlı bir limit döngüye sahip bir sistem kendi iç dinamiklerinden kaynaklanan salınımlara sahip olurlar. Biyolojik süreçlerin çoğunda buna benzer döngüler sıklıkla görülür. Kararsız limit döngülerde komşu yörüngeler bu döngüden itmeye maruz kalır. Yarı kararlı döngülerde ise komşu yörüngelerin bir kısmı itilirken bir kısmı döngüye girdap gibi çekilir.

Dinamik bir sistemde periyodik yörünge ise, denge noktası bulunmayan kapalı çözüme sahip

herhangi bir eğri olarak tanımlanabilir. T periyodik yörüngesi $\varepsilon > 0$ için U gibi bir komşuluğa sahipse kararlı olup, değilse kararsızdır denir.

3.3.7. Tuhaf çekiciler(Strange attractor)

Tuhaf çekici, modern bilimin en önemli buluşlarından biri olan faz uzayında meydana gelmektedir. Faz uzayı sayıları resime dönüştürür, hareket halindeki mekanik ya da akışkan bir sistemden bütün temel bilgileri, en küçük ayrıntısına kadar çekip çıkarır ve kendi imkanlarının hepsini esnek bir yol haritası çizip bunun

üstünde gösterir. Genellikle, pratik açıdan kaos olayı, denge noktaları, periyodik çözümler ve yaklaşık periyodik çözümler gibi üç adet sürekli hal davranışlı kategorilerin içine girmeyen ancak sürekli hal davranışıyla sınırlanmış durum olarak tanımlanabilir. Denge noktaları sıfır değerinde iken periyodik çözümler tek boyutludur. Tuhaf çekiciler çok daha karmaşıktır ve boyutları da çok ufaktır. Sistem hiçbir zaman aynen tekrar etmediği için, yörünge kendi kendisiyle asla kesişmez. Tam tersine sonsuza kadar kendi etrafında sarsılmaya devam eder. Kaos, karmaşıklığın temelinde yatan muazzam ve hassas yapıyı yakalayabilmek için hem bilgisayar kullanımında özel bazı teknikler hem de birtakım özel grafik resim ve çizgi türleri icat etmiştir. Yeni bilim kendi dilini de üreterek fraktallar, çatallaşmalar, periyodiklikler gibi kendine özgü terimler kullanmaya başlamıştır. Nasıl klasik fizikte maddenin yeni elemanları kuark ve glüonlar ise, bunlar da kaos hareketinin yeni terimleridir. Bazı fizikçilere göre, kaos bir durumun bilimi değil, bir oluşumun bilimidir .

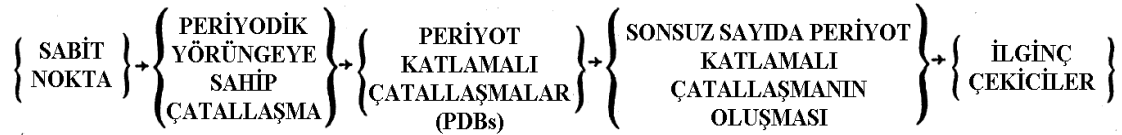
Bu nesnelerin garip olarak adlandırılmalarının bir nedeni, bunların görünüşte karşıt iki etkiyi bağdaştırmalarıdır. İlk olarak yakındaki yörüngelerin üzerlerine yakınsadığı anlamına gelen “yakınsak”lılar ve bununla beraber, yakınsakta yakın yörüngelerin birlikte hızla ıraksadığı anlamına gelen ilk şartlara hassas bağımlılık gösterirler. Bu görünür zıtlık, garip yakınsakların ana geometrik özelliklerinden biri, yayılma ve daralmanın bir kombinasyonu tarafından bağdaştırılır. Kaotik sistemin hareketi, yakın noktaları alacak ve onları kesin bir yönde yayacaktır. Böylece yerel ıraksamanın yaratılışı, tahmin edilemezlikten sorumlu olur. Fakat sistem ayrıca farklı yönlerdeki yörüngelerin yakınsamasına yol açan bazı uzaklıklardaki noktaların birlikte katlanması şeklinde de davranır.

3.4. Periyodik Yörüngelerin Tuhaf Çekicilere Dönüşmesi Örnekleri

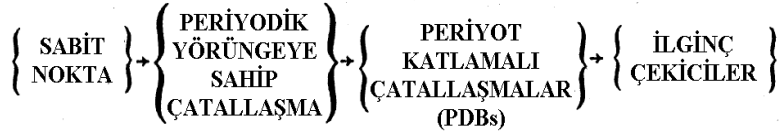
Hopf ve eyer noktası çatallaşmaları gibi sistem üzerinde belirgin etkileri olan çatallaşmalarda sistemi bu kritik noktalara götürecektir rotaların tespit edilmesi önemli bir erken müdahale aşamasıdır. Periyodik yörünge analizi bu amaçla uygulabilecek en bilinen analiz yöntemidir. Bu çatallaşmalar için periyodik yörüngelerin izlenmesi genel olarak sistemin gidişatının izlenmesi anlamına da gelir. Aşağıda örnek model

olarak alınan üç sistem için periyot yörüngelerinin kaosa bir başka ifade ile kontrol edilemezliğe sürüklendiği değişim aşamaları incelenmiştir. Bu bilgiler ışığında, periyodik- 2^n yörüngeleri ardışıl bir şekilde ilerleyerek tuhaf çekere(strage attractor) daha sonra kararsızlığını kaybetmiş olarak periyodik- $2n+1$ yörüngesine dönüşebilir. Bu durumda sisteme ait tüm periyodik çözümler kararsız olup bu durumu "periyot katlamanın kaosa gitme rotası" olarak adlandırılır. Şekil-3.21'd3 kaotik tuhaf çekicilere doğru giden dinamik bir sistemin niteliksel dinamiklerinin iki türde olabilecek değişim rotaları gösterilmiştir[80-88].

(A) KAOTİK İLGİNÇ ÇEKİCİLERE DOĞRU GİDEN BİRİNCİ DEĞİŞİM ROTASI



(B) KAOTİK İLGİNÇ ÇEKİCİLERE DOĞRU GİDEN İKİNCİ DEĞİŞİM ROTASI



Şekil 3.21. Kaotik İlginç Çekicilere Doğru Giden Dinamik Bir Sistemin Niteliksel Dinamiklerinin Muhtemel Değişim Rotaları

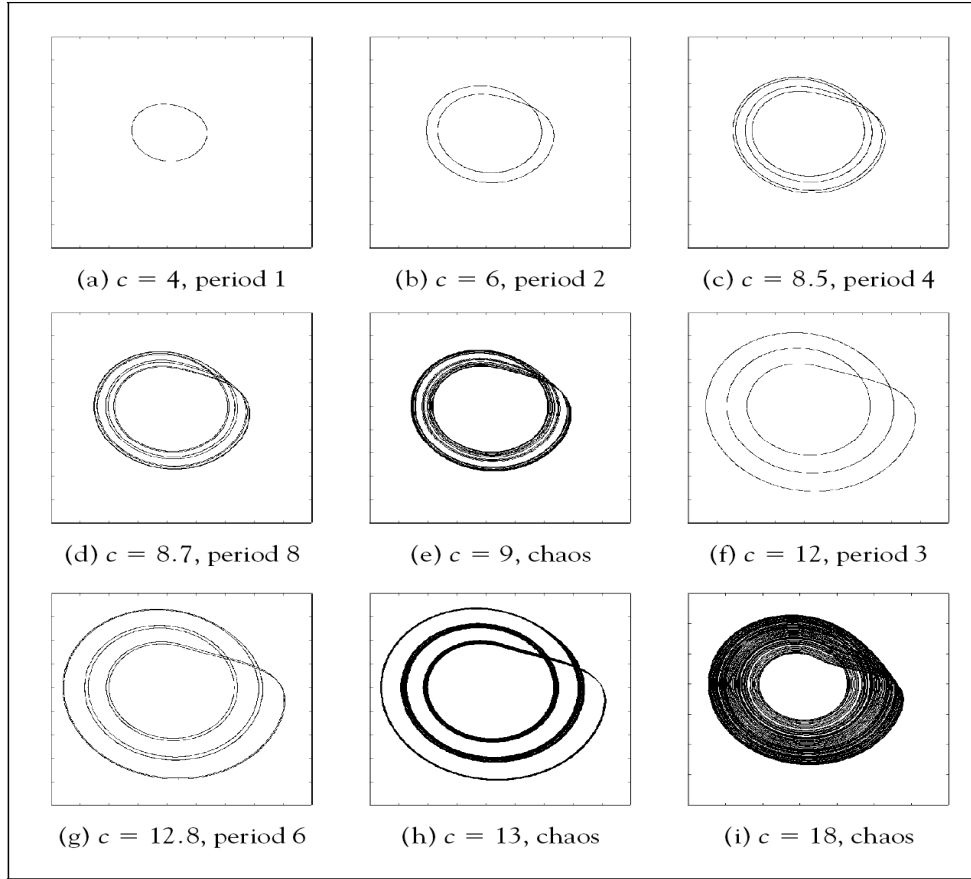
3.4.1. Rössler çekici üzerinden izah edilmesi

Alman bilimadamı O.Rössler basit bir lineer olmayan denklem takımından oldukça tuhaf kaos çekici elde etmiştir. Rösslere ait bu sistem aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir;

$$\frac{dx}{dt} = -y - z \quad \frac{dy}{dt} = x + ay \quad \frac{dz}{dt} = b + (x - c)z$$

Burada sistem $a=0.1$, $b=0.1$ ve $c= 14$ değerlerinde tam bir kaos çekici oluşmaktadır. Bu değer için hesaplanan Lyapunov üstelleri 0.072, 0 ve -13.79'dur. Sistemin Lyapunov boyutu 2.005 olup, tam kaotik bir durumdadır. a ve b nin sabit kabul edilip c 'nin çatallaşma parametresi seçildiği x - z faz portresi eldelerinde c parametresinin çeşitli değerleri için artan periyodik yörünge oluşumu ve nihayetinde

kaotik bir hale dönüşen dinamik bir sistem varlığı gözlenmiştir. Şekil 3.22’de bu değişim adım adım gösterilmiştir.



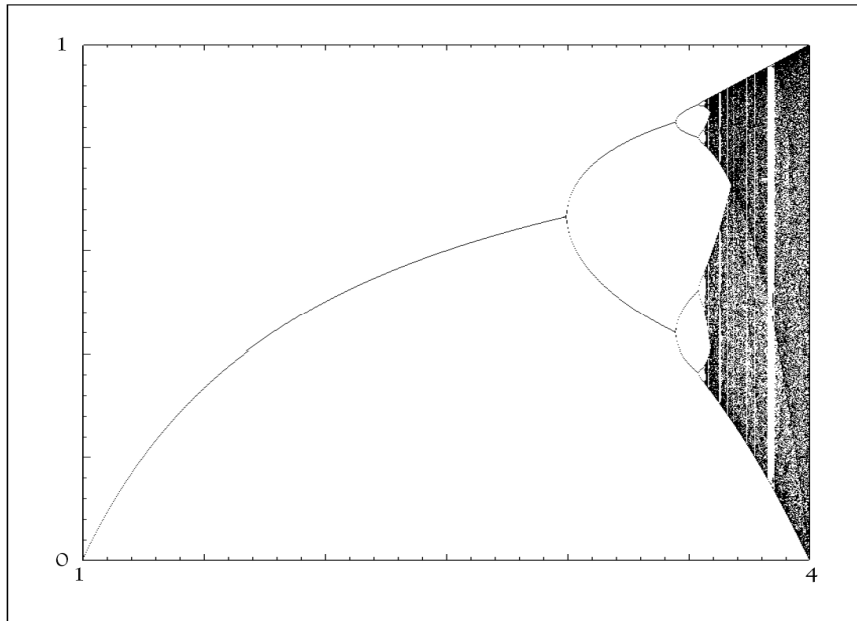
Şekil 3.22. Sabit Parametreleri $a=b=0.10$ Olan Rössler Sisteminde c parametresinin değiştirilmesi ile oluşan $x-z$ Faz Portesi Üzerinden Periyodik İkiye Katlama Rotasının Kaos Çekiciye Dönüşmesi Aşamaları **a)**- $c=4$ /periyot-1 yörüngesi, **b)**- $c=6$ /periyot-2 yörüngesi, **c)**- $c=8.50$ /periyot-4 yörüngesi, **d)**- $c=8.70$ /periyot-8 yörüngesi, **e)**- $c=9$ /ince hatlı kaos çekeri yörüngesi, **f)**- $c=12$ /periyot-3 yörüngesi, **g)**- $c=12.80$ /periyot-6 yörüngesi, **h)**- $c=13$ / kaos çekeri yörüngesi, **i)**- $c=18$ / yoğun kaos çekeri yörüngesi

c 'nin 4 değeri için tek bir periyodik yörünge ile başlayan faz portesi , 6 değeri için 2 ye, 8.5 değeri için 4'e, 8.7 değeri için 8'e , 9 değeri için kaosa, 12 değeri için periyot 3'e , 12.8 değeri için periyot 6'ya, 13 değeri için kaos çekicisine, 18 değeri için tekrar kaos çekicisi formuna girmektedir. Burada periyodik-ikiye katlama çatallanmaları (PDBs) sürekli devam edecektir. Bu örnek, periyot ikiye katlama rotasının kaos haline gittiği bir başka örnektir.

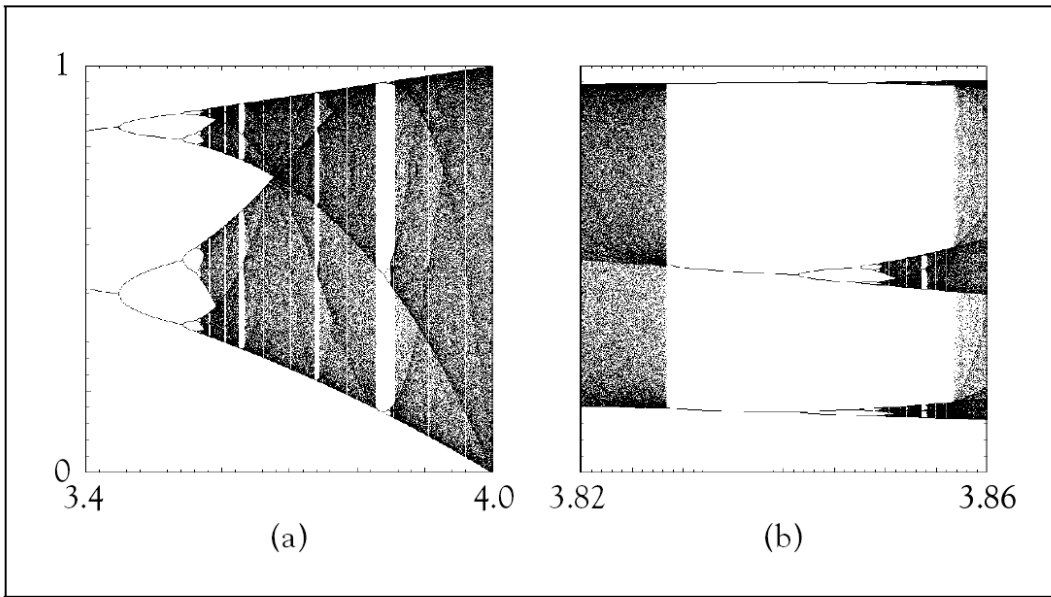
3.4.2. Lojistik harita sistemi üzerinden izah edilmesi

Lojistik harita sistemi $f(x) = Ax(1-x)$ ile ifade edilebilir.

A'nın yavaşça artan daha büyük değerleri için $f(x)$ noktasındaki periyodik yörüngeler daha karmaşık hale gelmektedir. Özellikle A'nın 3.45'den 4 çıkarıldığı değerlerde birçok yeni periyodik yörüngeler ortaya çıkmaya başlamaktadır. Şekil 3.23'de A'nın 1 ile 4 arasında değişimi neticesinde oluşan periyodik yörünge oluşumları görülmektedir. A değişkeni 4'e yaklaştıkça periyod katlamaların giderek kaos çekicisi haline dönüştüğü görülmektedir. 3.40 değerinde periyod-2, 3.45 değerinde periyot-4 oluşmaktadır. 3.86'ya kadar bu katlama oluşumları devam etmektedir. 3.86'da kaos ince hatlı da olsa çekicilerin oluşumu çatallaşma diyagramında ağırlık kazanmaya başlamaktadır.



Şekil 3.23. $f(x)=Ax(1-x)$ Lojistik Harita Çatallaşma Diyagramı



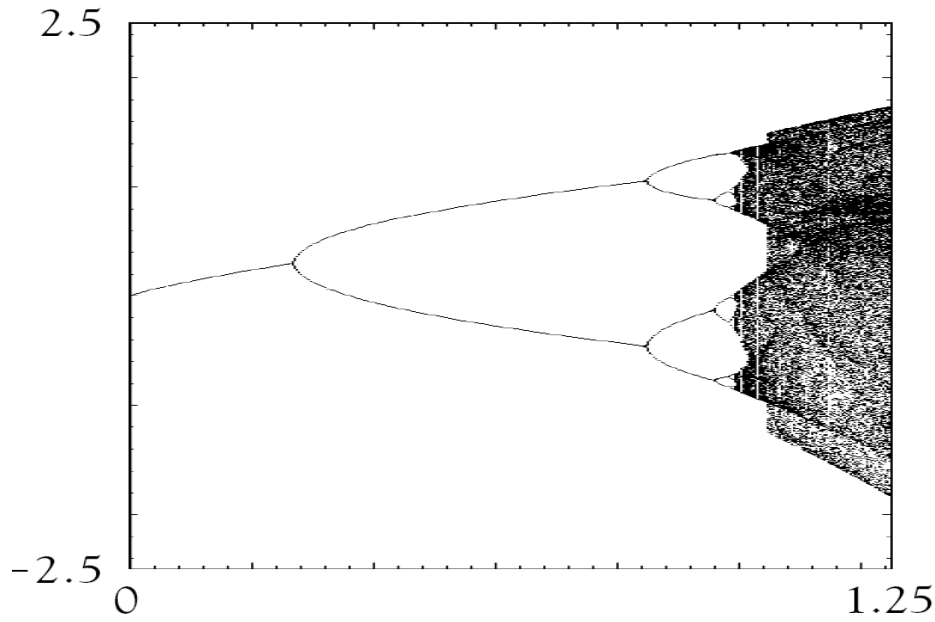
Şekil 3.24. a)- $f(x)=Ax(1-x)$ Periyod-2/ Kaos Çekeri Faz Geçişi Çatallaşma Diyagramı b)- $f(x)=Ax(1-x)$ Kaos Çekeri/Periyod-3/ Kaos Çekeri Faz Geçişi Çatallaşma Diyagramı

Şekil 3.24-a'da Lojistik Harita Çatallaşma Diyagramı üzerinde Periyod-2'den Kaos Çekeri, Şekil 3.24-b'de Kaos Çekeri/Periyod-3/ Kaos Çekeri Faz Geçişi gösterilmiştir. Yapılan incelemelerde periyot-3 üçlemesinin görüldüğü dinamik sistemlerde, çatallaşma eğrileri üzerinde çok hızlı bir şekilde gelişen kaos çeker bölgelerine geçişler görülmüştür.

3.4.3. Henon harita sistemi üzerinden izah edilmesi

Henon harita sistemi $f_{a,b}(x, y) = (a - x^2 + by, x)$ ile ifade edilir.

Şekil-3.25'de, $b=0.40$ sabit alınarak, a 'nın 0'dan 1.25 değerine kadar değiştiği çatallaşma diyagramında, $a=0.27$ değerinde periyodik yörünge oluşumunun başladığı gösterilmiştir. Periyodik yörünge başladığı yer, $a=0.27$ noktasında kararsızlık başlamıştır. $a=0.85$ değerine yaklaştıkça periyod katlamaların giderek kaos çekicisi haline dönüştüğü görülmektedir.



Şekil 3.25. Henon Haritası Çatallaşma Diyagramı

3.5. Süreklilik Metodu ve Çatallaşma Noktalarını Dinamik Tespit Edilmesi Algoritmaları

Süreklilik metotları asıl olarak yarı-belirli sistem denklemlerini çözmeye kullanılır.

$$F = c ; F : R^m \rightarrow R^n \quad (3.14)$$

olmak üzere $m > n$ durumunda F 'nin düzgün bir yüzeye sahip olduğu kabulü yapılmıştır. Bu şartlar altında Tam Fonksiyon Teoremine (Implicit Function Theory) göre tüm c 'ler için seviye kümesi(level-set) bir manifolddur denir. Süreklilik algoritmasının en başarılı uygulandığı durum $m=n+1$ ve çözüm manifoldlarının eğri olduğu durumdur.

Tek parametrelili süreklilik, sayısal integrasyon ve kök bulma kombinasyonlarının birbirini tamamlayacak(tahminci-doğrulamayı) şekilde formüle edilmesiyle başarımını gerçekleştirir. Burada amaç $F=c$ "seviye eğrisini" doğru olarak tespit etmektir. F 'nin düzenli noktasal kümeleri üzerinde, $DF(x)$ 'in tanımsız-uzayı(null-space) olan x 'i belirleyen alan çizgileri tanımlanabilir. Bu alan çizgileri bir çok farklı yolla vektör alanları şeklinde temsil edilebilir. Bu vektör alanlarının integral eğrileri, F 'nin seviye eğrileridir. Süreklilik metodu bahsi geçen bu seviye eğrilerini kullanarak seviye eğrisi boyunca en doğru tahmin adımlarını (prediction-step length) belirler.

Doğrulama aşamasında (correction step) kök bulma yöntemini kullanarak, bulduğu bu adımların doğruluk optimizasyonunu yapar. Optimizasyon işlemi $F=c$ yi sağlayan köklerde yapılır. Bu tahmin ve doğrulama yöntemi olmadan sayısal olarak integrasyonu alınan eğriler, başladığı seviye eğrilerinden uzaklaşmaya bir başka ifade ile bu eğriden bağımlı koparmaya başlarlar. Süreklilik metodunda birinci aşama olarak uygulanan tahmin adımının uygulanması (Euler adımındaki seviye eğrilerine tanjant yakınsaması yapılmasında olduğu gibi), iteratif kök bulucuların istenilen çözümlere yakın çözümler bulmasının yolunu açar.

3.5.1.Pseudo-ArcLength süreklilik metodu

Bu süreklilik metodunda tüm düzenli çözümlere sahip sürekliliklerin yapılması mümkündür.

Geometrik olarak bu süreklilik metodu en "eğersiz" ve "az şartlı" metottur.

(x_0, α_0) , $f(x, \alpha)=0$ 'ın çözümü olsun ve $(\dot{x}_0, \dot{\alpha}_0)$ de (x_0, α_0) çözüm eğrilerine ait normalize yön vektörü olsun. Bu metoda göre x_1 ve α_1 değerlerinde aşağıdaki denklemlerin çözümü yapılır.

$$f(x_1, \alpha_1) = 0, (x_1 - x_0)^* \dot{x}_0 + (\alpha_1 - \alpha_0) \dot{\alpha}_0 - \Delta s = 0$$

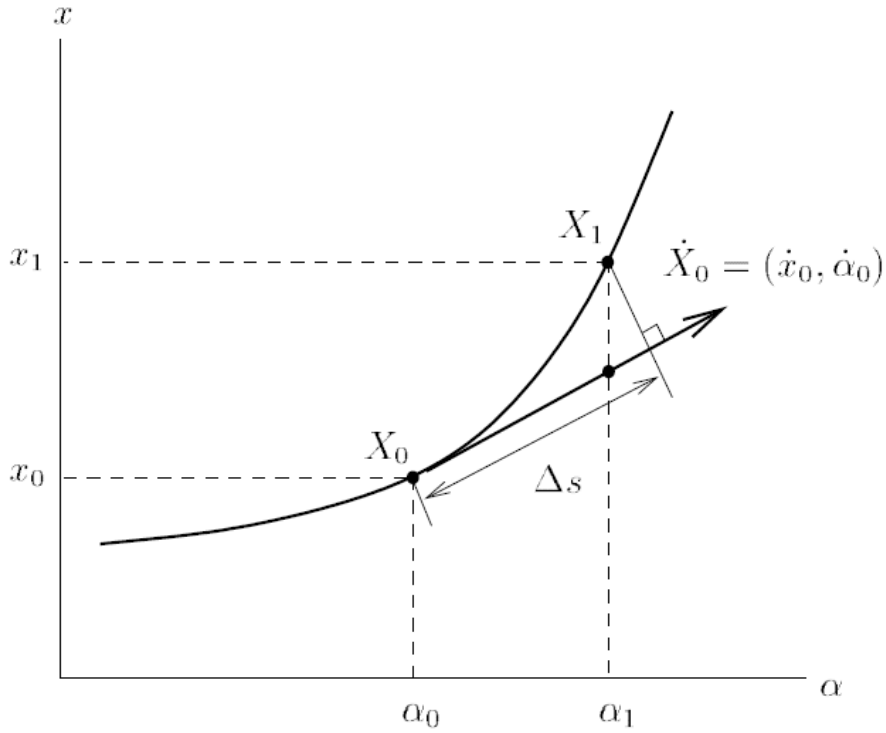
Bu çözümün grafiksel gösterimi Şekil 3.26'da verilmiştir. Bu denklemleri çözmek için kullanılan Newton metodu aşağıdaki formda yazılabilir.

$$\begin{pmatrix} (f_x^1)^{(v)} & (f_\alpha^1)^{(v)} \\ \dot{x}_0^* & \dot{\alpha}_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_1^{(v)} \\ \Delta \alpha_1^{(v)} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} f(x_1^{(v)}, \alpha_1^{(v)}) \\ (x_1^{(v)} - x_0)^* \dot{x}_0 + (\alpha_1 - \alpha_0) \dot{\alpha}_0 - \Delta s \end{pmatrix}$$

Yapılan yakınsama üzerinden bir sonraki yörünge vektörü aşağıdaki matristen hesaplanır.

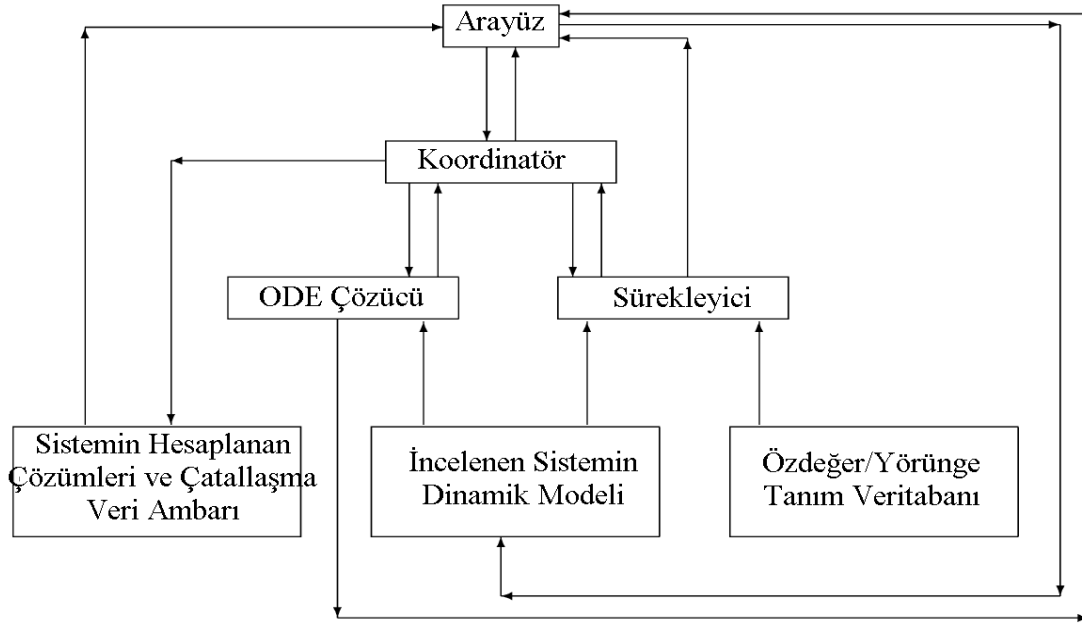
$$\begin{pmatrix} f_x^1 & f_\alpha^1 \\ \dot{x}_0^* & \dot{\alpha}_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \alpha_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Pratikte, en son Newton iterasyonuna ait ayrıştırılmış Jakobiyen yeni yörünge vektörün hesaplanmasında kullanılır. Bundan başka, Δs yeterince küçük alınarak $\dot{x}_0^* x_1 + \dot{\alpha}_0^* \alpha_1 = 1$ normalizasyonu yapılarak eğrinin yönünü tam olarak belirlenir.



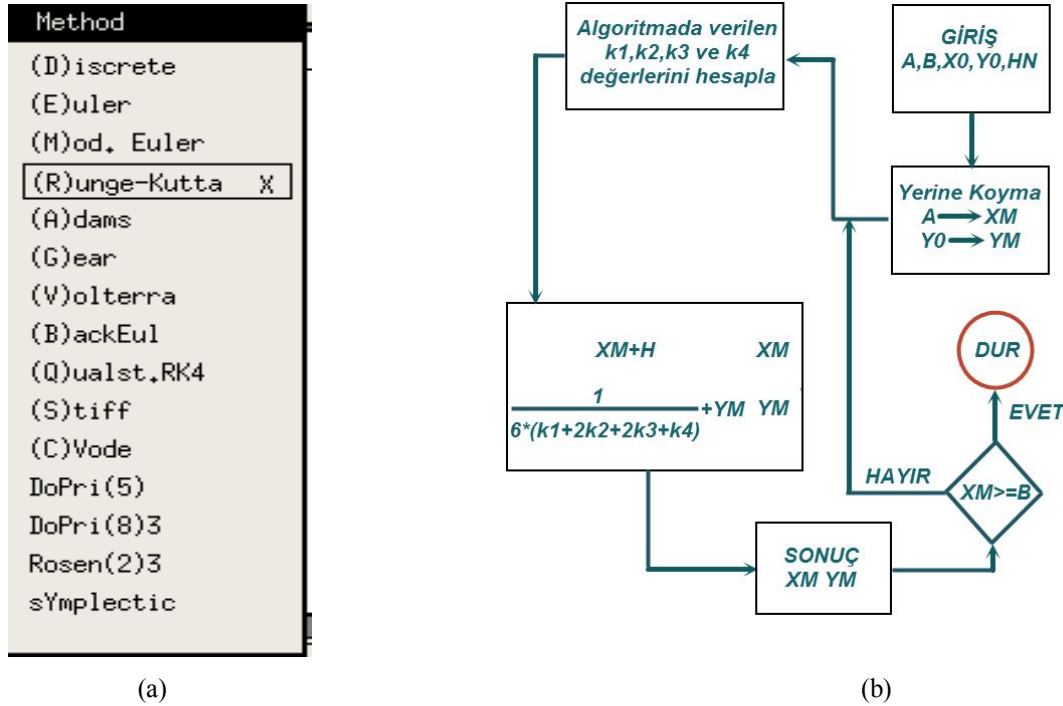
Şekil 3.26. Pseudo-ArcLength Süreklilik Metodu Geometrik İfadesi

Eğrinin yönü tespit edilince yörünge vektörü birim uzunluğa göre tekrar ölçeklenmelidir. Çözüm eğrileri hesaplaması yapılırken, Δs adım aralığı sürekli olarak güncellenir. Yeni Δs adımı Newton iterasyonunun yakınsama hassasiyetine bağlı olduğu için bu adımın Newton iterasyonundan daha az hassas olması (örneğin Newton 0.00001 iterasyonu kullanırken Yeni adım 0.000001 olamaz) gereklidir.



Şekil 3.27. Dinamik Çatallaşma Noktası Tespit Algoritması Master Çalışma Yapısı

Şekil 3.27’de dinamik çatallaşma noktalarının tespit edilmesi işleminin master çalışma yapısı gösterilmiştir. Bu çalışma yapısı gereğince ODE(ordinary differential equation) çözücü ve süreleyici prosedürleri sistemin iki esas unsurunu teşkil etmektedir. Buna göre her iki ana prosedür de sistemin dinamik denklemlerini kullanarak hedeflerini gerçekleştirir. Bu iki prosedürün birbirleriyle uyumlu çalışmasını sağlayan “koordinatör” isimli üst katman esasında ODE çözücünün adım aralıklarının, sürekli adım aralığı ile uyumlu olmasını denetlerken, bundan başka süreleyicinin “tahminci-doğrulamacı” alt algoritmasının başarılı bir şekilde uygulanmasını koordine eder. Bu koordinasyon süresince özellikle doğrulama aşamasında ODE çözücünün hesapladığı sistem çözümlerini doğrulama referansı olarak baz alır. Bununla birlikte ODE çözücünün çözümlerini ve bu çözümlere bağlı olarak özdeğer analizlerinden elde edilen çatallaşma noktalarını bir sonraki alt çatallaşma analizlerinin yapılması için “Süreleyici” birimine parametre olarak gönderir. Süreleyici yöntemi olarak AUTO algoritmalarında kullanılan “arclength” süreleyicisi çevriminin kırıldığı yerde çevrim içinde devreye giren “pseudo-arclength” kullanılırken, ODE çözücünün Şekil 3.28-a’da gösterildiği üzere kullanabileceği bir çok sayısal çözüm yöntemi vardır.



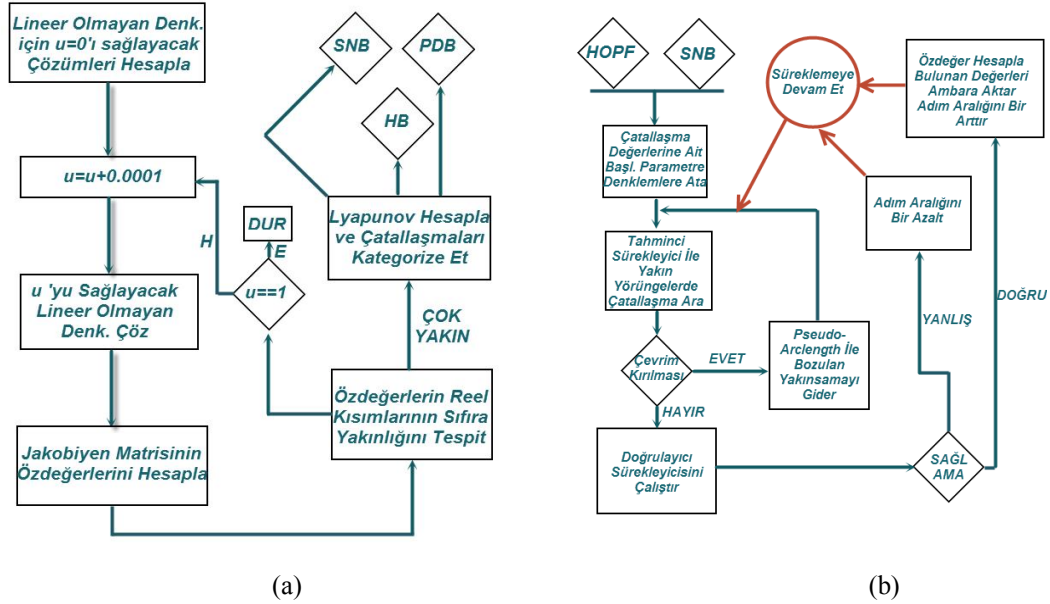
Şekil 3.28. a)-ODE Çözücünün Kullanabileceği Sayısal Çözüm Metotları b)- Runge Kutta-4 Sayısal Analiz Yöntemi Algoritması

çözücünün Şekil 3.28-b'de Runge-Kutta-4 sayısal analiz yönteminin algoritması verilmiştir.

Sayısal integrasyonda olduğu gibi , süreklilik metotları uygulanırken adım aralıklarının uygun seçilmesi aşaması önem teşkil eder. Geniş adım aralıkları doğruluğu düşük olan köklere yakınsama yaparken, adım aralığı için dar aralıklar yakınsama doğruluğunu artırır. Seviye eğrilerinin denklem ifadeleri oluşturulurken birim vektörlerin seçilmesi, "pseudo arc length" süreklilik yönteminin uygulanmasını şart koşar.

Süreklilik metotları dinamik sistem çalışmalarında oldukça kullanışlıdır. Özellikle yerel çatallaşma tespitlerinde başarılı olarak kullanılır. (3.1) dinamik sistemi için $x \in \mathbb{R}^n$ ve $\lambda \in \mathbb{R}^k$ olsun. Yerel çatallaşmalar, λ parametresinin denge noktasındaki değerleri için sistemin niteliksel değişime uğradığı yerleri gösterir. Yerel çatallaşmaların tespit edilmesi problemi, f 'nin türevlerine bağlı olan denklemlerin süreklilik çözümlerinin birlikte analiz edilmesini gerektirir. CODIM olarak adlandırılan yüksek mertebeden ortak boyutlara (co-dimension) sahip çatallaşmalar

merkezi çatallaşmalar olup, genelde daha alt boyuttaki çatallaşmalara ev sahipliği ve kılavuzluk yaparlar.



Şekil 3.29. a)- Merkezi Çatallaşmaların Tespit Edilmesi Akış Diyagramı b)-Çatallaşma Noktalarının Dinamik Tespiti Algoritmasında Çatallaşmalara Ait Yörünge Tespitlerinin Süreklilik Çevrimleriyle Elde Edilmesi Akış Diyagramı

Bu tür merkezi çatallaşmaların yerleri tespit edilince bu noktalar veya eğriler etrafında yeni süreklilik analizleri yapıldıktan alt çatallaşma lokasyonları belirlenir. Bu alt çatallaşma lokasyonlarının tespiti işlemi özellikle Hopf ve SNB(Saddle Node Bifurcation) gibi sistem üzerinde büyük etkilere sahip merkezi çatallaşmaların felaket durumu senaryolarının belirlenmesi ve yapılabilecekse ona uygun erken müdahale ve iyileştirme noktalarının tespiti aşamalarında oldukça önemli etkilere sahiptir. Şekil 3.29'da bu tespitlerin yapılmasında uygulanan aşamalar akış diyagramı şeklinde gösterilmiştir.

Tanımlanan çatallaşma eğrisi denklemi, sistemin denge denklemleriyle birlikte değerlendirilmesiyle, alt çatallaşmanın belirleneceği 2. çatallaşma parametresi aktif hale getirilir. Bu durumda sistemin geneli için $n+1$ adet denklem $n+2$ adet değişken oluşur. Adından da anlaşılacağı üzere sürekli devam eden bu süreklilik çevrimi sistemin tespit edilebilecek en son iç yörünge tayinine kadar devam ettirilir. AUTO dinamik çatallaşma tespiti algoritmalarında "MX" hata kodu mevcut çevrim için

yörünge tayininin başarımlı durumunu temsil eder. Örneğin 2. katmanda yapılan iç yörünge tayini alt çatallaşmaları gösterirken, 3. katman için devam ettirilen süreklilik çevriminin "MX" hata koduyla karşılık vermesi bu katmanda herhangi bir yörünge tespiti yapılamadığının habercisidir. Ancak bu durum 3. katman süreklilik çevrimini kapsayan yörünge de mutlak anlamda alt çatallaşmaların olmadığı anlamına gelmez, çünkü küçük bir aralık içinde sistemin sayısal çözümü tanımsız olmuş olabilir. Bu tanımsızlık durumu üst iki katman için süreklilik çevrimden çıkmayı gerektirmediği halde daha alt katmanlarda büyük olasılıkla çevrimin kırılmasıyla neticelenecektir. Bu durum çok parametrelı dinamik çatallaşma yörüngesi tespiti önündeki en büyük engel olarak bilinir. Bu bağlamda dinamik çatallaşma tespit algoritmalarının aynı anda en çok iki parametreye göre çevrimi düzgün devam ettirebilme yeteneği vardır. Lineer olmayan programlama (nonlinear programming) algoritmalarının gelişmesi ve dinamik olmayan analizlerde kullanılmak için geliştirilmekte olan yüksek başarımlı işlemcilerin tasarlanmasıyla bu engel aşılmaya çalışılmaktadır. Özellikle Amerikan havacılık teknolojilerinde dinamik araç davranışı modelleme sahalarında bu araştırmalar özel olarak çalışılmaktadır.

Süreklilik metodları denge eğrilerini elde etmede kullandığı gibi, periyodik yörüngelerin izlenmesinde de kullanılırlar. AUTO dinamik çatallaşma tespiti algoritmaları, SNB ve Hopf gibi merkezi çatallaşmaların periyodik yörünge tespitlerinde oldukça yüksek başarımlı sonuçlar vermektedir. Periyodik yörüngelerin tespiti için süreklilik metodlarının kullanılması, sistemin belli başlangıç değerlerinde, sistemin HB ve SNB gibi kritik çatallaşma yörüngelerine yakınlık durumlarının tespitini mümkün kılar. Çatallaşma yörüngeleri tespit edilmeden yapılacak bir periyodik yörünge analizi, bu yörüngeler kullanılarak yapılan bir analize göre hem daha başarısız hem daha uzun süre içinde tamamlanacak bir analiz olacaktır. Çünkü çatallaşma yörüngelerinin tespit edilmesi, sistemin tüm durum uzayında tehdit boyutu belirsiz bir periyodik yörünge tespitinin önüne geçecektir. Bu doğru kılavuzluğu, çatallaşma yörüngesi boyunca tahminci-doğrulamalı algoritmalarını uygulayan süreklilik analiz metodları tayin eder. Çatallaşma yörüngesi kılavuzluğunda yapılan periyodik yörünge analizi aynı zamanda sistemin, muhtemel sayısal yöntemlerle çözülemeyen sınırlarda yörünge araması yapmasının da ihtimalini azaltacaktır.

Dinamik çatallaşma tespiti algoritmalarının başarımını göstermek üzere IEEE literatüründe çok sayıda yayında üzerinde çalışmalar yapılan ve çatallaşmaları incelenen aşırı değişken ve yüksek karmaşıklıklar içeren ark ocağı dinamik yük modeli bir güç sistemi üzerinden incelenerek; ark ocağının oluşturacağı iç ve dış harmoniklerin güç sistemi parametrelerini değiştirmesinin istenilmeyen rezonanslar başta olmak üzere muhtemel etkileri, ark akımı ve güç sistemi hat parametrelerinin çatallaşma eğrileri analizleri üzerinden anlatılmıştır.

3.6. Lineer Olmayan Ark Ocağı Yüğü İçeren Güç Sisteminin Dinamik Modeli

Elektrik ark ocakları alüminyum, bakır, kurşun, yüksek alaşımlı çelik ve diğer metallerin üretilmesi amacıyla sanayide yoğun olarak kullanılmaktadır. Ark ocağı yükleri çok geniş etkiye sahip, yoğun, dinamik ve zamanla değişen yük karakteristiğinde olup güç sistemi yüklerinin önemli bir kısmını teşkil etmektedir. Ark ocakları beslenme tiplerine göre AC beslemeli elektrik ark ocakları ve DC beslemeli elektrik ark ocakları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. AC beslemeli elektrik ark ocaklarında, AC beslemesi elektrik ark ocağının elektrotlarına bir transformatör üzerinden bağlanırken, DC beslemeli elektrik ark ocağında elektrotlar DC doğrultucu üzerinden bağlanmaktadır. Bu çalışmada AC beslemeli elektrik ark ocağı üzerinden gerekli analizler yapılacaktır.

Elektrik ark ocağı yüğü literatürde [83,84,91] aşağıdaki diferansiyel denklem üzerinden modellenmektedir:

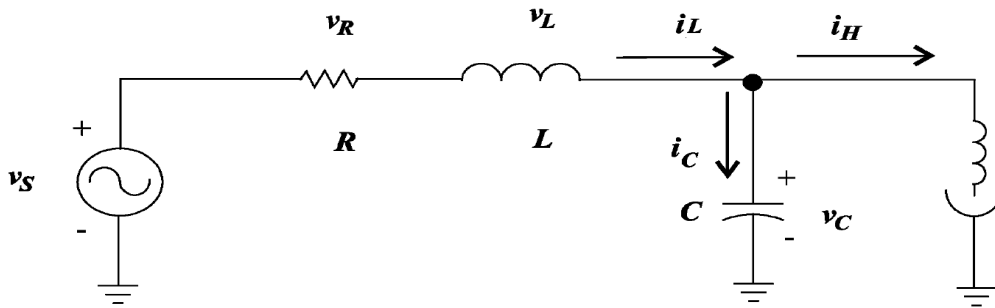
$$K_1 r^n + K_2 r \frac{dr}{dt} = \frac{K_3}{r^{m+2}} i^2 \quad (3.15)$$

Burada r , ark yarıçapı olup, bir durum değişkenini temsil ederken, m -iç sıcaklık etkisi (0'dan 2 ye kadar desimal adımlarla değişen değerler olup, $m=0$ değeri geniş ve soğuk ark uzunluğunu, $m=2$ kısa ve daha sıcak ark uzunluğunu $m=1$ ise bu ikisinin arasında ark uzunluğu ve sıcaklığını temsil eder.) ve n -ise ark yarıçapından bağımsız ark sıcaklığını (0'dan 2 ye kadar desimal adımlarla değişen değerler olup, $n=0$ değeri ark yarıçapından tamamen bağımsız ark sıcaklığını, $n=1$ uzun bir ark ve bu arka etki eden soğuk bir ortamı, ve $n=2$ değeri ark soğutmasının elektrotların kesit

alanı ile orantılı bir ark soğutmasının varlığını temsil eder.) gösterir. K_1 , K_2 , K_3 sabitleri ise diğer ark soğutma faktörlerini temsil eder[87].

(1) denkleminde verilen parametreler sistemin kararlılığı üzerinde etkili olan yakınsama hızına, sistemin denge noktaları üzerinde meydana gelen V-I ark karakteristiğine doğrudan etki eder. Bu dinamik ark ocağı modelinde ark ocağının dökümüne ait iç ergime durumu ihmal edilmiştir.

Analiz süreci boyunca, ark ocağının nominal çalışma noktaları değerleri için $K_1=0.08$, $K_2=0.005$ ve $K_3=3.0$ sabit değerlerde alınmıştır [74]



Şekil 3.30. AC Beslemeli Ark Ocağı Yüklü İçeren Güç Sistemi Modeli

Şekil 3.30'da şebeye bağlı AC beslemeli ark ocağı gösteriştir. Burada R ve L güç sistemine ait direnç ve endüktans değerlerini temsil ederken, V_S -AC besleme gerilimini, V_R ve V_L R ve L üzerinde meydana gelen gerilim farklarını, C ark ocağına paralel olarak bağlanan kondansatör değerini, V_C bu kondansatör üzerinde meydana gelen gerilim farkını, L_H ark ocağının esnek bağlantı kabloların, elektrotların bağlı olduğu trafonun ve elektrotların eşdeğer endüktans değerini temsil etmektedir[87].

Şekil 3.30'de gösterildiği gibi güç sistemine bağlanan elektrik ark ocağına Kirchhoff akım ve gerilim yasaları uygulanarak düğüm ve çevre denklemleri yazılırsa, güç sistemine bağlı ark ocağının dinamik durum denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R}{L}i_L - \frac{1}{L}v_C + \frac{1}{L}v_S \quad (3.16)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{1}{C}v_C - \frac{1}{C}i_H \quad (3.17)$$

$$\frac{di_H}{dt} = -\frac{1}{L_H}v_C - K_3 \frac{r^{-(m+2)}}{L_H}i_H \quad (3.18)$$

$$\frac{dr}{dt} = K_3 \frac{r^{-(m+3)}}{K_2}i_H - K_1 \frac{r^{(n-2)}}{K_2}r \quad (3.19)$$

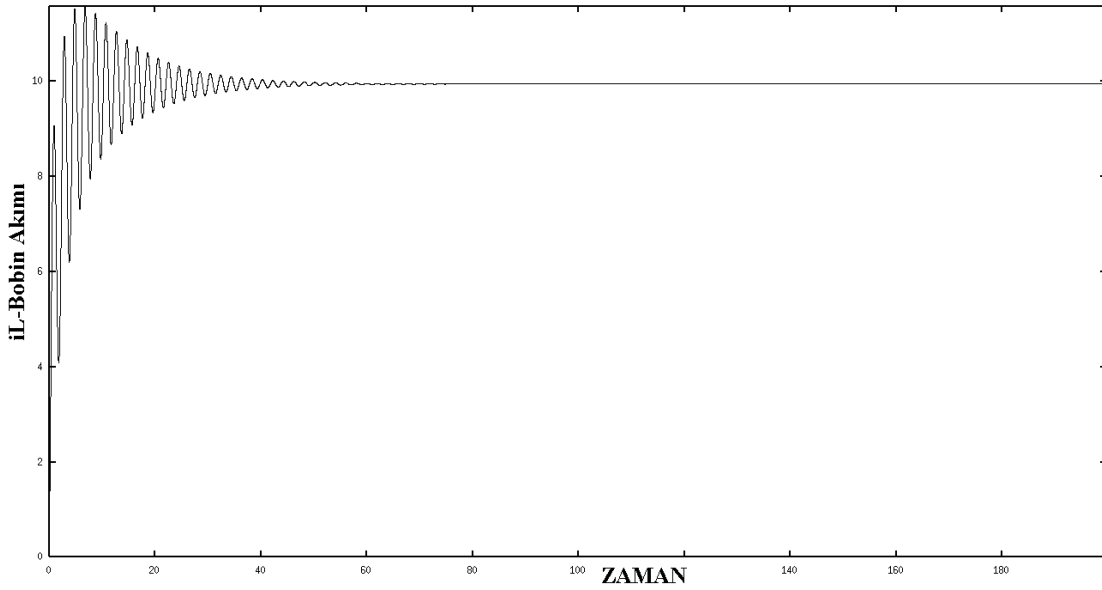
Burada dinamik sisteme ait durum değişkenleri; i_L -bobin akımı, v_C - kapasitör üzerinde meydana gelen gerilim, i_H - ark ocağı elektrotları üzerinde akan akım, ve r - ark ocağının yarıçapı şeklindedir[91].

3.7. Lineer Olmayan Ark Ocağı Yüğü İçeren Güç Sistemi İçin Çatallaşma Analizi

Çalışmanın bu kısmında ark ocağı yüğü içeren güç sistemi için detaylı çatallaşma analizleri yapılacaktır. Seçilen sistem parametrelerin demir çelik endüstrisinde kullanılan çalışma değerlerini temsil eden p.u değerler olduğunu belirtmeliyiz. Seçilen bu parametre değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Sistem parametrelerinde meydana gelecek bir değişim sistemi çok farklı denge noktalarına götürebilecek potansiyele sahiptir [84-90]. Seçilen bu parametrelerde sistemin transientleri $t=48\text{ms}$ değerine kadar osilasyonlarını sürdürüp, sürekli hal çalışma halinde bobin akımı $i=10.6298$ mertebesinde sabitlenmiştir. Bu değişim Şekil 3.31’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Elektrik Ark Ocağı Yüğü İçeren Güç Sistemi Parametreleri

Parametreler	Başlangıç Koşulları
L	0.120
V_s	1
m	2
n	2
K_1	0.08
K_2	0.079199
K_3	3
R	0.10
L_H	0.10



Şekil 3.31. AC Beslemeli Ark Ocağına Ait Bobin Akımının Sabit Bir Değere Oturması

Verilen başlangıç değerleri ile güç sistemi

$$I_o = (i_{Lo}, v_{Co}, i_{Ho}, r_o, L)$$

ile temsil edilmekte olup sistemi temsil edecek bu değişkenler sırasıyla,

i_{Lo} : Bobin akımı

v_{Co} : Kapasitör gerilimi

i_{Ho} : Elektrotlardan akan akım

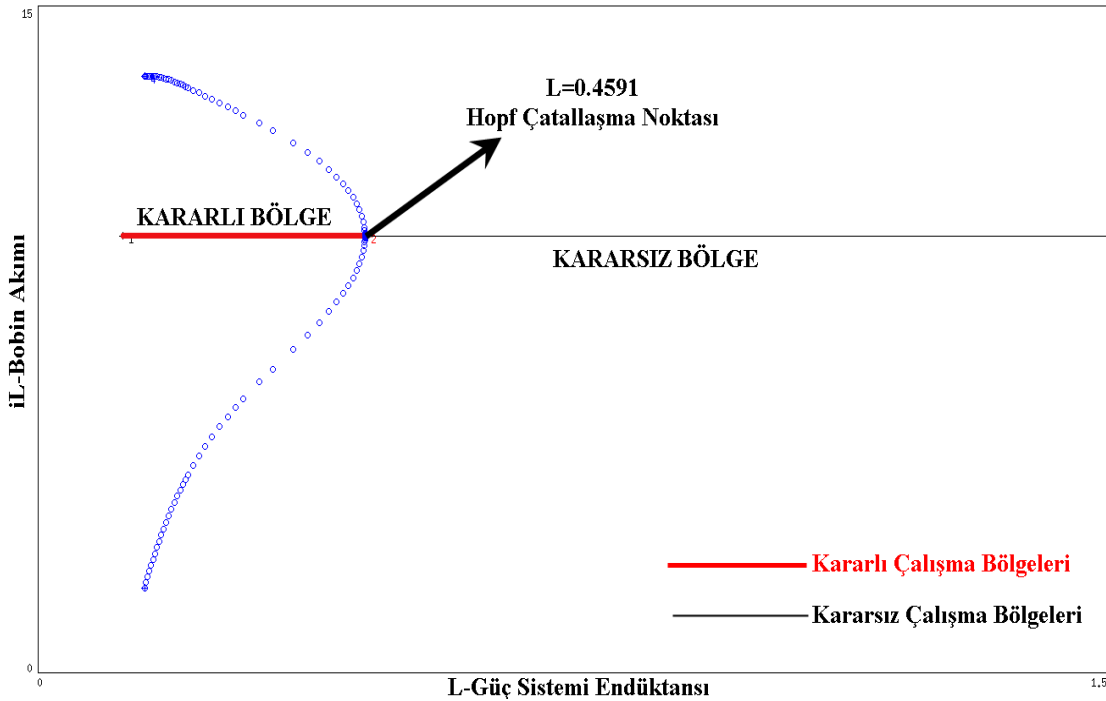
r_o : Ark yarıçapı

L : Güç sistemine ait endüktans

Şeklinde. Bu şekilde temsil edilen güç sistemine ait başlangıç parametreleri $I_o = (10.6298, 0.315, 0.00134, 0.932177, 0.120)$ şeklindedir. Elektrik ark ocakları yoğun iç ve dış harmoniklerin hat parametrelerini bozacak düzeylere erişebildiği elektrik yükleridir. Bu parametre değişimlerinin etkileri çatalaşma analizleri ile öngörülebilir. Sistem üzerinde yıkıcı etkide bulunan hopf çatalaşmaları ve eyer noktası çatalaşmalarının varlığı hattın endüktansı ve direnci ayrı ayrı çatalaşma parametresi seçilerekten irdelenmiştir.

3.7.1. L-Güç sistemi hat endüktansı çatallaşma parametresi seçilerek yapılan çatallaşma analizi

Yukarıda verilen başlangıç şartları altında bobin akımının L-Güç Sistemi Hat Endüktansı değişimi ile olan çatallaşma diyagramının 1.adımı ve 2. adımları birlikte yapılarak Şekil 3.32’de verildiği üzere elde edilir.



Şekil 3.32. Birinci Ve İkinci Adım Çatallaşma Diyagramı

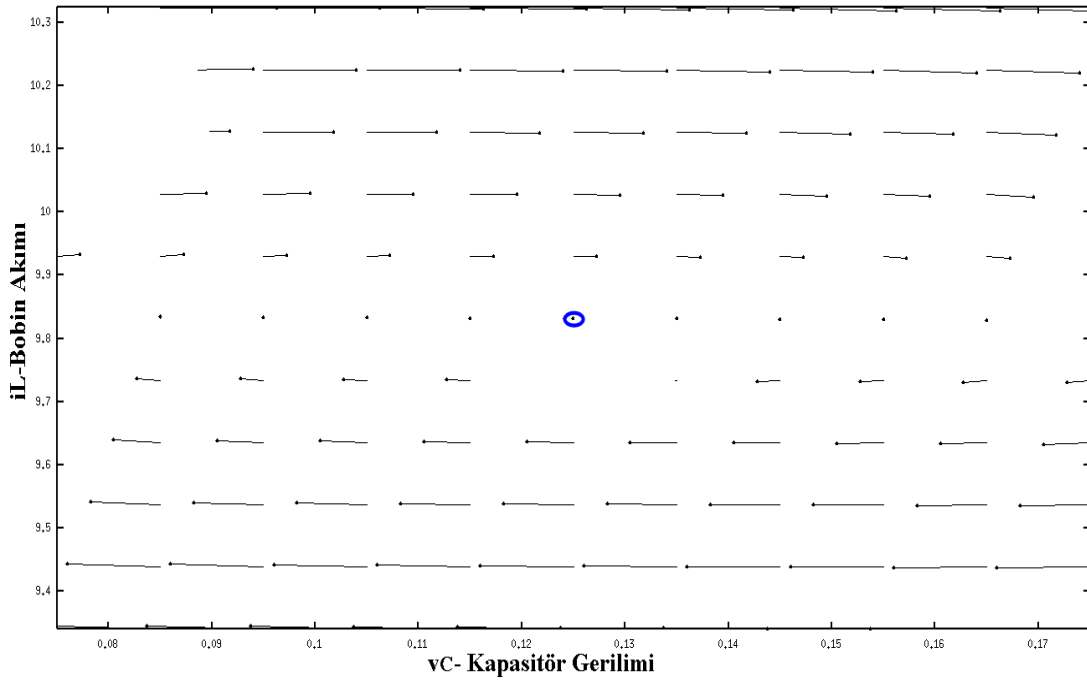
Şekil 3.32’de gösterildiği gibi çatallaşma analizinin birinci ve ikinci adımları birlikte yapılarak $L=0.4590677$ güç sistemi endüktansı değeri için

- Bobin Akımı=9.8315137
- Kapasitör Gerilimi=0.12499517
- Elektrotlardan Akan Akım= 11.76354
- Ark Ocağı Yarıçapı= 3.91933

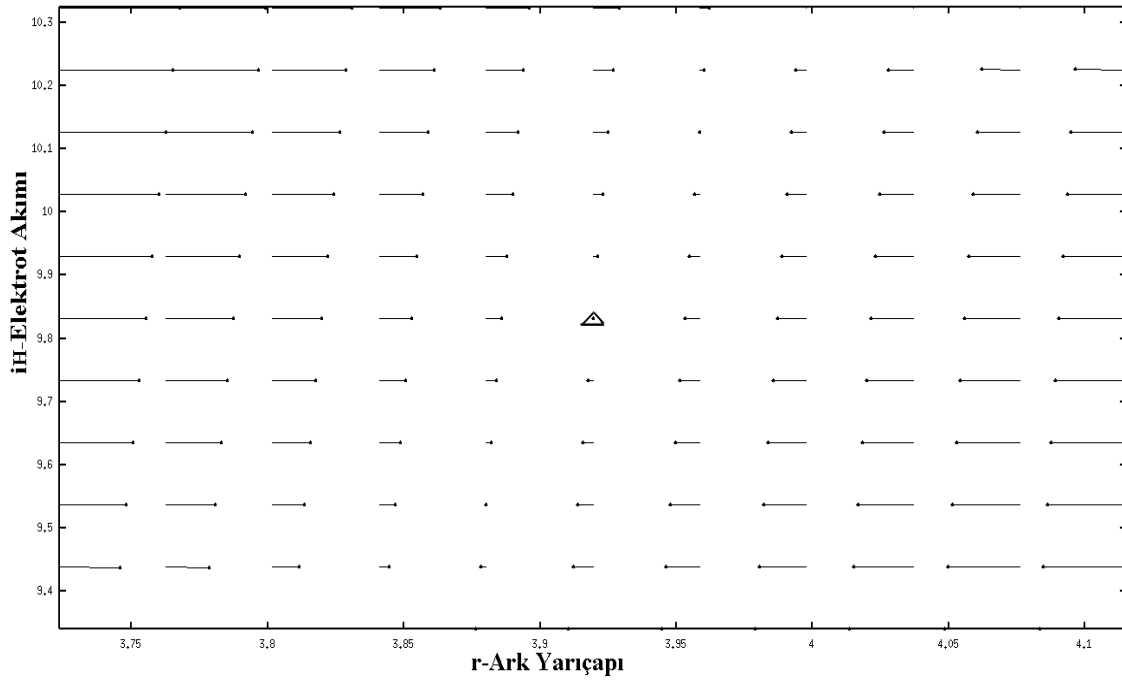
olan başlangıç değerlerine sahip sistem şartlarında hopf çatallaşması (HB) tespit edilmiştir.

Hopf noktasında sistemin özdeğerleri $e_1=0.000034+i3.695976$, $e_2=0.000034-i3.695976$, $e_3=-0.151653$, $e_4=-126.170160+i0$ şeklindedir. Kompleks eşlenik değerlerin reel kısımları pozitif olduğundan sistem hopf noktasında kararsızdır denir.

Şekil 3.33 ve Şekil 3.34’de sırasıyla, $L=0.4590677$ güç sistemi endüktansı değerinde oluşan hopf çatallaşma noktası için bobin akımı-kapasitör gerilimi faz portresi ve elektrot akımı-ark yarıçapı faz portresi çizdirilmiştir. Faz değişimlerinin noktasal olduğu görülmektedir. Fakat bu kez durum kararlı hopf çatallaşmasında görüldüğü gibi çökme habercisi değildir. Sistem kararsızlığa adeta saplanmış bir haldedir. Sistemi kararsız hopf çatallanmasına sürükleyen başlangıç değerlerinde sistem bu çalışma değerlerinden çıkarılmadığı sürece kararsızlıktan çıkmaya cevap vermeyecektir. Beşinci bölümde iyileştirici müdahale yöntemi olarak şebeke ve ark ocağı arasına seri bağlı TCSC kompanzatorü devreye alınmasıyla bu kararsızlık durumu ortadan kaldırılacaktır.



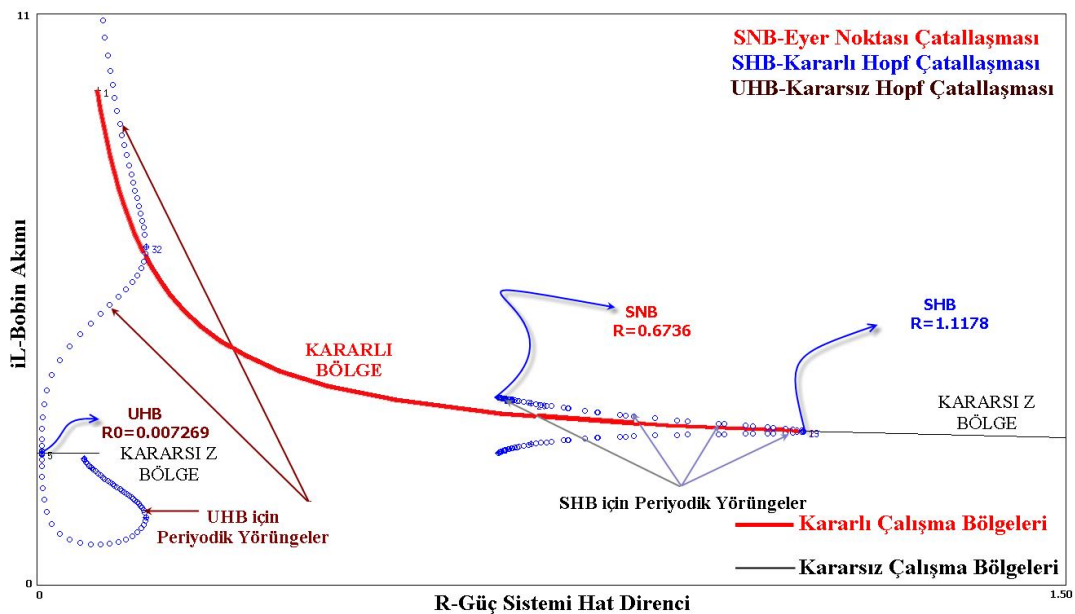
Şekil 3.33 $L=0.4590677$ Güç Sistemi Endüktansı Değeri için Bobin Akımı-Kapasitör Gerilimi Faz Portresi



Şekil 3.34 $L=0.459067$ Güç Sistemi Endüktansı Değeri için Elektrot Akımı-Ark Yarıçapı Faz Portresi

3.7.2. R- Güç sistemi hat direnci çatallaşma parametresi seçilerek yapılan çatallaşma analizi

Aynı başlangıç şartları altında bobin akımının R-Güç Sistemi Hat Direnci değişimi ile olan çatallaşma diyagramının 1.adımı ve 2. adımları birlikte yapılarak Şekil-3.35.'de verildiği üzere elde edilir.



Şekil 3.35 Birinci Ve İkinci Adım Çatallaşma Diyagramı

Şekil 3.35’de gösterildiği gibi çatallaşma analizinin birinci ve ikinci adımları birlikte yapılarak $R=1.1178289$ güç sistemi endüktansı değeri için

- Bobin Akımı=0.777289
- Kapasitör Gerilimi=0.29117739
- Elektrotlardan Akan Akım= 0.96354
- Ark Ocağı Yarıçağı= 1.6824

olan başlangıç değerlerine sahip sistem şartlarında hopf çatallaşması (HB) tespit edilmiştir.

Hopf noktasında sistemin özdeğerleri $e1=-0.001071+i3.327925$, $e2=-0.001071-i3.327925$, $e3=-6.397052$, $e4=-130.944599+i0$ şeklindedir. Kompleks eşlenik değerlerin reel kısımları negatif olduğundan sistem hopf noktasında kararlıdır denir.

Bundan başka $L=0.673645216$ güç sistemi endüktansı değeri için,

- Bobin Akımı=0.23159930
- Kapasitör Gerilimi=0.65945287
- Elektrotlardan Akan Akım= 1.874242469
- Ark Ocağı Yarıçağı= 2.241469

olan başlangıç değerlerine sahip sistem şartlarında eyer noktası çatallaşması(SNB) tespit edilmiştir. Son olarak $L=0.00726925$ güç sistemi endüktansı değeri için,

- Bobin Akımı=0.0193074
- Kapasitör Gerilimi=0.998142302
- Elektrotlardan Akan Akım= 0.0223456
- Ark Ocağı Yarıçağı= 0.49080972

olan başlangıç değerlerine sahip sistem şartlarında yine bir hopf çatallaşması(HB) tespit edilmiştir. Bu hopf çatallaşması kararsızdır.

Kullanılan dinamik çatallaşma tespiti algoritmalarıyla hem R hem de L parametresi çatallaşma parametresi seçilerek yapılan analizlerde, CODIM merkezi çatallaşmalar ve bu çatallaşmaların tespit edildiği başlangıç parametrelerinin çevresindeki alt çatallaşmalar ve periyodik yörünge oluşumlarının tespiti yapılmıştır. Alt çatallaşma tespitindeki hassasiyetinin arttırılmasıyla tespit edilen çatallaşma değerleri ve periyodik yörünge noktaları daha çok sayıda tespiti mümkün hale getirilebilir.

Kullanılan bu dinamik çatallaşma tespiti algoritmaların başarımı dördüncü bölümde aşırı reaktif yüklenmelere maruz üç baralı bir güç sistemi üzerinden reaktif güç yükü çatallaşma parametresi seçilerekten daha detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan bu incelemelerde başta çatallaşmaların sistem üzerinde tespitini anlamlı hale getirecek olan çatallaşmaların fiziksel etkileri olmak üzere, dinamik çatallaşma tespitinin önemi alt çatallaşma yörüngeleri ve periyodik yörünge oluşumları üzerinden ele alınarak yorumlanmıştır.

Burada dinamik çatallaşma tespit başarımını göstermek amacıyla incelenen ark ocağı yükü içeren güç sistemi için iyileştirici müdahale yöntemi olarak şebeke ve ark ocağı arasına seri bağlı TCSC kompanzatörü devreye alınmasıyla sistem üzerinde kritik hopf çatallaşmaları ve eyer noktası çatallaşmaları temizlenmesinin prosedürleri beşinci bölümde anlatılacaktır.

BÖLÜM 4. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM ÇÖKMELERİ VE ÇATALLAŞMA NOKTALARININ DİNAMİK TESPİT EDİLMESİ

4.1. Giriş

Aşırı çalışma ve yüklenme koşulları altında, büyük bir enterkonnekte güç sisteminin veya elektrik üretim tesisinin devre dışı kalmasına neden olan, oluşan kesintilerin hem üretici hem tüketici tarafında meydana getirdiği iş kaybı yanında; generatörler, trafolar, kesiciler gibi sistem ekipmanları üzerinde oluşan bozucu etkileri olan gerilim çökmesi olarak da adlandırılan yeni bir kararsızlık problemiyle karşı karşıya kalınmaktadır. Bu bağlamda gerilim çökmesiyle neticelenebilecek, gerilim kararsızlığı noktalarının tahmin edilmesi, tanımlanması ve nihayetinde sistemi gerilim çökmelerine götürebilecek bu noktalardan uzak durulmasının, güç sistemleri planlama ve işletmesinde hayati bir role sahipliği pekişmiştir.

Çatallaşma teorisi faz portrelerinde oluşan denge noktaları, periyodik yörüngeleri ve daha karmaşık olan tuhaf çekicilerin görünüp kaybolması şeklinde oluşan niteliksel değişimleri inceler. Doğrusal olmayan dinamik sistemlerde bazı kararlılığın kaybedilmesi mekanizmaları hem yerel hem de global olarak doğal olarak çatallaşmalarla ilişkilidir[4,7,89]. Gerilim kararlılığı analizinde elektrik güç sistemi dinamik modelinin denge noktalarının oluştuğu veya gözden kaybolduğu sistem şartlarının belirlenmesini önemli bir yer teşkil eder. Bu noktaların değişim dinamikleri, çatallaşma teorisinin esasları kullanılarak yorumlanıp nihayetinde çatallaşma noktaları ve gerilim kararlılığı arasında mevcut ilişkiler ortaya çıkarılabilir.

Tüm dinamik güç sistemi modelleri için, çatallaşmaların kararlı çalışma bölgelerinin oldukça dar olduğu karmaşık ve lineer olmayan aşırı yüklemeler altında meydana geldiği ve bu dar çalışma aralıklarında sistemin küçük bir sarsılmaya karşı

kararlılığını muhafaza edemeyerek kararsız hale geçeceği söylenebilir. Bu kapsamda elektrik güç sistemi analizlerinde eyer noktası çatallaşmaları sistemin fiziksel yüklenebilirlik sınırlarını temsil etmektedir. Bu yüklenebilirlik sınırı P-V ve Q-V eğrilerinde kritik nokta olarak bilinmekte olup, sistemin bu nokta yakınlarında normal çalışma koşullarında yüklenmelerine müsaade edilmez. Fakat birbirlerine bağlı yüzlerce hatta binlerce düğüm noktası ve kollardan oluşan enterkonnekte güç sistemlerinde arızalar, ani yük değişimleri ve lineer olmayan anahtarlama elemanlarının etkileriyle bu yüklenebilirlik sınırları zaman zaman zorlanmaktadır. Bundan başka hopf çatallaşmaları olarak bilinen ve yüklenebilirlik sınırları yakınlarında görülebilen ve sistem üzerinde gerilim kararlılığını doğrudan etkileyebilecek çatallaşmaların varlığı da bilinmektedir. Hopf ve periyot katlama çatallaşmalarını içeren dinamik çatallaşmalar, son zamanlarda araştırılan gerilim çökmesi çalışmalarında özel olarak ele alınmaktadır. Bu konuda, EPRI ve NSF'nin sponsorluklarında birçok uluslararası uygulamalı ekip çalışmaları yapılaraktan genelde gerilim çökmeleri olmak üzere özeldir hopf çatallaşmaları oluşumları masaya yatırılmıştır. Bu tür dinamik çatallaşmaların meydana gelişi, gerilim çökmesinin başlangıcıyla bağlantılı olarak parametre ve durum uzayları bölgesinde araştırılmaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde, güç sistemleri için P-V ve ağırlıklı Q-V eğri analizleri üzerinden çatallaşmaların oluşumları, bu çatallaşma oluşumlarının fiziksel sistem karşılıkları, gerilim çökmesine doğru giden aşırı yüklenme durumunda sistemin davranışları, aşırı doğrusal olmayan dinamikler içeren güç sistemleri için çatallaşma noktaları etrafında yapılan periyodik yörünge analizleri ile başlangıç koşullarına hassas bağımlılık olgusunun fiziksel karşılıklarını belirlenmesi, hopf çatallaşması yörüngelerinde oluşan periyodik ikiye katlama, limit döngü ve tuhaf çekici dinamikleri gösteren faz portre dinamiklerinin incelenmesi ve nihai olarak gerilim çökmesinin aşama aşama özdeğer analizleri, zaman serileri, faz portreleri ve çatallaşma diyagramları kullanılarak açıklanması detaylı olarak incelenmiştir.

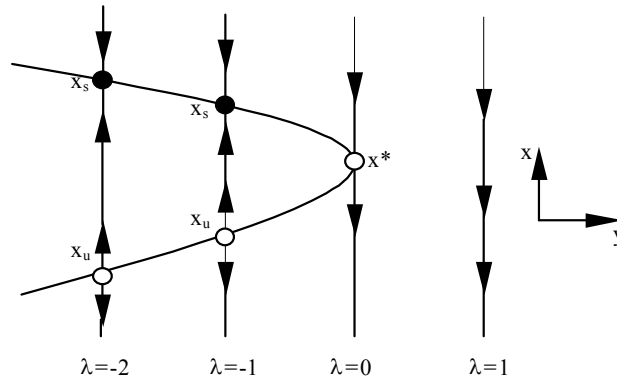
Bu çalışmanın iyileştirme algoritmaları bölümünde, gerilim çökmesine doğru giden bir güç sisteminde ne tür iyileştirme müdahalelerde bulunulabileceği, bundan başka üçüncü bölümde incelenen ark ocağı örneğinde, ark ocağının oluşturduğu iç ve dış

harmoniklerin hat parametrelerinin değişimine etkilerini bypass etmek için iyileştirme adına neler yapılabileceği ayrıca ele alınmıştır.

4.2. Prototip Bir Güç Sisteminde Denge Durumunu Kaybetme Hali

Elektrik güç sistemleri yüksek ölçekli ve aşırı doğrusal olmayan mekanizmalar içeren dinamik sistemlerdir. Bu aşırı karmaşıklıklar neticesinde güç sistemlerinin matematiksel modelleri de geniş çeşitlilikte karmaşık davranışlar içeren doğrusal olmayan modeller üzerinden tanımlanmakta olup, bu dinamik modellerin analiz edilmesi yapısal kararlılık analizleri, çatallaşma analizleri ve kaotik davranış analizleri gibi yüksek matematiksel işlemler gerektiren metotlar üzerinden yapılabilmektedir. Böyle yüksek karmaşıklıklar içeren dinamik sistemlerde sistemin parametre değişimleri, sistemin kararlı çalışma noktasını ve niteliğini değiştiren etkilere sahiptir.

Çalışmanın bu bölümünde çatallaşma teorisinin prototip bir güç sisteminin denge noktalarının değişimiyle ilişkilendirilmesi anlatılmakta olup, çatallaşma oluşumlarının aşama aşama kararlılık ve güç sistem parametreleriyle analizi daha sonra üç baralı güç sistemi üzerinde detaylı olarak incelenecektir. Buna göre bir elektrik güç sisteminin denge noktasını kaybetmesinin sonuçlarından biri, gerilim çökmesine yol açan sistem gerilimindeki bir azalmanın oluşmasıdır. Aşağıdaki verilen Şekil 4.1'de tek durum değişkeni x 'e ve yavaşça değişen λ parametresine sahip doğrusal olmayan bir sistemin çatallaşma diyagramı görülmektedir.

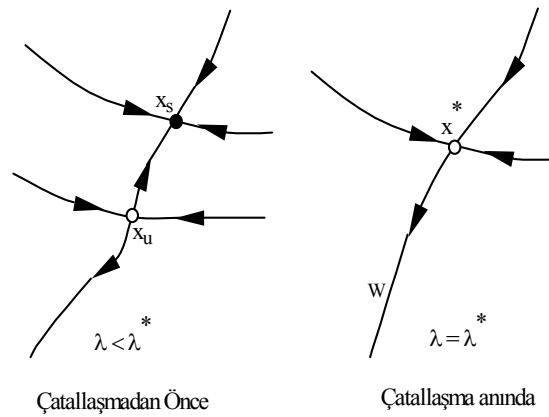


Şekil 4.1. Sistem Dinamikleri ve Çatallaşma Diyagramı

Yukarıdaki şekilde, \uparrow ve \downarrow işaretleri hareketin yönünü göstermektedir. Sürekli hal çözümünde x_s kararlı ve x_u kararsız olmak üzere iki denge noktası bulunmaktadır. Normal çalışma şartlarında sistem durumu x kararlı denge noktasındadır. λ yavaşça değişirken x_s ve x_u noktalarının pozisyonları da yavaşça değişmektedir.

Normal çalışma durumunda sistem durumu daima x_s kararlı denge noktasındadır. λ 'nın negatif değerleri için, sistem daima bir kararlı ve bir de kararsız denge noktasına sahiptir. Fakat eğer λ sifira ulaşırsa x_s ve x_u tek bir denge noktasında birleşip x^* değerini alır. λ 'nın pozitif değerleri için denge noktası yoktur.

Denge noktalarının sayısındaki bu yapısal değişiklik çatallaşma olarak adlandırılır. Çatallaşmanın olduğu kritik λ değerleri, çatallaşma kümesi olarak adlandırılmaktadır. Sistemdeki çatallaşma kümesi $\lambda=0$ olan tek bir noktadan oluşmaktadır. x_s 'i izleyen x 'in sürekli hal modeli, λ kritik değerine ulaştığı zaman, uygulanamaz, çünkü x^* kararsızdır. $\lambda=1$ 'de x değeri monoton bir şekilde düşer dinamik çökmeye yol açacak kararsız yapısını kaybeder. Özet olarak λ negatif iken sistem x_s kararlı noktasında çalıştırılabilir. Fakat λ sıfır olduğu zaman, sistem kararsız olur ve sistem çöker. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi sistem parametresi λ sistemin yüklenmesinin miktarını ölçmek için seçilebilir. Çatallaşma $\lambda=\lambda^*$ 'da olduğunda oluşmaktadır. Burada x_s ve x_u denge noktaları x^* kararsız denge noktasında birleşirler. $x^*=(V^*, \delta^*)$

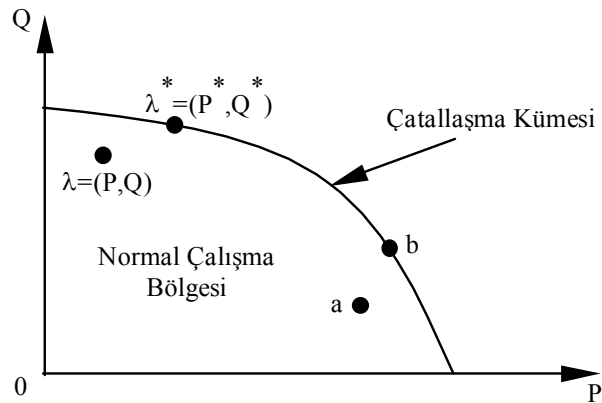


Şekil 4.2. Çatallaşma Anında ve Öncesindeki Durum Uzayı Dinamikleri

Şekil 4.2'de sistem dinamikleri oklar tarafından gösterilmektedir. Çatallaşmadan önce, $\lambda < \lambda^*$ olup ve sistem x_s kararlı denge noktasında çalışmaktadır. (x_s etrafındaki yörüngeler x_s 'e yaklaşır fakat x_u 'nun yakınındaki bulunan yörüngeler ise genellikle x_u ' dan uzaklaşır.). λ , λ^* 'a doğru arttığı zaman, x_s ve x_u , x^* noktasında birleşirler. Sistem durumu x , x_s 'i izlemesinden dolayı, x kendini ilk olarak x^* 'da bulur.

x 'in komşuluğundaki dinamikler araştırıldığında, x^* 'ın w olarak adlandırılan yörünge doğrultusu boyunca, kararsız olduğu görülür. Sistem dinamikleri, yörüngelerin bu doğrultuda olmalarını sağlar ve bu doğrultudaki hareket, gerilimlerin gerilim çökmesi anında niçin dinamik olarak azaldığını açıklamaktadır.

Şekil 4.2'de V ve δ gibi iki durumlu bir sistem için tek bir değişken parametrelili prototip bir çatallaşmayı göstermektedir. Bir sonraki adım örnek güç sisteminde yüklenme için bağımsız olarak değişen iki parametre seçmektedir. Bu da yükün güçleri P ve Q 'nun bir vektörü olarak λ kümesi tarafından elde edilir. Verilen bir yük modeli, bir λ noktası tarafından temsil edilmektedir.



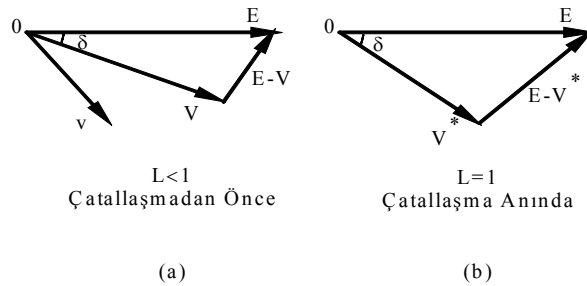
Şekil 4.3. $\lambda=(V,Q)$ için İki Boyutlu Yük Parametresi Uzayı

Normal çalışmada λ 'ya uygun durum uzayında kararlı bir denge noktası vardır. Şekil 4.3'deki eğri, çatallaşma kümesi olarak adlandırılır ve çatallaşma durumuna sahip bir sistemde $\lambda^*=(P^*, Q^*)$ kritik yüklenme kümesidir. Çatallaşma kümesinin dışındaki yük modeli için hiçbir denge noktası yoktur.

4.3. Gerilim Çökmeleri Tespit İndeksi

Bir sistemin gerilim çökmesine ne kadar yakın olduğunu belirlemek için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmaların hemen hepsi genel olarak yük talebi uzayındaki çatallaşma kümesi ile mevcut yüklenme arasındaki uzaklıklar ölçülünerek çökme değerlendirilmesi yapar.

Bu uzaklığın iki tipik çeşidi, L indeksi ve gerilim kararsızlığı yaklaşım indeksi (GKYİ)'dir. L indeksi, güç sisteminin alıcı (V) ve gönderici uçlarındaki gerilimleri (E) içerir. Bu iki gerilimin karşılaştırılması, çalışma noktası x_s 'in (kararlı çalışma noktası), x^* çatallaşma noktasından ne kadar uzak olduğunu gösterir.



Şekil 4.4. Çatallaşma Anında ve Öncesindeki Gerilim Fazörleri a) Çatallaşmadan Önce $L < 1$, b) Çatallaşma Anında $L = 1$

Herhangi bir güç sisteminde, sistem için V ile ilişkili x_s kararlı çalışmaya ait gerilim cevabı ve v ile ilişkili x_u kararsız çalışmaya ait iki farklı sürekli hal gerilim cevabı bulunmaktadır. L indeksi ;

$$L = \frac{|E - V|}{|V|} = \left| 1 - \frac{E}{V} \right| \quad (4.1)$$

şeklinde yazılabilir.

Kararlı gerilim durumu için $L < 1$ olur. Şekil 4.4-b'den görüldüğü gibi, V, v ile çakışık olduğunda çatallaşma meydana gelir çatallaşmada $L = 1$ 'dir ve L, 1'e ne kadar yakınsa, sistem gerilim çökmesi ne o kadar yakındır. Şekil 4.3'deki a noktası mevcut yük talebini göstermekte buna karşılık düşen gerilim değerleri ise Şekil 4.4-a'da görülmektedir. b noktası ise, $(V+v)/2$ 'ye karşılık düşen ve Şekil 4.4-b'de gösterilen

çatallaşma anına denk düşmektedir. Çok baralı güç sistemlerinde verilen her bir yük modeli için iki çözüm noktasından daha fazla çözüm olabilir.

Gerilim çökmesi, kesilmesi ve dalgalanmasını hesaplamak kabul edilen IEC 61000-4-30 [1,2,3,4] ve IEEE Std. 1159-1995 [12,2,4,8,59] iki tip standarda göre gerilim çökmesinin 10 ms. ile 1 dakikalık süre boyunca anma gerilimi efektif değerinin % 10'u ile % 90'ı arasındaki bir değere düşmesi olarak tanımlanması ile birlikte düşünüldüğünde kararlı bir çalışma için $L = \max L_i < 0,2$ ifadesinin iyi bir kriter olduğunu göstermiştir. 0.2 sınırı aşıldığı zaman, indeks yükteki çok az bir artışa karşılık hızlıca artar. Sonuç olarak, gerilim gösterici yaklaşım indeksi (GGYI) sıfıra ne kadar yakınsa, yük istemi çatallaşma kümesine o kadar yakın olur.

4.4. Lineer Olmayan Yükler İçeren Üç Baralı Dinamik Güç Sistemi Modeli

Bir güç sisteminin durum dinamiği durum denklemleri ve durum değişkenleri sistem sabitlerinden başka olmak üzere ara değişkenlerle temsil edilir. Bu çalışmada incelenen güç sistemi modelinde; bir generatör, sonsuz güçlü bir bara, lineer olmayan yükler ve bu yüklere bağlı paralel bir kondansatör bulunmaktadır. Burada yük olarak, asenkron motor yükü ve bu yüke paralel sabit P-Q yükü ele alınmıştır. Burada P_0 ve Q_0 asenkron motora ait aktif ve reaktif yük genliklerini, P_1 ve Q_1 'de asenkron motora paralel bağlı P-Q yükünün aktif ve reaktif güç genliklerini temsil etmektedir. Generatör dinamiğinin genel gösterimi aşağıdaki şekilde verilebilir;

$$\dot{y}(t) = g(y(t), z(t)) \quad (4.2)$$

Burada $y(t)$, generatör açısı- δ_m ve generatör açısal hızı- ω_m olmak üzere generatörün durum değişkenlerini içinde barındıran vektördür. $z(t)$ ise yük barasının gerilimi-V ve yük açısı- δ gibi yüke ait durum değişkenlerini barındıran vektördür.

Generatöre ait salınım dinamiği aşağıda gösterildiği üzere 2. dereceden lineer olmayan bir diferansiyel denklem ile gösterilebilir.

$$M \ddot{\delta}_m + D \dot{\delta}_m = P_m + V_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + V_m^2 Y_m \sin(\theta_m) \quad (4.3)$$

Burada ;

M : Generatör Atalet Momenti

D : Generatör Sönümlenme Katsayısı

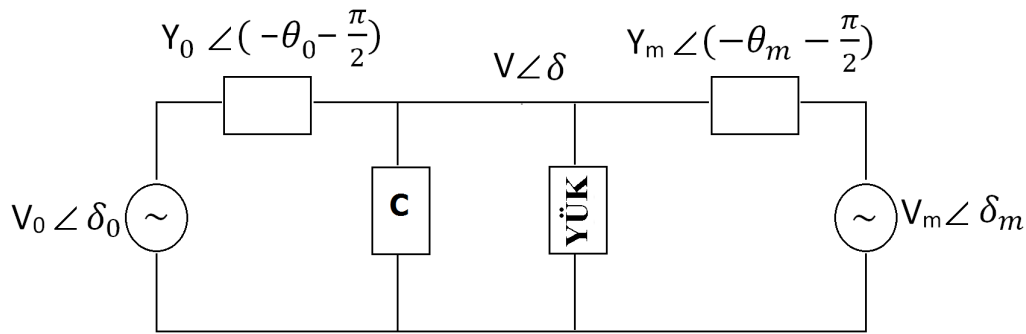
P_m : Generatör Mekanik Gücü

olup; yük modeli dinamiği aşağıdaki ifadelerle verilmiştir.

$$P_d = P_0 + P_1 + K_{pw} \dot{\delta} + K_{pv} (V + T \dot{V}) \quad (4.4)$$

$$Q_d = Q_0 + Q_1 + K_{qw} \dot{\delta} + K_{qv} V + K_{qv2} V^2 \quad (4.5)$$

Burada K_{pw} , K_{pv} , K_{qw} , K_{qv} , K_{qv2} ifadeleri asenkron motorun dinamiğinden gelen ifadelerdir ve sabit kabul edilmişlerdir. Burada, P_0 ve Q_0 asenkron motora ait aktif ve reaktif yük genliklerini, P_1 ve Q_1 'de asenkron motora paralel bağlı P-Q yükünün aktif ve reaktif güç genliklerini temsil etmektedir.



Şekil 4.5. Lineer Olmayan Yükler İçeren Dinamik Güç Modeli

Güç Sistemine İlişkin Durum Denklemleri

$$\dot{\delta}_m = \omega_m \quad (4.6)$$

$$M \dot{\omega}_m = -D \omega_m + P_m + V_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + V_m^2 Y_m \sin \theta_m \quad (4.7)$$

$$K_{qw} \dot{\delta} = -K_{qv2} V^2 - K_{qv} V + V_0' V Y_0' \cos(\delta + \theta_0') + V_m V Y_m \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) - (Y_0' \cos(\theta_0') + Y_m \cos(\theta_m)) V^2 + Q_d - Q_0 - Q_1 \quad (4.8)$$

$$TK_{qw} K_{pv} \dot{V} = K_{pw} K_{qv2} V^2 + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V + K_{pw} (Q_0 + Q_1 - Q_d) - K_{qw} (P_0 + P_1 - P_d) \quad (4.9)$$

Yük geriliminin sabit bir değerinde tutulması için yüke paralel olarak yerleştirilen C kapasitör etkisi, devrenin Thevenin eşdeğeri elde edilerek yük tarafına iletilen aktif ve reaktif güç ifadelerine dahil edilir. Buna göre V_0 , Y_0 ve θ_0 ifadeleri Thevenin eşdeğeri üzerinden tekrar düzenlenirse

$$V_0' = \frac{V_0}{\sqrt{(1 + C^2 Y_0^{-2} - 2C Y_0^{-1} \cos \theta_0)}} \quad (4.10)$$

$$Y_0' = \frac{Y_0}{\sqrt{(1 + C^2 Y_0^{-2} - 2C Y_0^{-1} \cos \theta_0)}} \quad (4.11)$$

$$\theta_0' = \theta_0 + \arctan\left(\frac{C Y_0^{-1} \sin \theta_0}{1 - C Y_0^{-1} \cos \theta_0}\right) \quad (4.12)$$

şeklinde yazılabilir.

Yükün Çekmiş Olduğu Reaktif ve Aktif Güçler

$$P = -V_0' V Y_0' \sin(\delta + \theta_0') - V_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) + (Y_0' \sin \theta_0' + Y_m \sin \theta_m) V^2 \quad (4.13)$$

$$Q = -V_0' V Y_0' \cos(\delta + \theta_0') - V_m V Y_m \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) - (Y_0' \cos \theta_0' + Y_m \cos \theta_m) V^2 \quad (4.14)$$

Güç Sistemine İlişkin Sabitler

$$M = 0.30, Q_0 = 0.3, Q_1 = 1080, V_0 = 1.0, V_m = 1.05, Y_0 = 3.33, Y_m = 5.0$$

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

$$P_1 = 0.0, C = 12, P_m = 1.0, D = 0.12$$

Güç Sistemine Ait Durum Değişkenlerinin Başlangıç Değerleri

$$\delta_m = 0.40, \omega_m = 0.02, \delta = 0.10, V = 0.96$$

4.5. Doğrusal Olmayan Yük İçeren Üç Baralı Güç Sisteminin Dinamik Çatallaşma Analizlerinin Yapılması

Çalışmanın bu bölümünde incelemesi yapılacak güç sistemleri sayısal ortamda modellenerek zaman serisi, faz portesi, çatallaşma analizleri yapılacaktır. Çalışma süresince yapılan analizler açık kaynak kodlu olarak geliştirilen AUTO dinamik çatallaşma tespit algoritmaları ve dinamik sistemlere ait sürekli ve geçici hal çözümlerini tespit edilmesi ve sisteme ait durum değişkenlerinin zaman serisi ve faz portreleri analizi yapma amacıyla geliştirilen X-WINDOWS tabanlı algoritmalar ortak bir platforma taşınarak yine X-WINDOWS tabanlı olarak geliştirilen bir masaüstü yazılımı üzerinden yapılmıştır. Tamamen açık kaynak kodlu ve geliştirilmeye açık olarak dünyanın bir çok üniversitelerinin

-Caltech- <http://sourceforge.net/projects/auto-07p/files/auto07p/>

-MIT http://openlibrary.org/books/OL23371402M/Xlib_reference_manual

-Princeton Üniversitesi

-Boston Üniversitesi

-Pittsburg Üniversitesi <http://www.math.pitt.edu/~bard/xpp/download.html> vd.

gibi üniversitelerin üzerinde geliştirmede bulunduğu matematiksel algoritmalar; C- Fortran-Python ve C++ dilleri kullanılarak geliştirilmiştir.

Bu matematiksel algoritmaların çoğu UNIX kütüphaneleri kullanılarak geliştirilmiştir. Farklı dillerle geliştirilen bu algoritmaların tümleşik olarak çalıştırılması “makefile” adı verilen ortak derleyici konfigürasyonları ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada gfortran+gpython+mingw+xlib derleyicileri makefile üzerinden konfigure edilerek derlemeler yapılmıştır. Geliştirilen bu yazılım, “Güç Sistemlerinde Dinamik Sistem ve Çatallaşma Analizörü” adı altında açık kaynak kodlu yazılım geliştirme mail gruplarının paylaşımına sunulmuştur. Ayrıca yazılımın Windows ortamında çalışabilmesi için Xming tarzı bir sunucu üzerinde koşabilecek şekilde gerekli platform ayarları da yapılarak Windows kullanıcılarının istifadesine de sunulmuştur.

Öncelikle incelenmesi yapılacak dinamik güç sistemine ait sabit parametreler, başlangıç koşulları, durum denklem takımları, faz portesi-zaman serisi eksen ölçek ayarları, sayısal analiz yöntemi (Runge-Kutta/Stiff/Euler/vd.), çatallaşma

parametreleri, dinamik çatallaşma tespiti için süreklilik analiz parametreleri Şekil 4.6'da gösterilen ODE formatında girilir. Bu çalışma boyunca yapılacak tüm dinamik analizlere ait ODE dosyası içerikleri EK-A kısmında tam kodlarıyla verilecektir. Şekil 4.4.'de üzerinde çalışılan güç sistemine, yukarıda detaylı olarak safhalara ayrılan ODE formatı oluşturma adımları uygulanarak dinamik model analize hazır hale getirilmiştir.

```

1 ***** Power System Model Bifurcation Analysis*****
2 *****Voltage Collapse.ode*****
3 *****FINAL WORK*****
4 #IM nin Diger Parametreleri
5 param Q1=10.80, K9=0.00, Qsvc=0.00, Kpw=0.40, Kpv=0.30, Kqw=-0.03, Kqv=-2.80, Kqv2=2.10, P1=0
6 param T_e=8.50, P0=0.6, Q0=1.2, Y0=20, tetau0=-8, tetau=-0.1471659574468085
7 param Vu0=2.5, Ym=5, tetam0=-8, tetam=-0.1471659574468085
8 param Vm=1.00, Fm=1, M=0.30, D=0.12, Yu0=8, tetau0=-12, tetau=-0.2037659574468085
9
10 =====
11 A=Yu0*sin(tetau0)+Ym*sin(tetam)
12 B=Yu0*cos(tetau0)+Ym*cos(tetam)
13 C=T_e*Kqw*Kpv
14 Pd=-Vu0*Y4*Yu0*sin(Y3+tetau0)-Vm*Y4*Ym*sin(Y3-Y1+tetam)+A*Y4^2
15 Qd=Vu0*Y4*Yu0*cos(Y3+tetau0)+Vm*Y4*Ym*cos(Y3-Y1+tetam)-B*Y4^2
16
17 #Güc Sisteminde Kullanilacak Baslangiç Sartlarimiz
18 #Y1=Generator Voltage Phase Angle=====
19 #Y2=Generator Rotor Speed=====
20 #Y3=Load Voltage Phase Angle=====
21 #Y4=Magnitude of Load Voltage=====
22 #Dynamic Power System Equations
23 #=====
24 Y1(0)=0.40
25 Y2(0)=0.02
26 Y3(0)=0.10
27 Y4(0)=0.96
28 #=====
29 Y1'=Y2
30 Y2'=(-D*Y2+Em+Vm*Y4*Ym*sin(Y3-Y1-tetam)+Vm^2*Ym*sin(tetam))/M
31 Y3'=(-Kqv2*(Y4^2)-Kqv*Y4+Qd-Q0+Qsvc-Q1)/Kqw
32 Y4'=(((Kpw*Kqv2*(Y4^2)+(Kpw*Kqv-Kqw*Kpv)*Y4+Kqw*(Pd-P0-P1)+Kpw*(Q0+Q1-Qsvc-Qd)))/C)+K9*Y1^2*Y2
33 #=====
34 #Q1=Reactive Power Demand[Bifurcation Parameter Lamda=Q1]=====
35 v1(0)=0.40

```

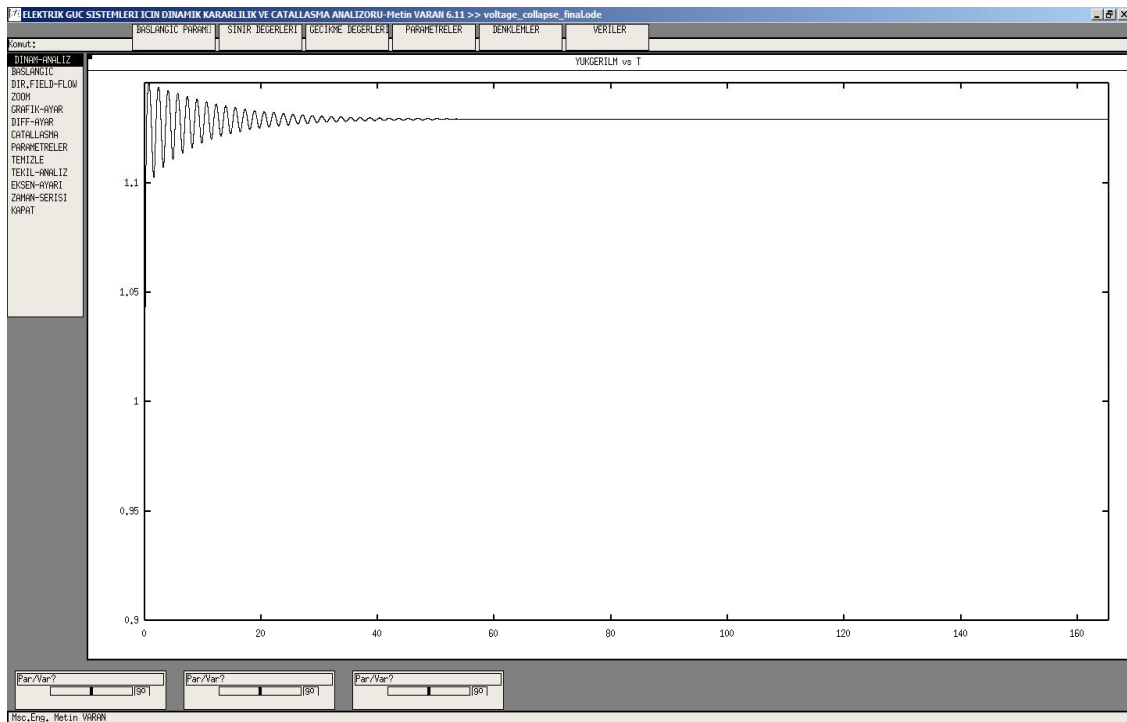
Şekil 4.6. Dinamik Analiz Ortamında Güç Sistemi Modelinin ODE Formatında Oluşturulması

Verilen dinamik güç sistemi modeli üzerinde yapılan çalışmalarda sistem üzerindeki çatallaşma noktalarının ve buna bağlı periyodik yörüngelerin dinamik olarak tespit edilmesi sistemin osilasyonlu olduğu aralıkların uzun olduğu (sistemin daha geniş bir ölçekte izlenebilirliğini arttırdığı için) ve bu osilasyonlara rağmen sistemin kararlılığını muhafaza ettiği bir çalışma noktası üzerinden başlatılması ise mümkün olacaktır. Bu şart dinamik çatallaşma algoritmasının ön koşuludur. Sistemin osilasyonlarını izleyebileceğimiz aralıklar ne denli uzun olursa o denli detaylı ve hassas çatallaşma portreleri almak mümkün hale gelecektir. Bu amaçla çatallaşma

analizleri boyunca $D=0.12$, $D=0.08$ olmak üzere iki farklı generatör sönümlenme katsayı değerleri kullanılarak analizleri yapılmıştır.

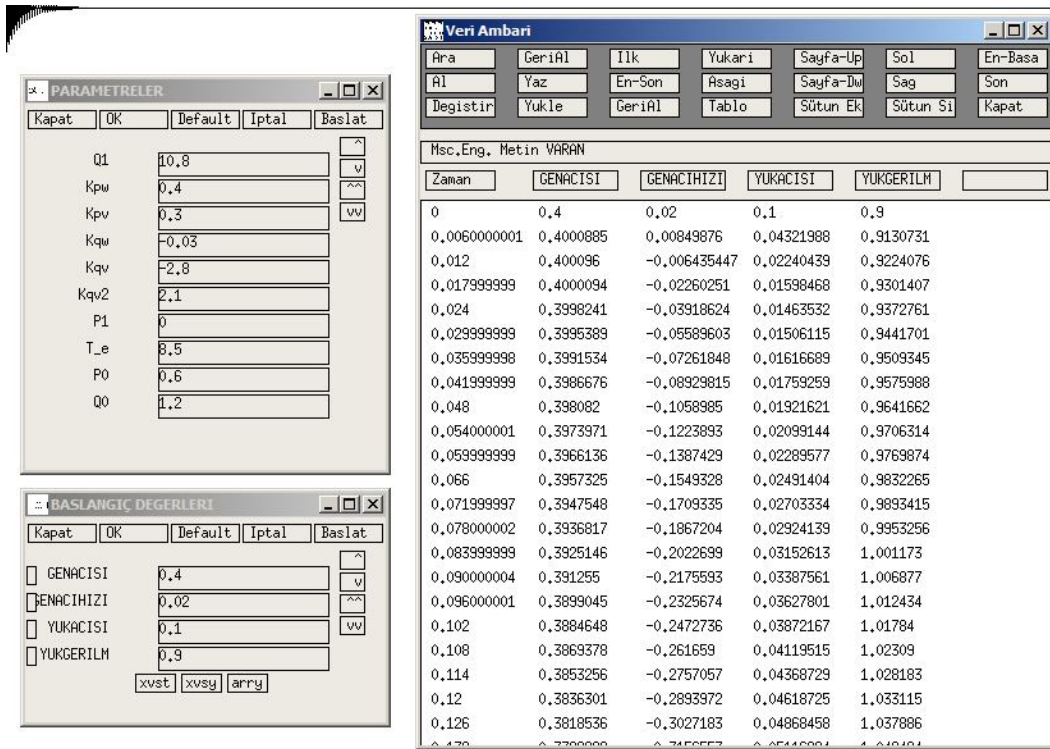
4.6. Üç Baralı Güç Sisteminin $D=0.12$ Parametresi Seçimi Dahilinde Çatallaşma Noktalarının İncelemesi

Seçilen parametreler dahilinde yük geriliminin zamanla değişimi Şekil 4.7.'de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere yük gerilimi 1.120 (pu) mertebesinde olup, başlangıçta biraz osilasyon yaptıysa da 1.180 değerinde dengelenmiştir.



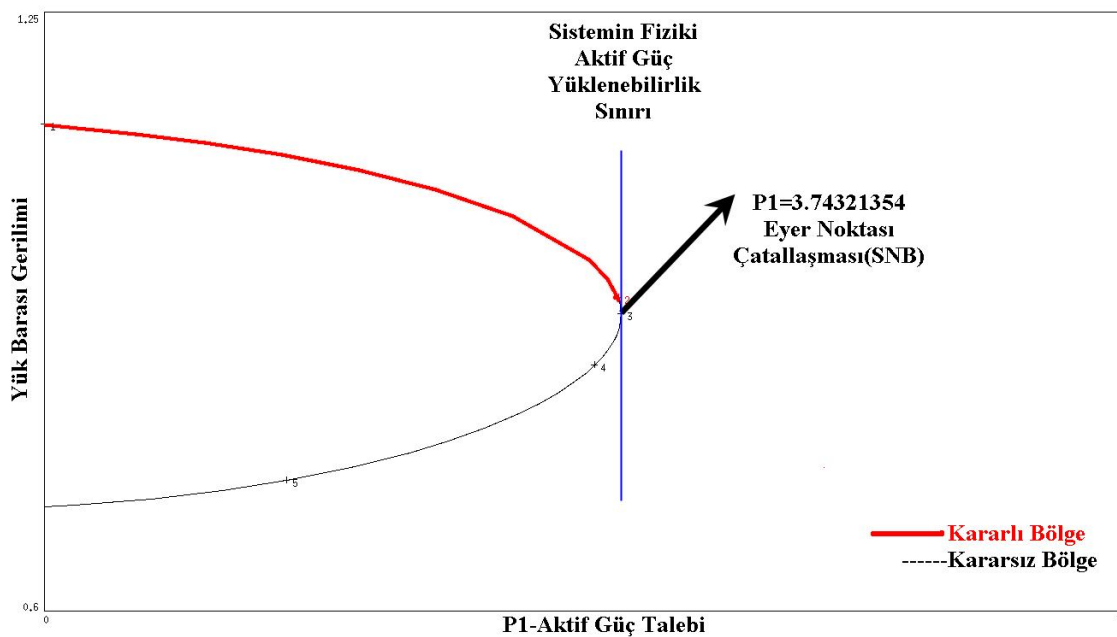
Şekil 4.7. $D=0.12$ ve $Q_1=10.80$ Değeri İçin Yük Gerilimi- Zaman Değişimi

Q-V analizlerine geçmeden sistemin P-V eğrisi üzerinde için çatallaşma oluşumları incelenecektir. Burada P_1 yükü çatallaşma parametresi olarak seçilmiştir. Oluşturulan çatallaşma diyagramı kaçtığı Şekil 4.9'da görülmektedir.



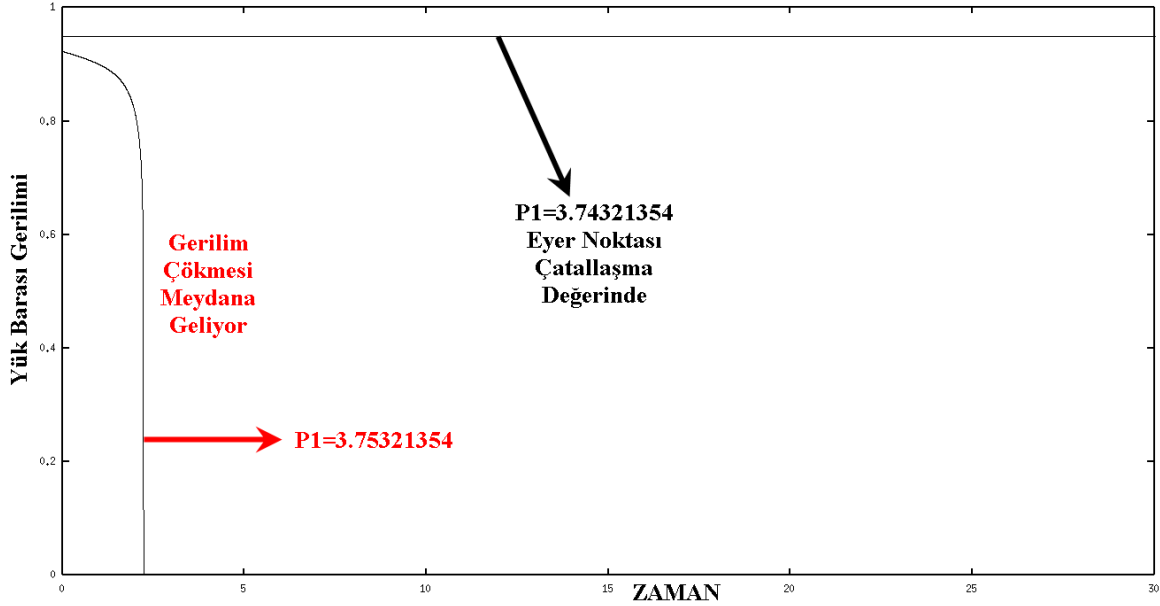
Şekil 4.8. $D=0.12$ ve $Q_1=10.80$ Değeri İçin Tüm Durum Değişkenlerine İlişkin Elde Edilen Veri Listesi

Şekil 4.8’de yapılan dinamik analiz neticesinde tüm durum değişkenlerine ait veriler 0.006 adım aralığı hassasiyeti için elde edilmiştir. $t=1000$ ms boyunca bu analiz devam ettirildiği düşünülürse ortalama 170.000 değer üzerinden çatallaşma analizlerinin yapılacağı söylenebilir.



Şekil 4.9. $D=0.12$ Parametresi için Çatallaşma Diyagramı

Burada $P_1=3.74321354$ değerinde eyer noktası çatallaşması tespit edilmiştir. Eyer noktası çatallaşması P-V eğrisinde sistemin aktif güç yüklenebilirlik sınırını göstermektedir. Bu değerden fazla yükleme durumları için güç sistemi geriliminin çok kısa sürede çökmeye gittiği, yük açısının da kaçtığı Şekil 4.10'da görülmektedir.

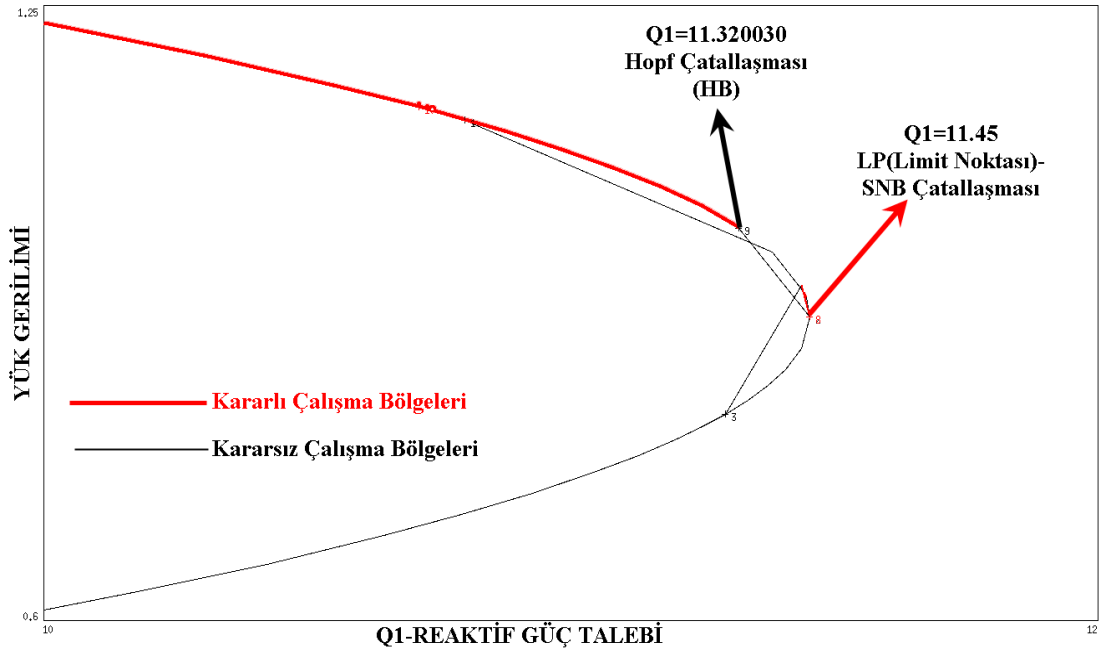


Şekil 4.10. $P_1=3.74321354$ Çatallaşma Noktası Sınırlarında Yük Gerilimi-Zaman Değişimi

Q-V eğrisi analiz metodu güç akışı programlarının özellikle maksimum güç transferi şartlarına yakın çalışma bölgelerinde yakınsama hatalarının zorluklarının üstesinden gelmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Gerilim kararsızlığının birincil ve ana nedeni, normal olmayan sistem çalışmaları ve kontrolör davranışları altında, güç sisteminin yük taleplerini karşılamaya çalışan belirli sistem baralarının reaktif güç taleplerine yeterli cevabı veremeyişi yargısı ve burada incelenen üç baralı güç sisteminin yüksek reaktif güç taleplerinde bulunan doğrusal olmayan yük taleplerine koştuğu ve güç transfer limitleri yakınlarında çalıştığı dikkate alınarak bundan sonraki başta gerilim kararlılığı olmak üzere sistem kararlılık analizleri Q-V eğrileri üzerindeki çatallaşmalar incelenerek yapılacaktır.

4.6.1. Birinci adım çatallaşma analizi

Bu şartlar altında yük barası geriliminin Q_1 -Reaktif Güç Talebi değişimi ile olan çatallaşma diyagramının 1. adımını Şekil 4.11'de verildiği üzere elde edilir.

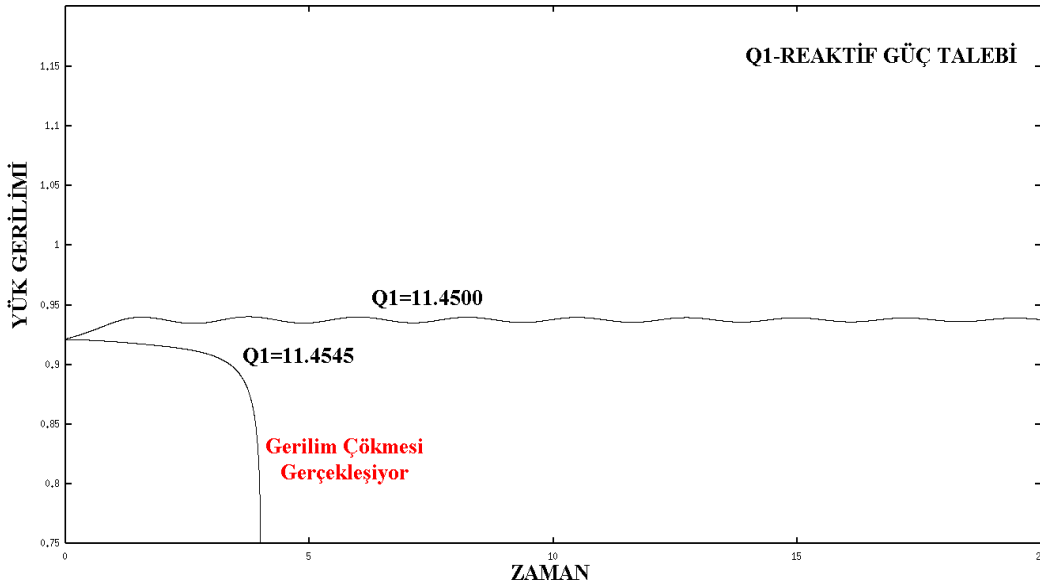


Şekil 4.11. D=0.12 Parametresi için 1. Adım Çatallaşma Diyagramı

Şekil 4.11’de gösterildiği gibi çatallaşma analizinin 1. adımında $Q_1=11.45$ reaktif güç talebi değerinde, Generatör Açısı=0.33918, Generatör Açısız Hızı=0, Yük Açısı=0.13406, Yük Gerilimi= 0.92132 olan başlangıç değerlerine sahip sistem şartlarında eyer noktası çatallaşması(SNB) tespit edilmiştir.

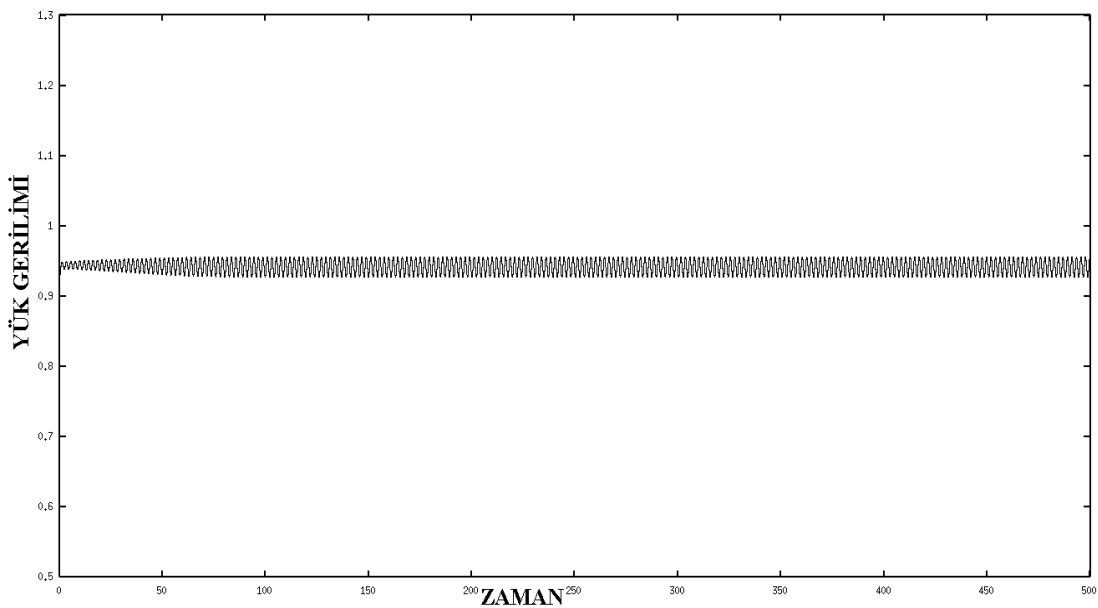
4.6.1.1. $Q_1=11.45$ değerinde oluşan eyer noktası çatallaşmasının etkileri

Bu çatallaşma sistemin fiziki reaktif güç yüklenebilirlik sınırını da temsil ettiği için “Limit Noktası-LP” olarak da adlandırılır. Bu değer sistemin yüklenebilirlik sınırı olduğu $Q=11.4545$ (limit noktasının çok az üzerinde reaktif güç talebi) reaktif güç talebi değerindeki yük geriliminin zamana göre değişim eğrisi Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



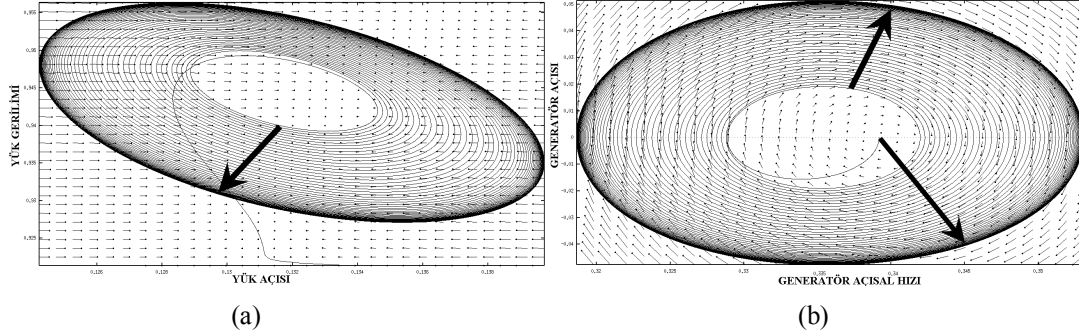
Şekil 4.12. $Q_1=11.45$ Çatallaşma Noktası Sınırlarında Yük Gerilimi-Zaman Değişimi

Eyer noktası çatallaşma noktasında sistemin özdeğerleri $e_1 = -94.598774 + i0$, $e_2 = -0.488315 + i2.603053$, $e_3 = -0.488315 - i2.603053$ ve $e_4 = -0.073237$ şeklindedir. Burada kompleks eşlenikler negatif olduğu görülmektedir yani bu değerde sistem karardır. Eyer noktası sonrasında ($Q_1=11.4545$ değerinde) sistemin Reaktif Güç Talebine cevap veremeyip gerilim çökmesine doğru gittiği Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Sistemin $Q_1=11.45$ sınırından önceki davranışını da araştırmak amacıyla, $Q_1=11.4456$ değeri için yük gerilimi-zaman eğrisi, yük açısı-yük gerilimi faz portesi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri çizdirilmiştir.



Şekil 4.13. $Q_1=11.4456$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi

Şekil 4.13’de $Q_1=11.4456$ reaktif güç talebi değeri için yük gerilimi-zaman değişimi grafiğinde görüldüğü üzere yük gerilimi inceleme boyunca osilasyonlarını devam ettirmektedir. Şekil 4.14’de verildiği üzere, generatör ve yüke ait faz portrelerinde devam eden osilasyon etkisi açıkça görülmektedir.

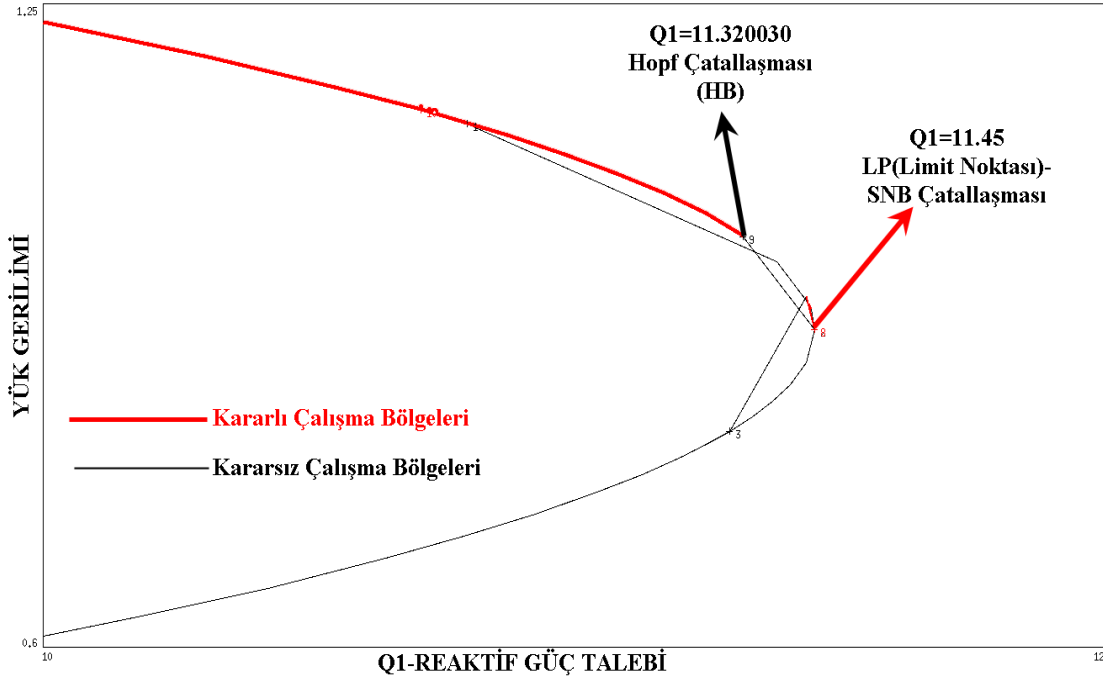


Şekil 4.14. a)- $Q_1=11.4456$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
b)- $Q_1=11.4456$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Generatör Açısı-Generatör Açisal Hızı Faz Portresi

Faz portrelerinde gösterilen okların yönü faz portresinin değişim yönünü temsil eder. Bu noktaya doğru sistemin özdeğerleri analiz edilerek sistemin kararlılığı üzerinde yorumlar yapılacaktır. Buna göre sistemin $Q_1=11.4456$ Reaktif Güç Talebi değerinde özdeğerleri $e_1= -100.871589+i0$, $e_2= 0.027703+i2.939297$, $e_3= 0.027703-i2.939297$ ve $e_4= -3.247653$ şeklindedir. Burada kompleks eşleniklerin pozitif olduğu görülmektedir yani bu değerinde sistem kararsızdır.

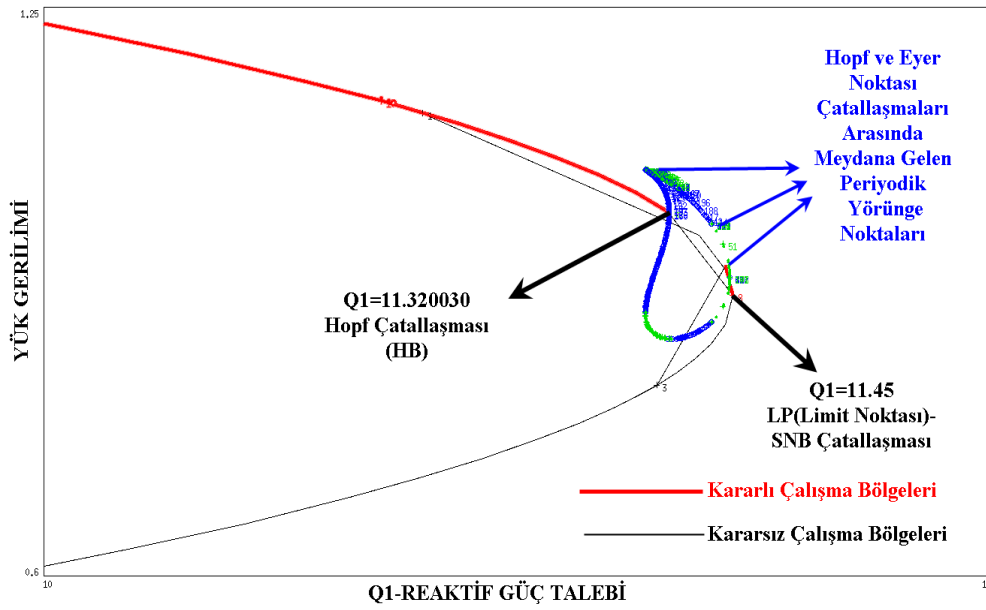
4.6.2. İkinci ve üçüncü adım çatallaşma analizi

Şimdi de bu kararsızlığın sebeplerini analiz etme amacıyla, dinamik çatallaşma analizimize kaldığımız yerden geri dönelim. En son çatallaşma diyagramı üzerinde $Q_1=11.45$ değerinde eyer noktası çatallaşması tespit edilmişti. Bu nokta üzerinden dinamik yörünge analizi yapıldıktan aşağıdaki 2. adım çatallaşma diyagramı elde edilir.



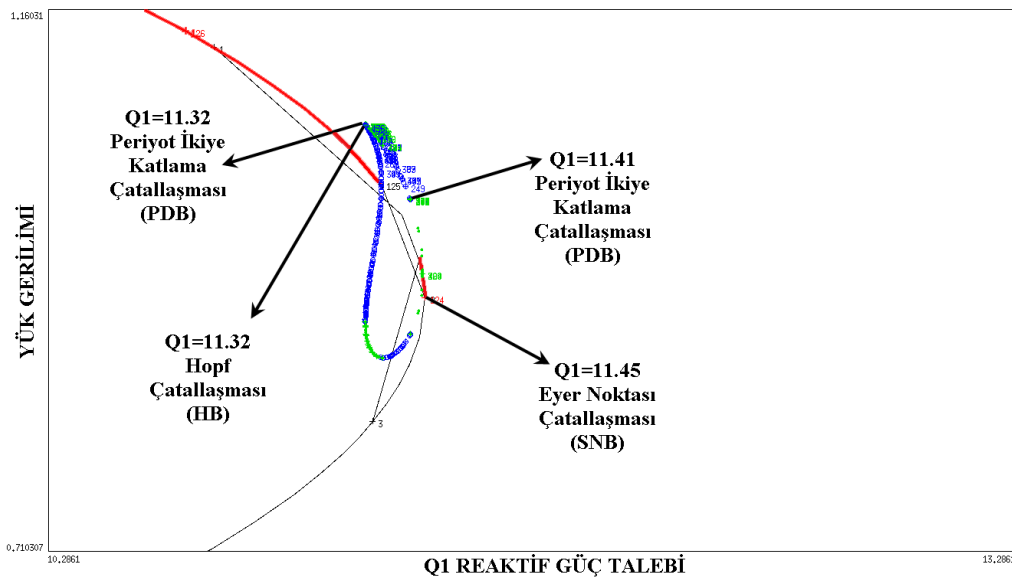
Şekil 4.15. $D=0.12$ Parametresi için 2. Adım Çatallaşma Diyagramı

Çatallaşma analizinin devamı neticesinde $Q=11.320030$ reaktif güç talebi değerinde Hopf çatallaşması (HB) tespit edilmiştir ve Şekil 4.15.'de çatallaşma diyagramı verilmiştir. Hopf ve eyer noktası çatallaşmaları gibi sistem üzerinde belirgin etkileri olan çatallaşmalarda, sistemi bu kritik noktalara götürecek rotaların tespit edilmesi önemli bir erken müdahale aşamasıdır. Periyodik yörünge analizi bu amaçla uygulabilecek en bilinen analiz yöntemidir. Bu çatallaşmalar için periyodik yörüngelerin izlenmesi genel olarak sistemin gidişatının izlenmesi anlamına da gelir. İki çatallaşma arasında (SNB ve HB çatallamaları arasında) meydana gelen dinamiklerin incelenmesi adına, hopf çatallaşmasına ait periyodik yörünge analizi yapılacaktır. Yapılacak periyodik analizi ile hopf ve eyer noktası arasındaki kararsız bölgenin sebepleri çatallaşma dinamikleri paralelinde yorumlanacaktır.



Şekil 4.16. D=0.12 Parametresi için 3. Adım Çatallaşma Diyagramı

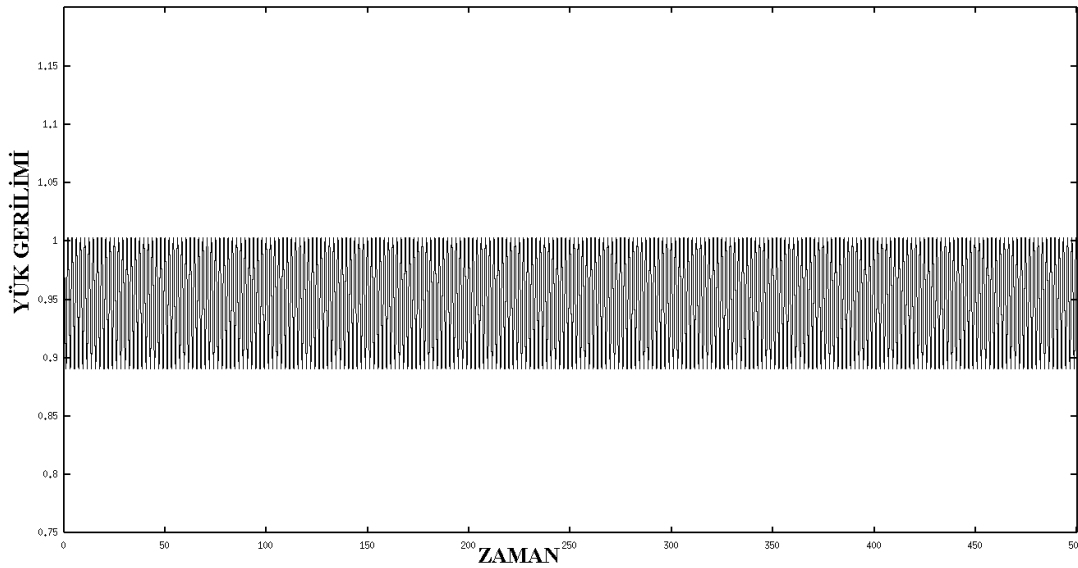
Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de gösterildiği üzere, yapılan 2.çevrim yörünge analizleri neticesinde hopf çatallaşma periyodik yörüngelerinde iki adet periyot ikiye katlama çatallaşması tespit edilmiştir. Ayrıca alt süreklilik çevrimlerinde de farklı veya benzer başlangıç şartlarında çok sayıda çatallaşma tespiti yapılmıştır.[EK-A/EK-B] Burada periyodik yörünge çatallaşmaları; yük gerilimi-zaman eğrisi, yük açısı-yük gerilimi faz portesi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri üzerinden analiz edilerek bu çatallaşmaların fiziksel karşılıkları yorumlanacaktır.



Şekil 4.17. D=0.12 Parametresi için 3. Adım Çatallaşma Diyagramının Büyütülmüş Gösterimi

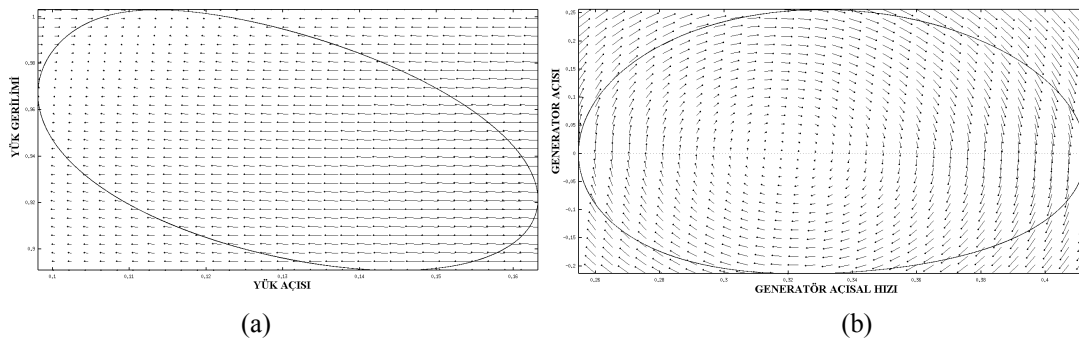
4.6.2.1. $Q_1=11.41$ değerinde oluşan periyot ikiye katlama çatallaşmasının etkileri

Bu amaçla önce $Q_1=11.41$ noktasında meydana gelen periyot ikiye katlama çatallaşması ele alınacaktır. Periyot ikiye katlama noktasında, bu noktadan sonra ve bu noktadan önce ikişer değer alınarak muhtemel kaos rotaları tespit edilecektir. Şekil 4.18'de $Q_1=11.41$ reaktif güç talebi değeri için yük gerilimi-zaman değişim eğrisi çizdirilmiştir. Yük gerilimdeki osilasyonu artışı açık olarak görülmektedir.



Şekil 4.18. $Q_1=11.4100$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi

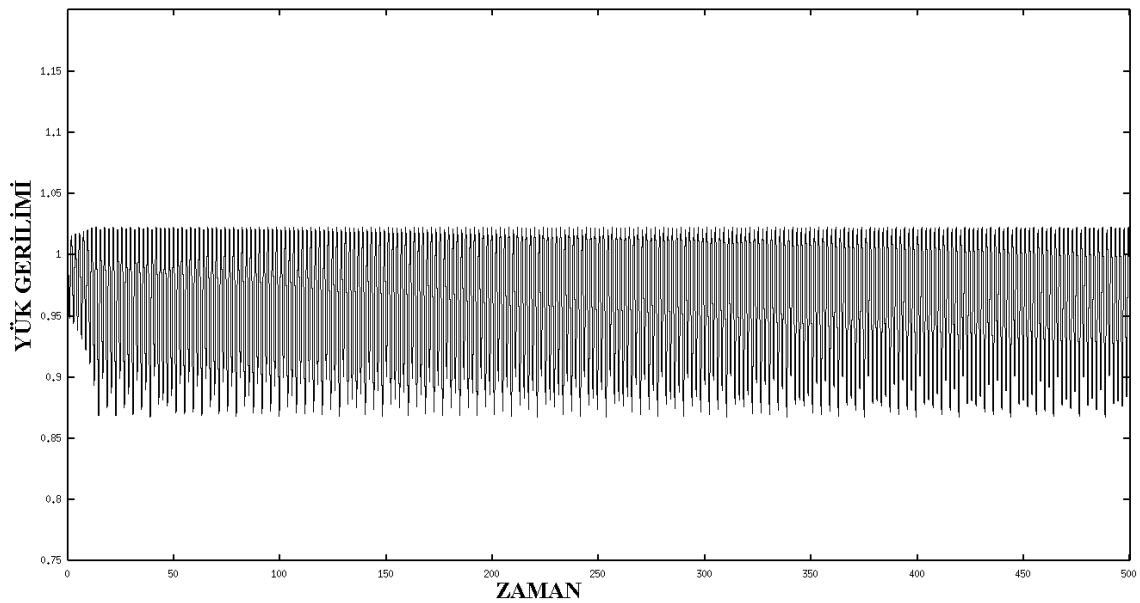
Şekil 4.19'da $Q_1=11.41$ reaktif güç talebi değeri için yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri vektör alanla değişimleri ile birlikte çizdirilmiştir.



Şekil 4.19. a)- $Q_1=11.4100$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
b)- $Q_1=11.4100$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi

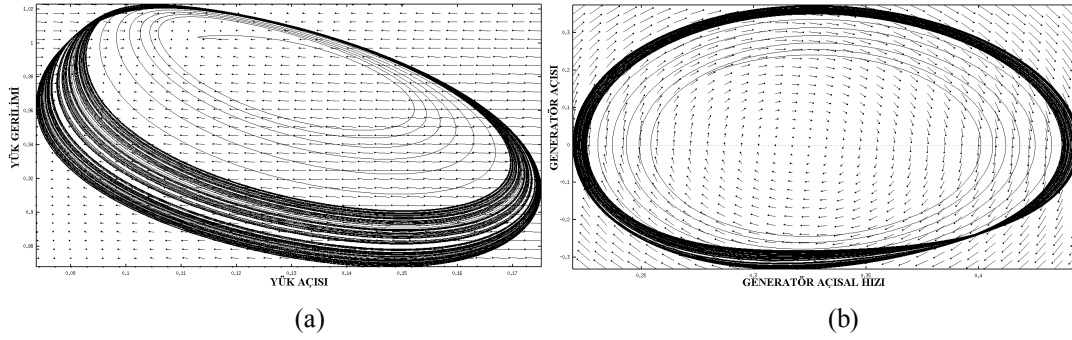
Buna göre sistemin $Q_1=11.4100$ reaktif güç talebi değerinde özdeğerleri $e_1= -108.061788+i0$, $e_2= 0.050957+i3.282614$, $e_3= 0.050957-i3.282614$ ve $e_4= -4.912958$ şeklindedir. Şekilde de görüldüğü üzere periyot ikiye katlama çatallaşması değerinde faz portrelerinde tam bir limit döngü oluşumu meydana gelmiştir. Burada kompleks eşleniklerin pozitif olduğu görülmektedir yani bu değerde sistem kararsızdır. Kararsız limit döngüsü kaosa doğru giden değişimin önhabercisidir. Bu kararsızlık sebebi periyot katlamalı yörüngelerde gezinerek daha iyi anlaşılacaktır.

Şimdi de bu kararsızlığın sebeplerini analiz etme amacıyla $Q_1=11.3800$ ve $Q_1=11.3960$ değerleri için yük gerilimi-zaman eğrisi, yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri ve bunların fiziksel karşılıkları yorumlanacaktır.



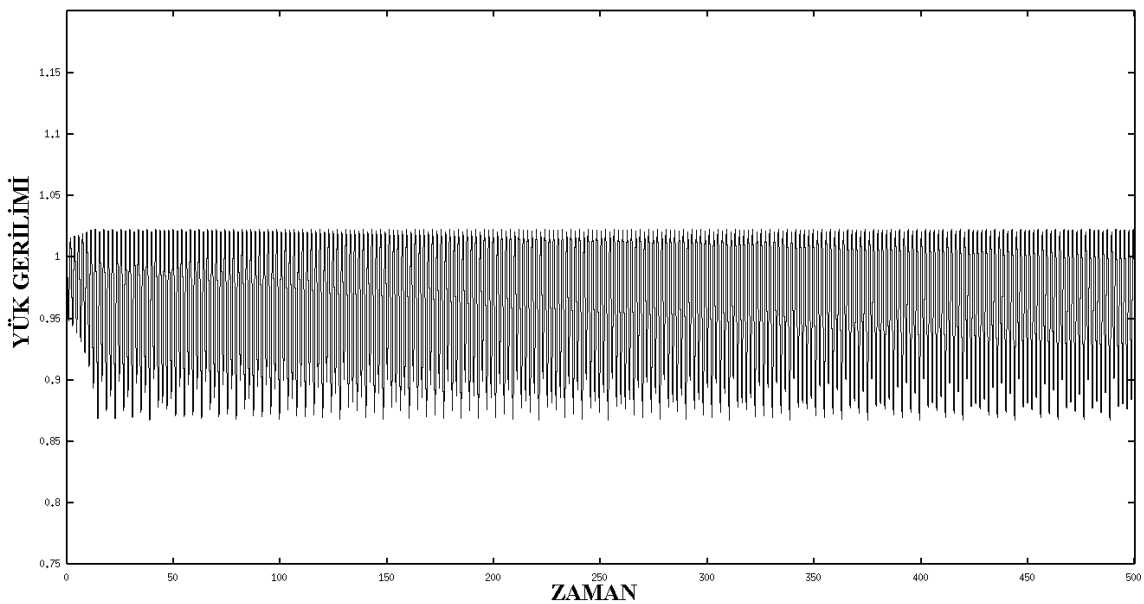
Şekil 4.20. $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi

Şekil 4.20'de $Q_1=11.3800$ reaktif güç talebi değeri için yük gerilimi-zaman değişim eğrisi çizdirilmiştir. Yük gerilimdeki osilasyonu artışının devam etmekte olduğu açık olarak görülmektedir.



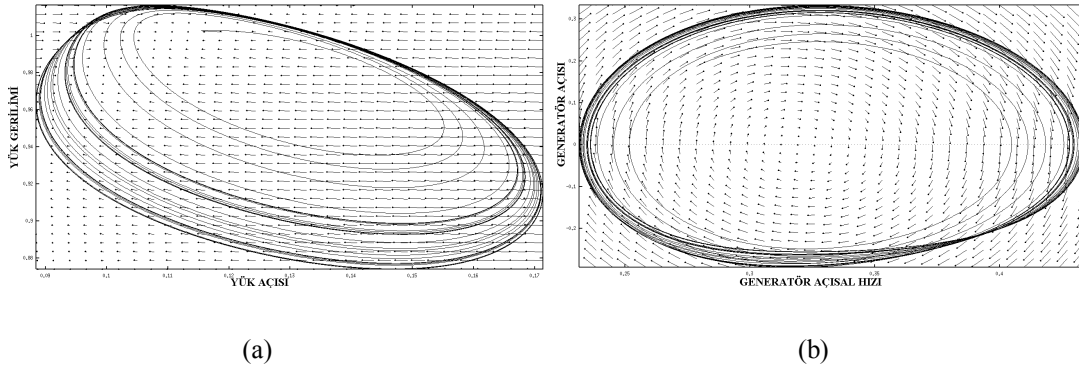
Şekil 4.21. a)- $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
b)- $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açisal Hızı Faz Portresi

Şekil 4.21’de $Q_1=11.3800$ reaktif güç talebi değeri için yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açisal hızı faz portreleri vektör alanla değişimleri ile birlikte çizdirilmiştir. Burada faz portrelerinde meydana gelen kaos çekerleri açık görülmektedir. Güç sisteminde kaskat bir periyot katlama oluşumu vardır. Bu oluşumun daha detaylı tahlili $Q_1=11.3960$ değeri için faz portreleri ve yük gerilimi-zaman eğrileri oluşturularak devam ettirilecektir.



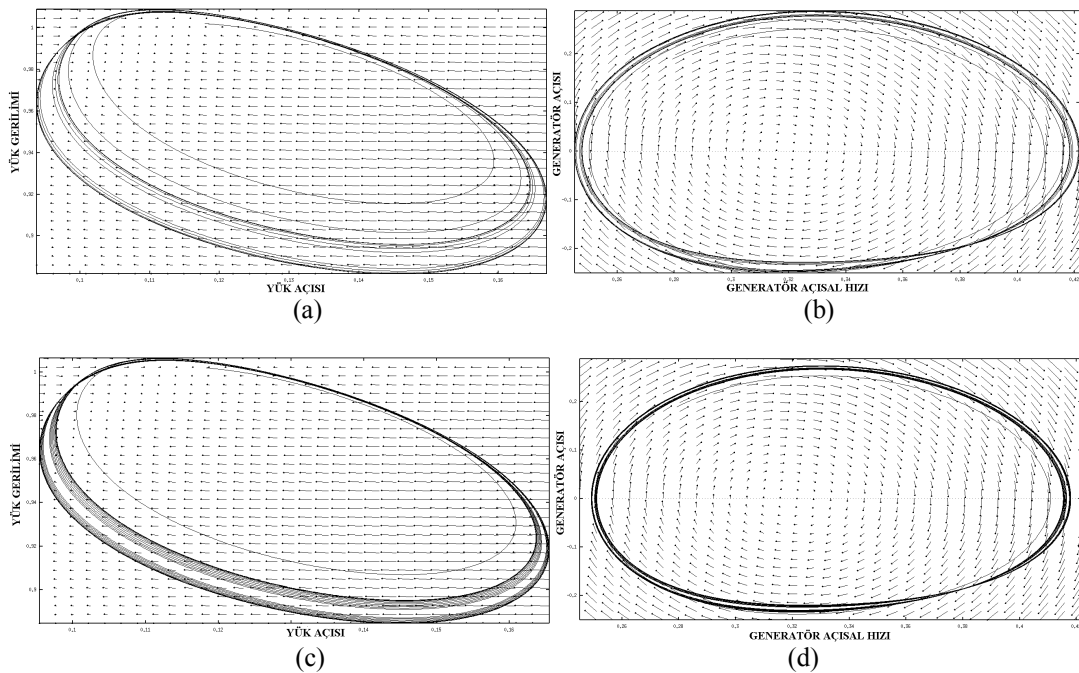
Şekil 4.22. $Q_1=11.3960$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Zaman Değişimi

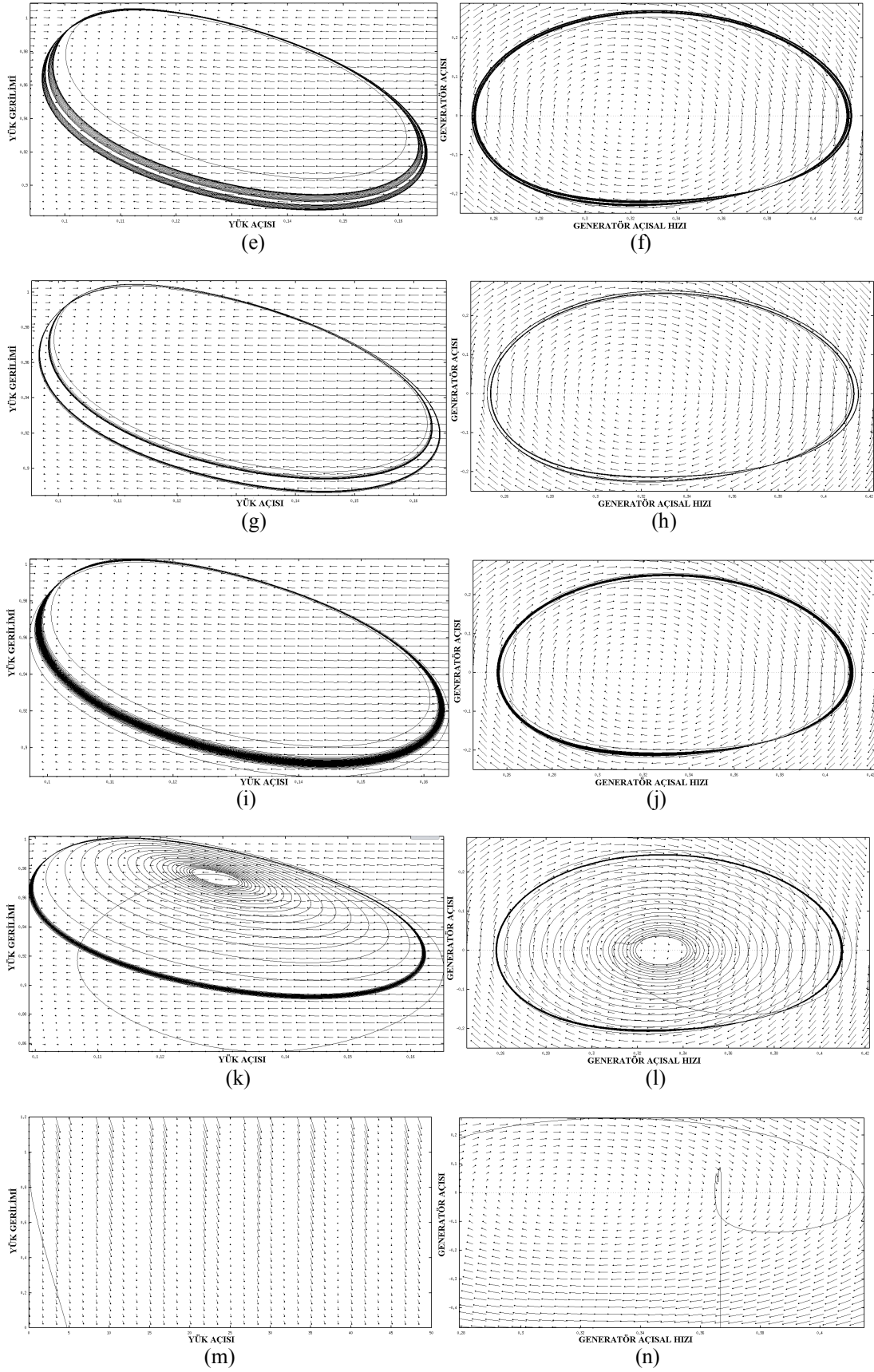
Şekil 4.22’de $Q_1=11.3960$ reaktif güç talebi değeri için yük gerilimi-zaman değişim eğrisi çizdirilmiştir. Yük gerilimdeki osilasyonu artışının devam etmekte olduğu açık olarak görülmektedir.



Şekil 4.23. a)- $Q_1=11.3960$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
b)- $Q_1=11.3960$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generator Açısı-Generator Açısız Hızı Faz Portresi

Şekil 4.23’de $Q_1=11.3960$ reaktif güç talebi değeri için yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generator açısı-generator açısız hızı faz portreleri vektör alanla değişimleri ile birlikte çizdirilmiştir. Burada faz portrelerinde meydana gelen kaos çekerlerinin yavaş yavaş periyot-3x katlamalı çatallaşmaya gittiği görülmektedir. Şimdi de bu periyot-3x katlamalı çatallaşma oluşumlarını ve ondan sonraki Q_1 değerleri generator ve yük tarafında meydana gelen değişimleri daha detaylı göstermek amacıyla sırasıyla $Q_1=11.4020$, $Q_1=11.4052$, $Q_1=11.4060$, $Q_1=11.4076$, $Q_1=11.4100$, $Q_1=11.4116$ ve son olarak da $Q_1=11.4124$ değerleri için yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generator açısı-generator açısız hızı faz portreleri ve bunların fiziksel karşılıkları yorumlanacaktır.

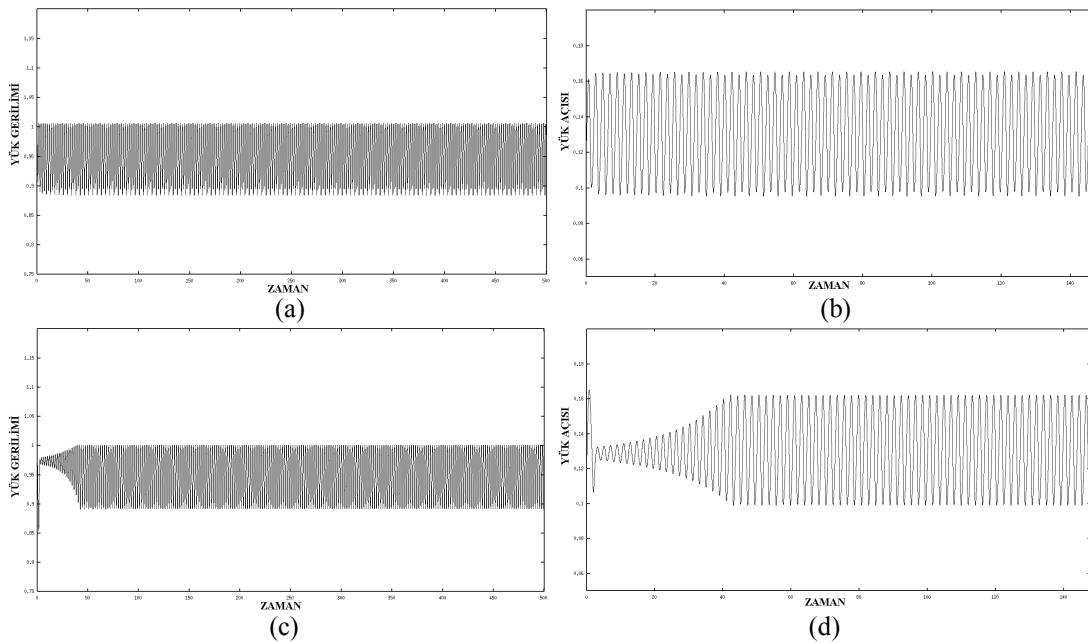


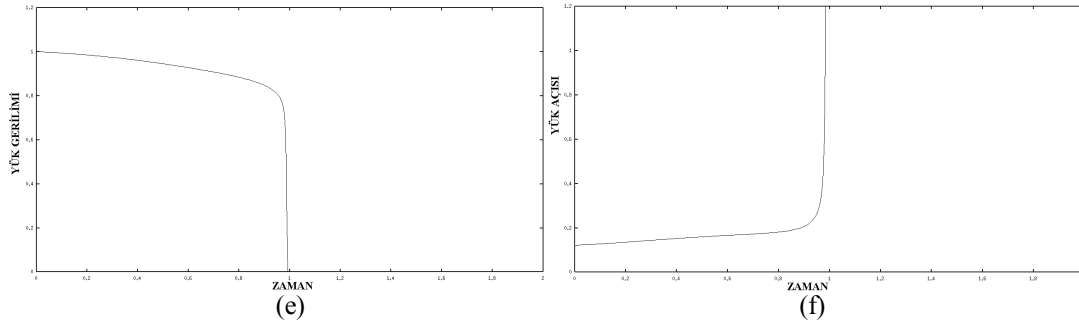


Şekil 4.24. a)- $Q_1=11.4020$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 b)- $Q_1=11.4020$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açisal Hızı Faz Portresi

- c)- $Q_1=11.4052$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
d)- $Q_1=11.4052$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi
e)- $Q_1=11.4060$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
f)- $Q_1=11.4060$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi
g)- $Q_1=11.4076$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
h)- $Q_1=11.4076$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi
i)- $Q_1=11.4100$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
j)- $Q_1=11.4100$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi
k)- $Q_1=11.4116$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
l)- $Q_1=11.4116$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi
m)- $Q_1=11.4124$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
n)- $Q_1=11.4124$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi

Şekil 4.24’de adım adım yapılan hesaplamalar ve faz portreleri analizleri ile periyot ikiye katlamalı çatallaşmanın kararsızlığı anlamlı hale gelmektedir. Bu değerlerde sırasıyla $Q_1=11.4020$ değerinde periyot-4 katlamalı yörünge, $Q_1=11.4052$ değerinde periyot-8 katlamalı yörünge, $Q_1=11.4060$ değerinde kaos çekerli yörünge, $Q_1=11.4076$ değerinde periyot-6 katlamalı yörünge, $Q_1=11.4100$ değerinde tekrar kaos çekerli yörünge, $Q_1=11.4116$ değerinde kaos çekerli ince yörünge ve son olarak da $Q_1=11.4240$ değerinde generatör parametreleri ve yük açısının çok yüksek değerlere çıkması (kaçma durumu) ve yük geriliminin çökmesi meydana gelmiştir. Burada kararsız limit döngüsünün kaosa doğru giden yolun habercisi olduğu hipotezi doğrulanmıştır. Bu değerlere ilişkin yük gerilimi ve yük açısının zaman eksenindeki değişimleri aşağıdaki gibi adım adım çizdirilmiştir.





Şekil 4.25. a)- $Q_1=11.4052$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 b)- $Q_1=11.4052$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi
 c)- $Q_1=11.4116$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 d)- $Q_1=11.4116$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi
 e)- $Q_1=11.4124$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 f)- $Q_1=11.4124$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi

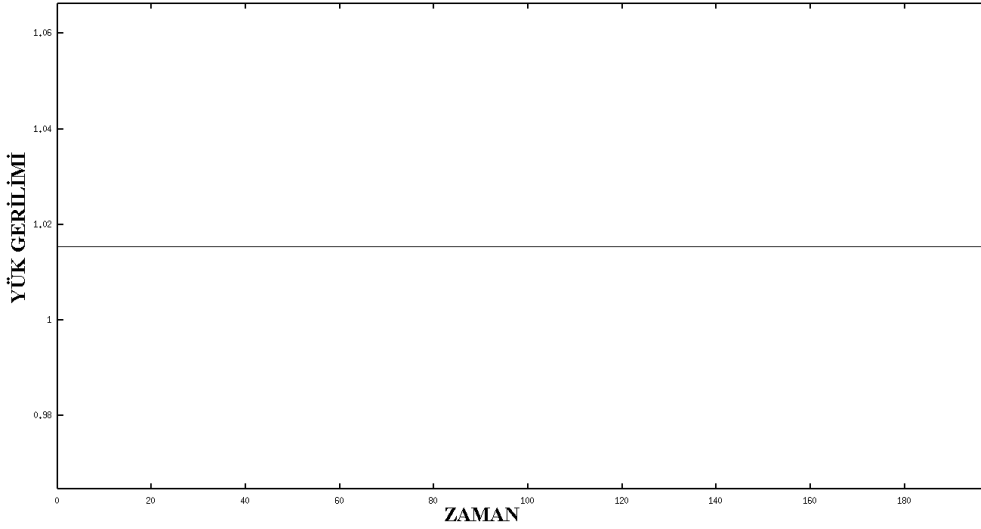
Buna göre yük açısı ve yük geriliminde meydana gelen değişimlerin faz portrelerinde görülen kaskat periyot çatallaşma durumunu pekiştirdiği görülmektedir. Zira Şekil 4.25.a-b'de gösterilen $Q_1=11.4052$ değerindeki osilasyonlar, Şekil 4.25.c-d'de gösterilen $Q_1=11.4116$ değeri için de değişerek devam etmekte ve nihai olarak da Şekil 4.25.e-f'de gösterilen $Q_1=11.4124$ değerinde yük gerilimin çok kısa bir sürede çökmeye doğru gittiği, yük açısının da aynı çabuklukla kaçtığı açık olarak görülmektedir.

4.6.2.2. $Q_1=11.320030$ değerinde oluşan hopf çatallaşmasının etkileri

$Q_1=11.320030$ hopf noktasındaki sistemin başlangıç değerleri ve bu değerlere bağlı özdeğerler sırasıyla şu şekildedir;

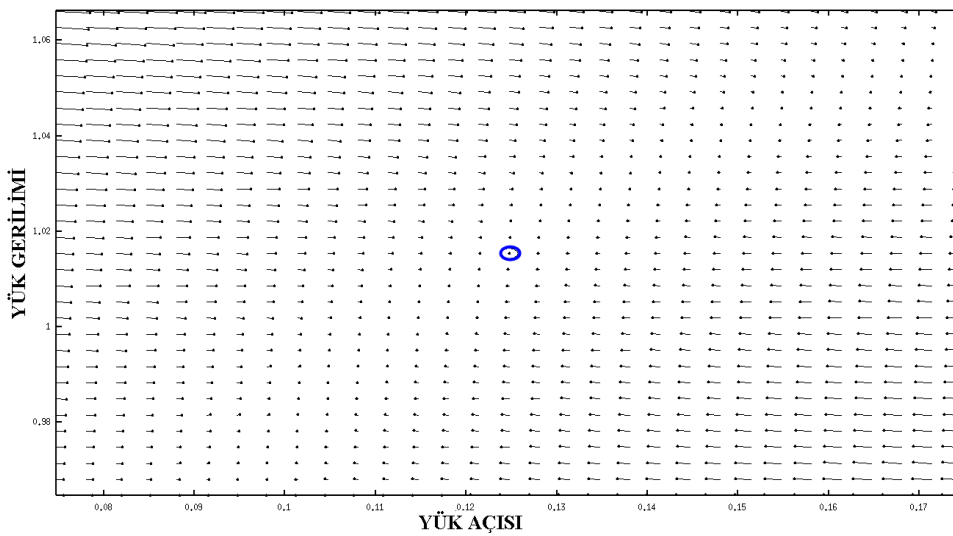
- Generatör Açısı=0.3244726
- Generatör Açısız Hızı=0
- Yük Açısı= 0.12472604
- Yük Gerilimi= 1.015379

$e_1=-117.755359+i0$, $e_2=-0.000391+i3.498906$, $e_3=-0.000391-i3.498906$, $e_4=-8.892286+i0$. Burada kompleks eşleniklerin negatif olduğu görülmektedir yani bu değerinde sistem hopf çatallaşmasında olmasına rağmen kararlıdır.



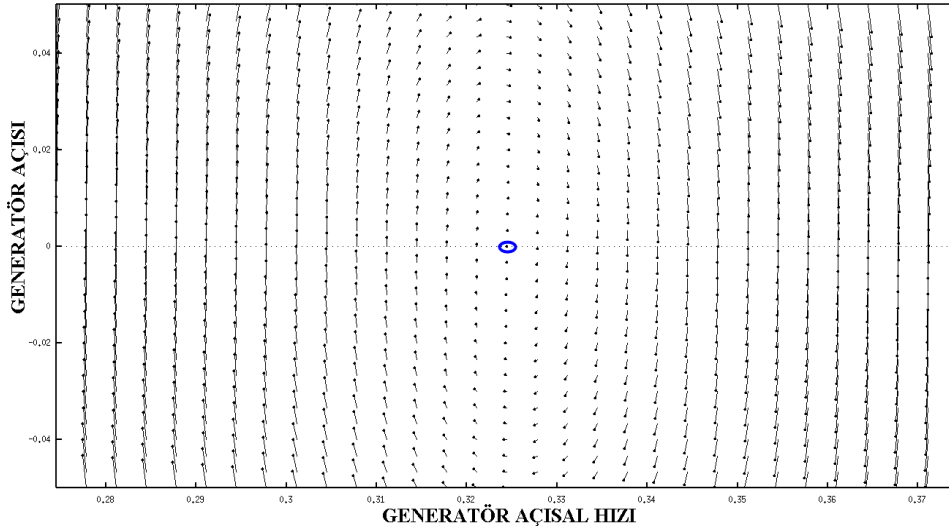
Şekil 4.26. $Q_1=11.320030$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi

Şekil 4.26'da $Q_1=11.320030$ reaktif güç talebi değeri için yük barası geriliminin oldukça kararlı olduğu görülmektedir. Tabi bu değer in fırtına öncesi sessizliği temsil eden hopf çatallaşma noktası olduğu unutulmamalıdır. Faz portrelerinde de aynı ilginçliği görmek mümkündür. Zira bu portrelerde yük barası geriliminin yük açısıyla değişiminin noktasal bazda kalmıştır. Bunun fiziksel anlamı hem yük açısının hem yük geriliminin hiç bir değişime uğramaksızın gayet kararlı ve osilasyonsuz olarak ilerlemesidir. Bu noktasal değişimlerin varlığı Şekil 4.27'de verilen yük gerilimi ve yük açısı faz portresinde gösterilmiştir.



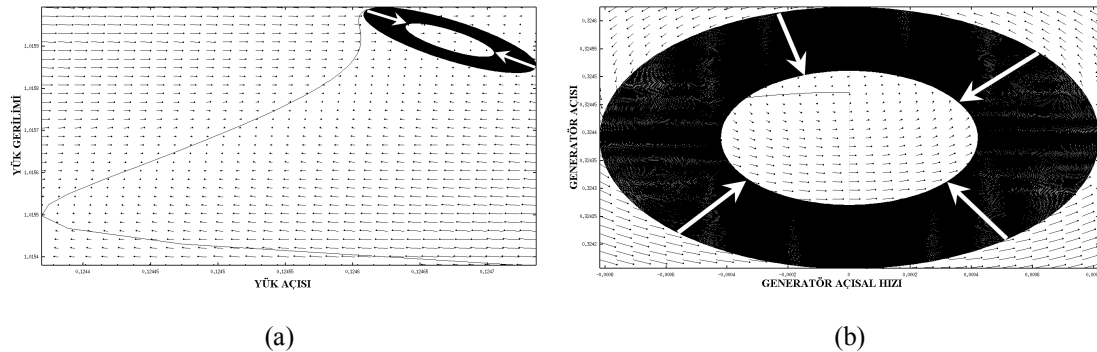
Şekil 4.27. $Q_1=11.320030$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Oluşan Hopf Çatallaşması Noktasında Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi

Şekil 4.28’de verilen faz portresi grafiğinde, generatör açısı ve generatör açısal hız değişimlerinin de noktasal olduğu gösterilmiştir. Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de görüldüğü üzere sistem, hopf değerlerinde sistem adeta kararlılığa kilitlenmiş bir yapıdadır.



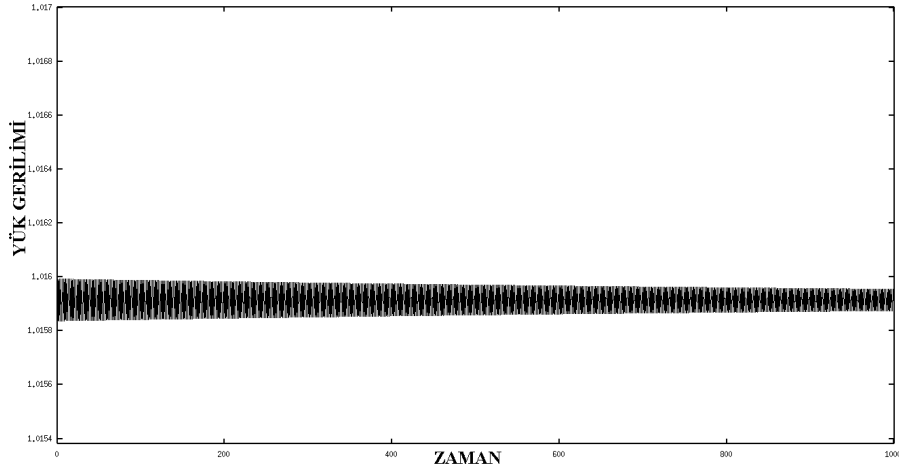
Şekil 4.28. $Q_1=11.320030$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Oluşan Hopf Çatallaşması Noktasında Generator Açısı-Generator Açısal Hızı Faz Portresi

Şimdi kararlılığa adeta kilitlenen bir noktadan kararsızlığa geçişin nerede başladığı ve nasıl bir değişim güzergahı izlediğini incelemek üzere $Q_1=11.3185$ (hopf öncesi), $Q_1=11.3215$ (hopf sonrası), $Q_1=11.3255$ değerleri için yük gerilimi-zaman eğrisi, yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generator açısal hızı faz portreleri üzerinden analiz edilerek bu değerlerde sistemin fiziksel karşılıkları yorumlanacaktır. Böylece $Q_1=11.320030$ değerindeki hopf çatallaşmasının mahiyeti daha iyi anlaşılacaktır.

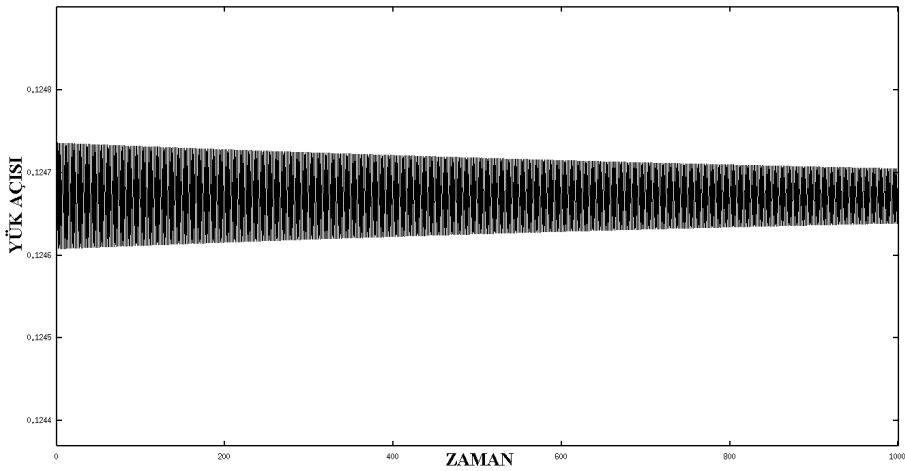


Şekil 4.29. a)- $Q_1=11.3185$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
b)- $Q_1=11.3185$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi

Şekil 4.29’da, $Q_1=11.3185$ reaktif güç talebi değeri için yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri vektör alanla değişimleri ile birlikte çizdirilmiştir. Faz portreleri üzerinde gösterilen oklar değişimin yönünü göstermektedir. Güç sisteminin bu noktadaki özdeğerleri $e_1=-117.890042+i0$, $e_2=-0.001057+i3.501080$, $e_3=-0.001057-i3.501080$, $e_4=-8.930661+i0$ ’dir. Burada kompleks eşlenik özdeğerlerin reel kısımlarının negatif olması sistemin kararlı olduğunu göstermektedir. Hopf noktasında görülen noktasal faz portresi değişimin burada olmadığı görülmektedir. Bu noktaya ilişkin yük gerilimi-zaman ve yük açısı-zaman değişim eğrisi Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de çizdirilmiştir. Burada, yük gerilimi ve yük açısının osilasyonlara sahip olduğu ama bu osilasyonların zamanla sönümlenmeye doğru gittiği görülmektedir.

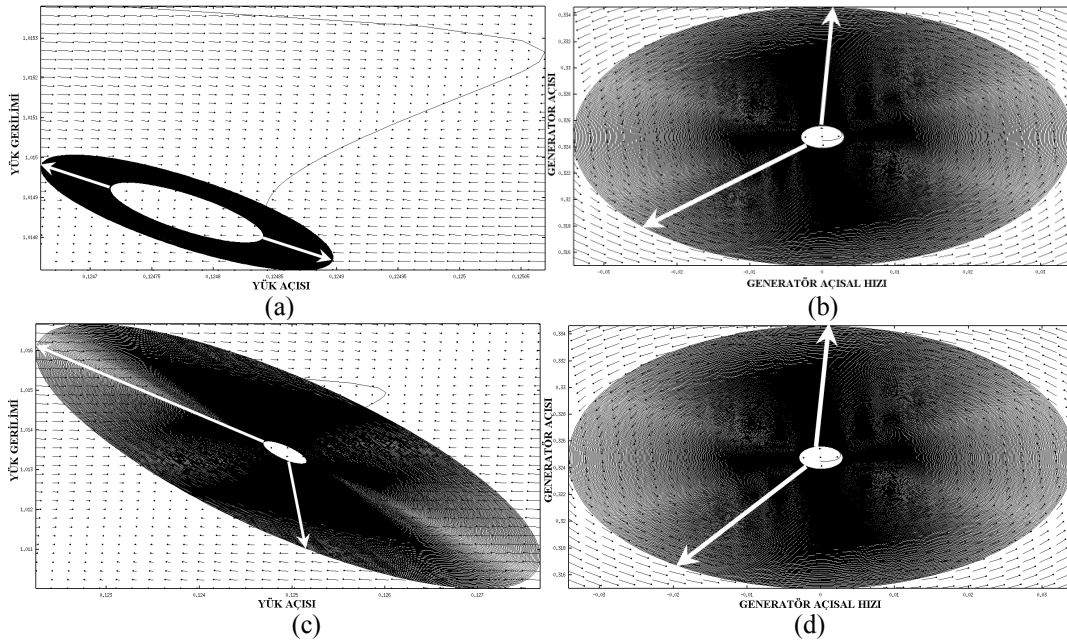


Şekil 4.30. $Q_1=11.3185$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi



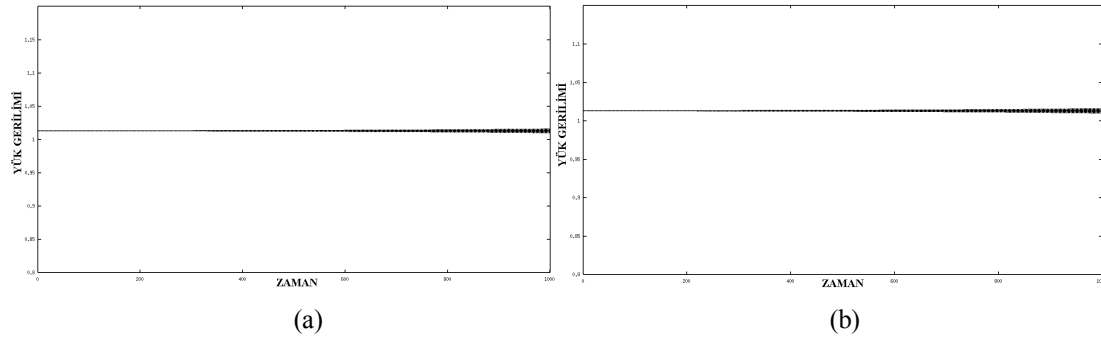
Şekil 4.31. $Q_1=11.3185$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi

Şimdi de hopf sonrası değerlerden $Q_1=11.3215$ (hopf sonrası) ve $Q_1=11.3255$ değerleri için yük açısı-zaman eğrisi, yük gerilimi-zaman eğrisi, yük açısı-yük gerilimi faz portesi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri çizdirilerek, bu değerlerde sistemin fiziksel karşılıkları yorumlanacaktır.

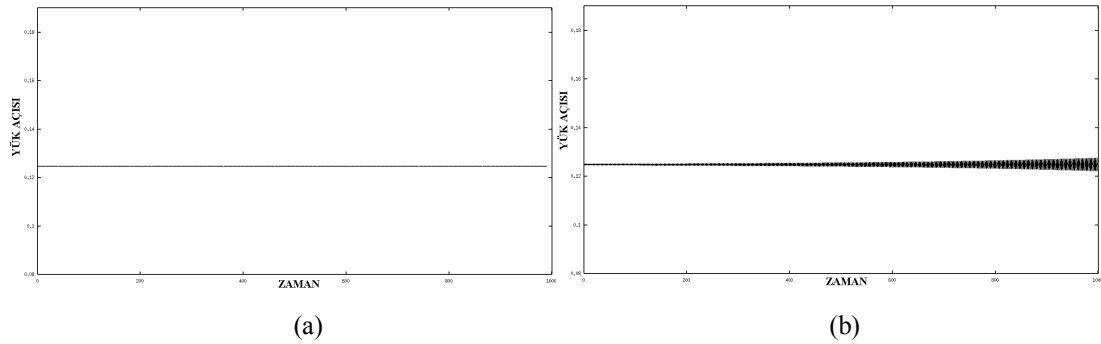


Şekil 4.32. a)- $Q_1=11.3215$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 b)- $Q_1=11.3215$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 c)- $Q_1=11.3255$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 d)- $Q_1=11.3255$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi

Şekil 4.32’de, $Q_1=11.3215$ ve $Q_1=11.3255$ reaktif güç talebi değerleri için yük açısı-yük gerilimi faz portesi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri vektör alanla değişimleri ile birlikte çizdirilmiştir. Faz portreleri üzerinde gösterilen oklar değişimin yönünü göstermektedir. Güç sisteminin bu noktadaki özdeğerleri sırasıyla $e_1=-117.626184+i0$, $e_2=0.000250+i3.496807$, $e_3=0.000250-i3.496807$, $e_4=-8.855417+i0$ ve $e_1=-117.267595+i0$, $e_2=0.0002045+i3.490906$, $e_3=0.0002045-i3.490906$, $e_4=-8.752652+i0$ ’dır. Burada her iki durum için kompleks eşlenik özdeğerlerin reel kısımlarının pozitif olması sistemin kararsız olduğunu göstermektedir. Buradan hopf noktasından sonra sistemin kararsız çalışmaya başladığı söylenebilir. Sistemin bu reaktif güç talebi değerleri için yük gerilimi-zaman ve yük açısı-zaman değişim eğrisi Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de çizdirilmiştir. Burada, yük gerilimi ve yük açısı osilasyonlarının giderek arttığı görülmektedir.

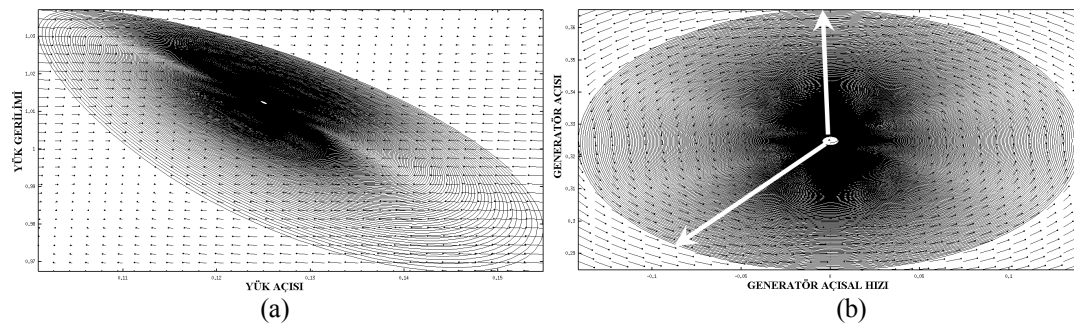


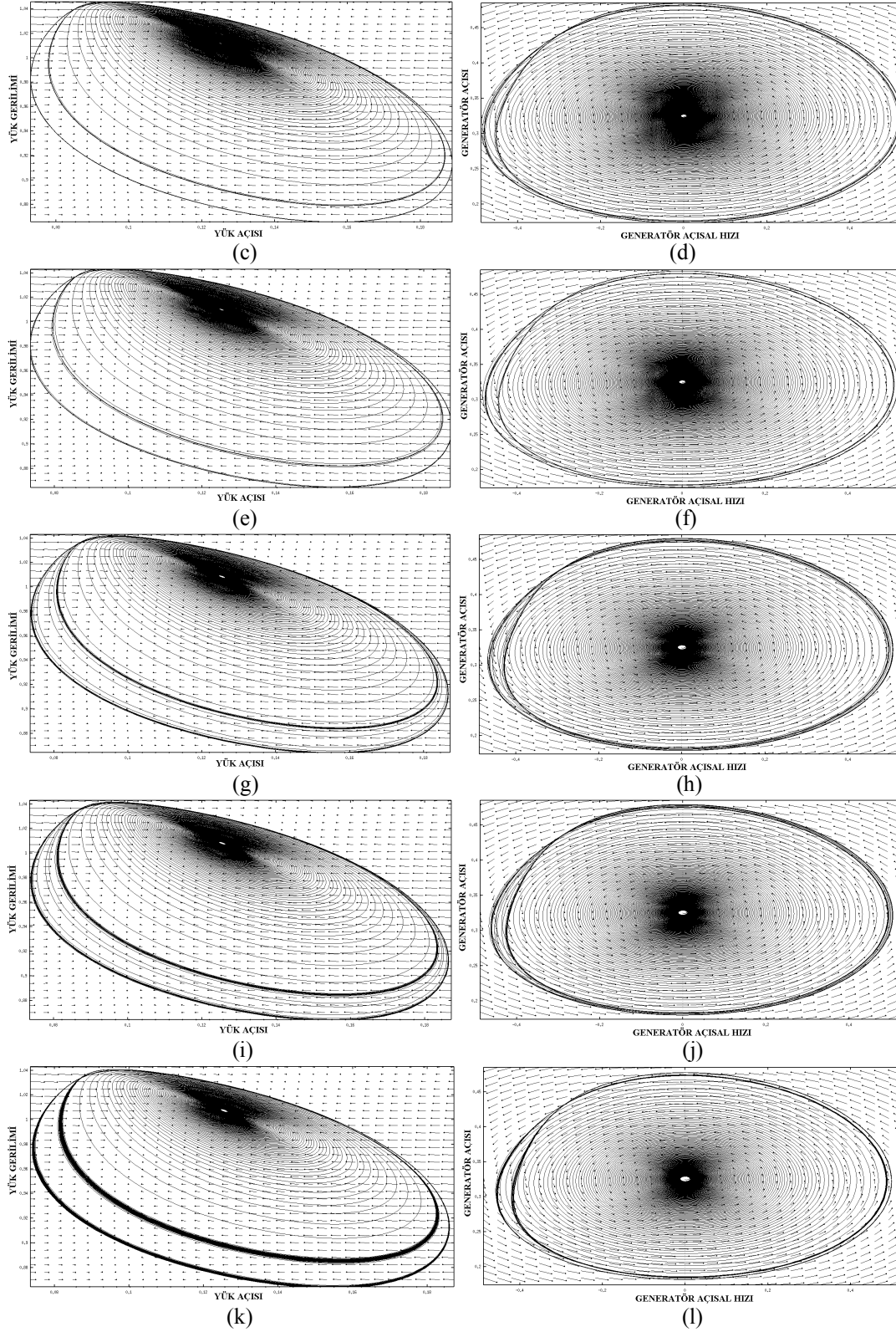
Şekil 4.33. a)- $Q_1=11.3215$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
b)- $Q_1=11.3255$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi



Şekil 4.34. a)- $Q_1=11.3215$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi
b)- $Q_1=11.3255$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi

Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'de görülen yük açısı ve yük gerilimlerinin artışının nereye kadar olacağı ve bu değişim dinamiklerinin periyodik yörünge oluşumlarıyla açıklanması adına sırasıyla $Q_1=11.3285$, $Q_1=11.330$, $Q_1=11.3350$, $Q_1=11.3390$, $Q_1=11.3400$, $Q_1=11.3420$, $Q_1=11.3450$, $Q_1=11.3475$, $Q_1=11.3510$, $Q_1=11.3600$, $Q_1=11.3700$ ve son olarak da $Q_1=11.3800$ değerleri için yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri çizdirilerek ve bunların fiziksel karşılıkları yorumlanacaktır.

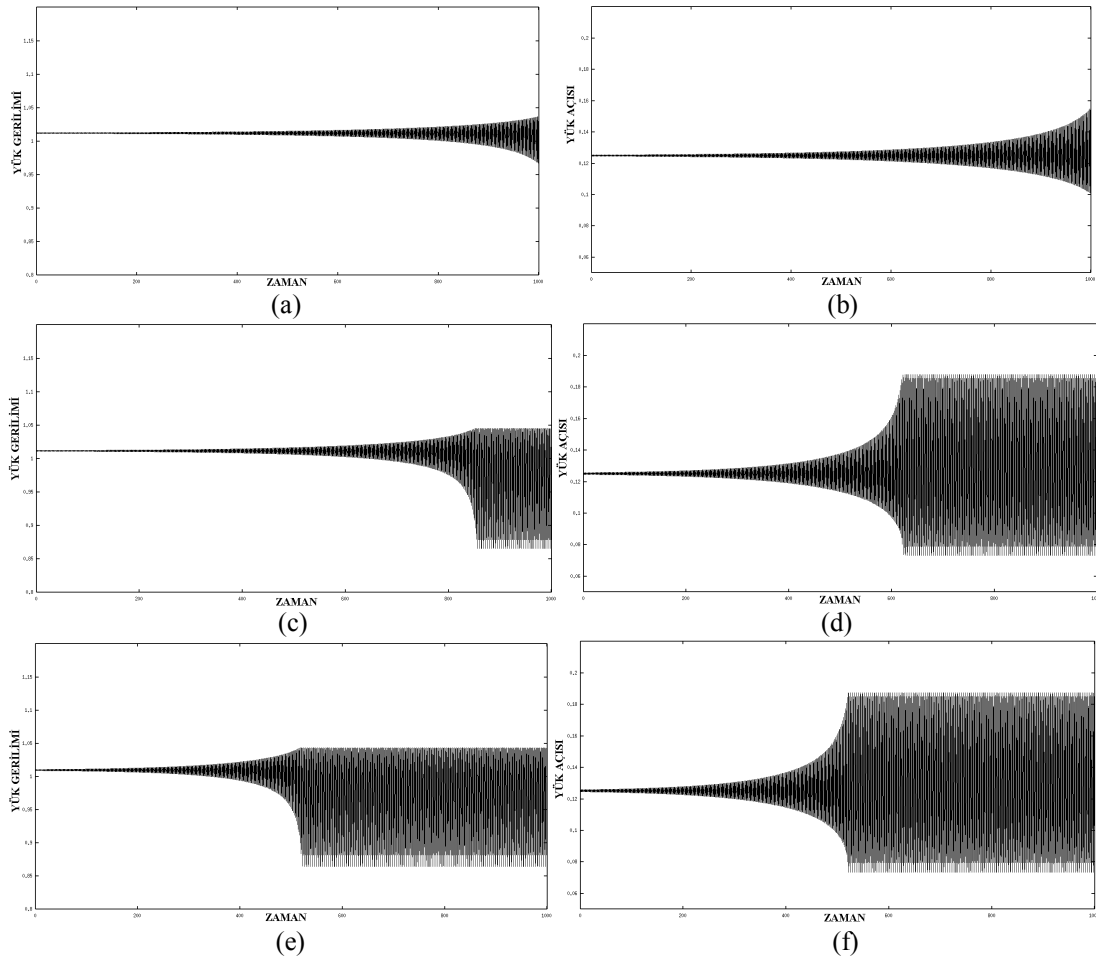


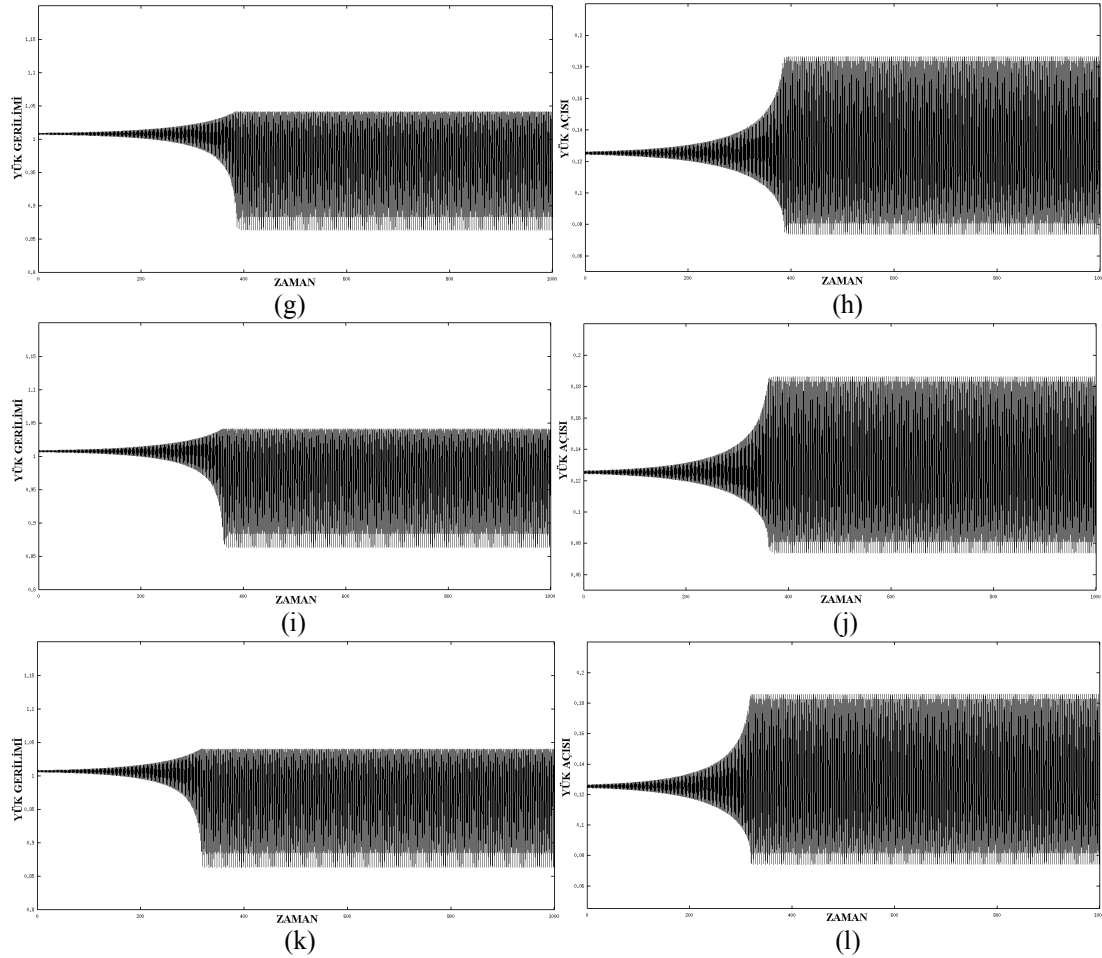


Şekil 4.35. a)- $Q_1=11.3285$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
b)- $Q_1=11.3285$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi
c)- $Q_1=11.3300$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
d)- $Q_1=11.3300$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi
e)- $Q_1=11.3350$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
f)- $Q_1=11.3350$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi

- g)- $Q_1=11.3390$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
h)- $Q_1=11.3390$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi
i)- $Q_1=11.3400$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
j)- $Q_1=11.3400$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi
k)- $Q_1=11.3420$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
l)- $Q_1=11.3420$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısız Hızı Faz Portresi

Şekil 4.35’de adım adım yapılan hesaplamalar ve faz portreleri analizleri ile $Q_1=11.3200$ noktasında oluşan hopf çatallaşması başlangıç değerlerinde incelenen sistem için faz portreleri üzerindeki periyodik yörünge oluşumları verilmiştir. Buna göre $Q_1=11.3285$ değerinde katlamalı yörünge oluşumlarının görmeye başladığı, $Q_1=11.3300$ değerinde periyot-2 katlamalı yörünge, $Q_1=11.3350$ değerinde periyot-4 katlamalı yörünge, $Q_1=11.3390$ değerinde periyot-8 katlamalı yörünge, $Q_1=11.3400$ değerinde periyot-16 katlamalı yörünge ve $Q_1=11.3420$ değerinde ince kaos çekerli ikili yörünge oluşumu tespit edilmiştir. Bu değerlere ilişkin yük gerilimi ve yük açısının zaman eksenindeki değişimleri aşağıdaki gibi adım adım çizdirilmiştir.

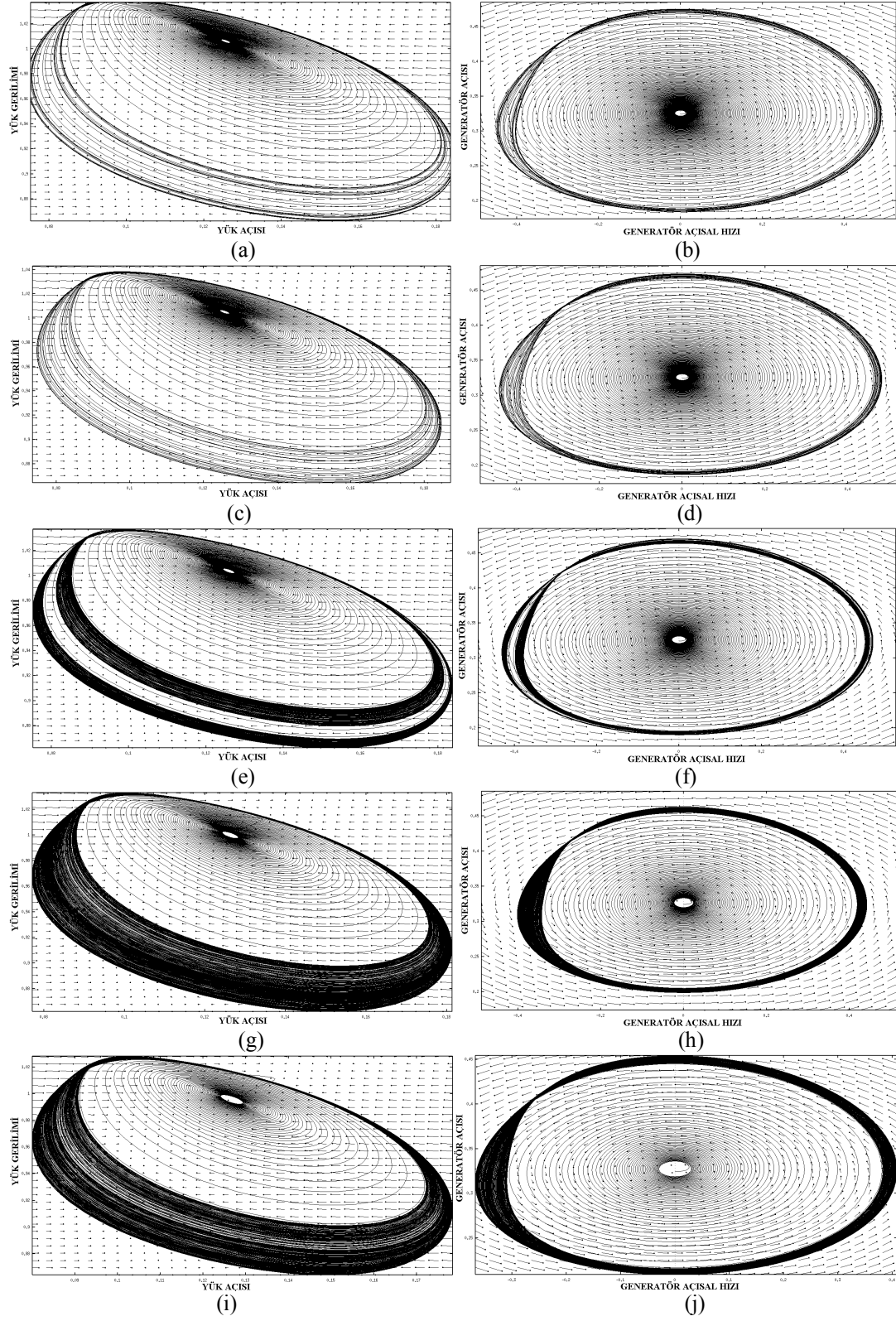


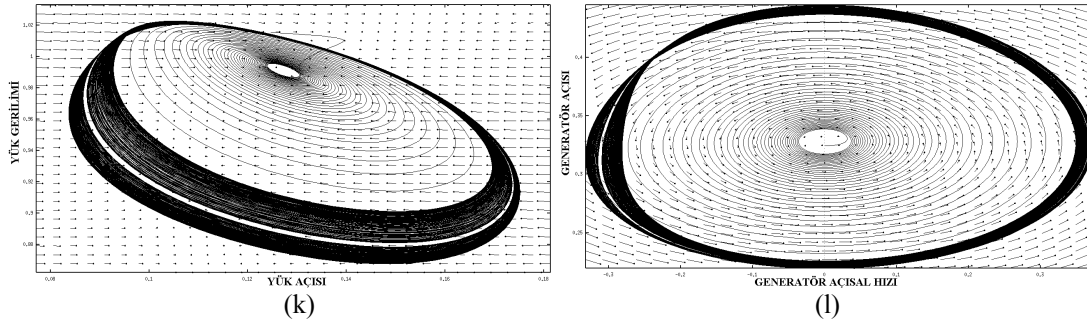


Şekil 4.36. a)- $Q_1=11.3285$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 b)- $Q_1=11.3285$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 c)- $Q_1=11.3330$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 d)- $Q_1=11.3330$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 e)- $Q_1=11.3350$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 f)- $Q_1=11.3350$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 g)- $Q_1=11.3390$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 h)- $Q_1=11.3390$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 i)- $Q_1=11.3400$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 j)- $Q_1=11.3400$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 k)- $Q_1=11.3420$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 l)- $Q_1=11.3420$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi

Şekil 4.36'da, Şekil 4.35'de faz portrelerindeki periyodik yörünge oluşumları verilen reaktif güç talebi değerleri için yük gerilimi-zaman ve yük açısı-zaman değişim eğrileri çizdirilmiştir. Yük gerilimi ve yük açısındaki osilasyon artışının devam etmekte olduğu görülmektedir. Şimdi de periyot ikiye katlamalı yörüngelerin periyot üçe katlamalı yörüngelere oradan da kaos çekici oluşumuna gidişini göstermek amacıyla, $Q_1=11.3450$, $Q_1=11.3475$, $Q_1=11.3510$, $Q_1=11.3600$, $Q_1=11.3700$ ve son olarak da $Q_1=11.3800$ değerleri için yük açısı-yük gerilimi faz portesi ve generatör

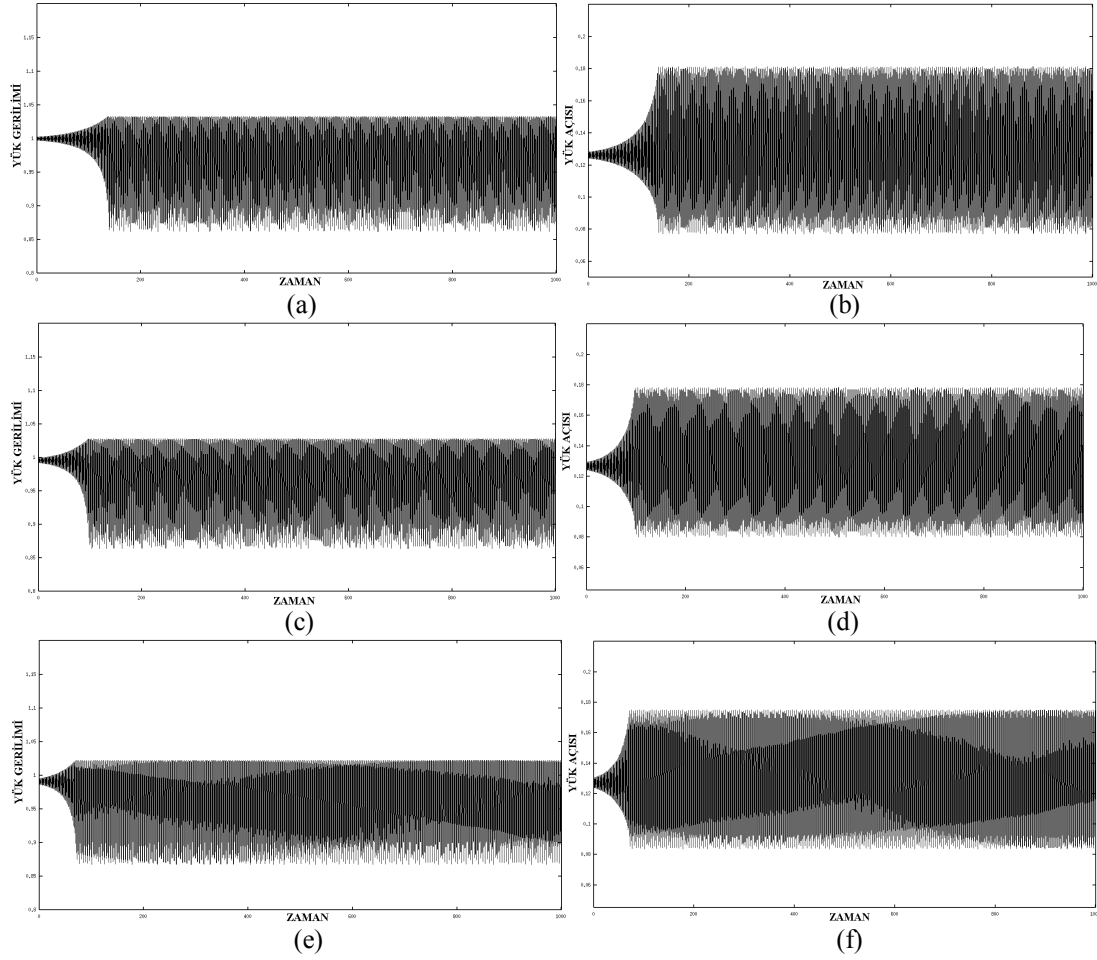
açısı-generatör açısal hızı faz portreleri çizdirilerek ve bunların fiziksel karşılıkları yorumlanacaktır.





- Şekil 4.37. a)- $Q_1=11.3450$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 b)- $Q_1=11.3450$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 c)- $Q_1=11.3475$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 d)- $Q_1=11.3475$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 e)- $Q_1=11.3510$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 f)- $Q_1=11.3510$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 g)- $Q_1=11.3600$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 h)- $Q_1=11.3600$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 i)- $Q_1=11.3700$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 j)- $Q_1=11.3700$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 k)- $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 l)- $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi

Şekil 4.37 'de periyot ikiye katlamalı yörüngelerin periyot üçe katlamalı yörüngelere oradan da kaos çekici oluşumuna gidişini göstermek amacıyla, $Q_1=11.3450$, $Q_1=11.3475$, $Q_1=11.3510$, $Q_1=11.3600$, $Q_1=11.3700$ ve son olarak da $Q_1=11.3800$ değerleri için yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri çizdirilmiştir. Buna göre $Q_1=11.3450$ değerinde periyot-6 katlamalı yörünge, $Q_1=11.3475$ değerinde periyot-12 katlamalı yörünge, $Q_1=11.3510$ değerinde kaos çekerli ikili yörünge, $Q_1=11.3600$ değerinde tam bir kaos çekerli yörüngesi, $Q_1=11.3700$ değerinde yine tam bir kaos çekerli yörüngesi ve son olarak da $Q_1=11.3800$ değerinde tam kaos çekerli ikili yörünge oluşumu tespit edilmiştir. Bu değerlere ait yük gerilimi ve yük açısının zaman eksenindeki değişimleri Şekil 4.36'de gösterildiği gibi reaktif güç talebinin artan değerleri için yüksek osilasyonların daha erken görülmesi şeklinde değişimini devam ettirir. Şekil 4.38'de kaos çekerli yörünge oluşması durumlarına ($Q_1=11.3600$, $Q_1=11.3700$ ve $Q_1=11.3800$) ait yük gerilimi ve yük açısının zaman eksenindeki değişimleri çizdirilmiştir.



Şekil 4.38. a)- $Q_1=11.3600$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 b)- $Q_1=11.3600$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 c)- $Q_1=11.3700$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 d)- $Q_1=11.3700$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 e)- $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 f)- $Q_1=11.3800$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi

4.6.2.3. $Q_1=11.324206$ değerinde oluşan periyot ikiye katlama çataklamasının etkileri

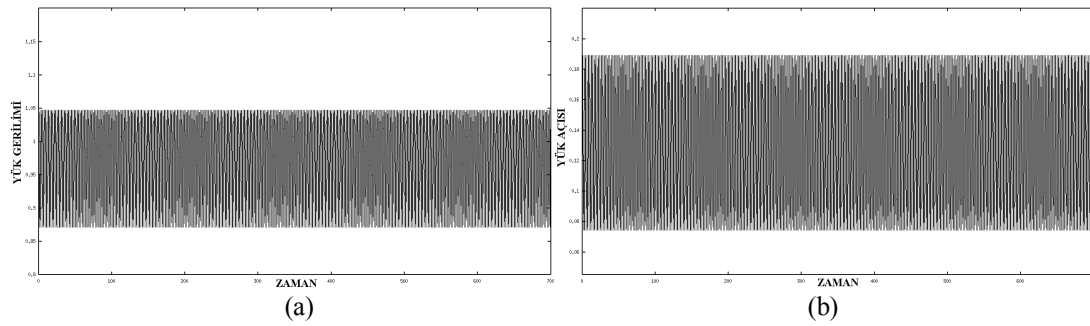
Şimdi de $Q_1=11.324206$ noktası üzerinde oluşan periyot ikiye katlama çataklama noktasını inceleyelim. Yapılacak analizlerde periyot ikiye katlama çataklaması noktasının başlangıç değerleri esas alınarak periyodik yörünge analizleri yapılacaktır. Buna göre bu çataklama noktası için sistemin başlangıç değerleri ve bu değerlere bağlı özdeğerler sırasıyla şu şekildedir;

- Generatör Açısı=0.324700
- Generatör Açısal Hızı=0

-Yük Açısı= 0.124870

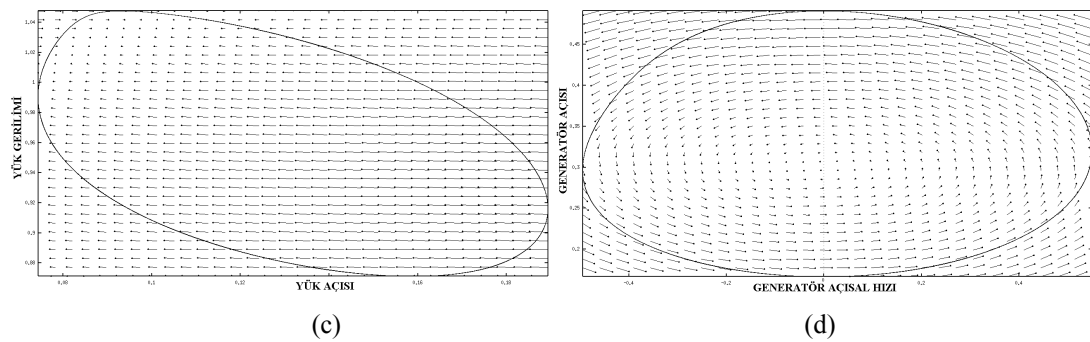
-Yük Gerilimi= 1.0139

$e_1=-117.384611+i0$, $e_2=0.0001457+i3.492844$, $e_3=0.0001457-i3.492844$, $e_4=-8.786254+i0$. Burada kompleks eşleniklerin pozitif olduğu görülmektedir yani periyot ikiye katlama çatallaşma noktasında sistem kararsızdır. Şekil 4.39'da, $Q_1=11.324206$ reaktif güç talebi değerinde oluşan periyot ikiye katlama çatallaşma noktası için yük gerilimi-zaman ve yük açısı-zaman değişim eğrisi çizdirilmiştir. Yük gerilimdeki ve yük açısındaki osilasyon artışı açık olarak görülmektedir.



Şekil 4.39. a)- $Q_1=11.324206$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
b)- $Q_1=11.324206$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi

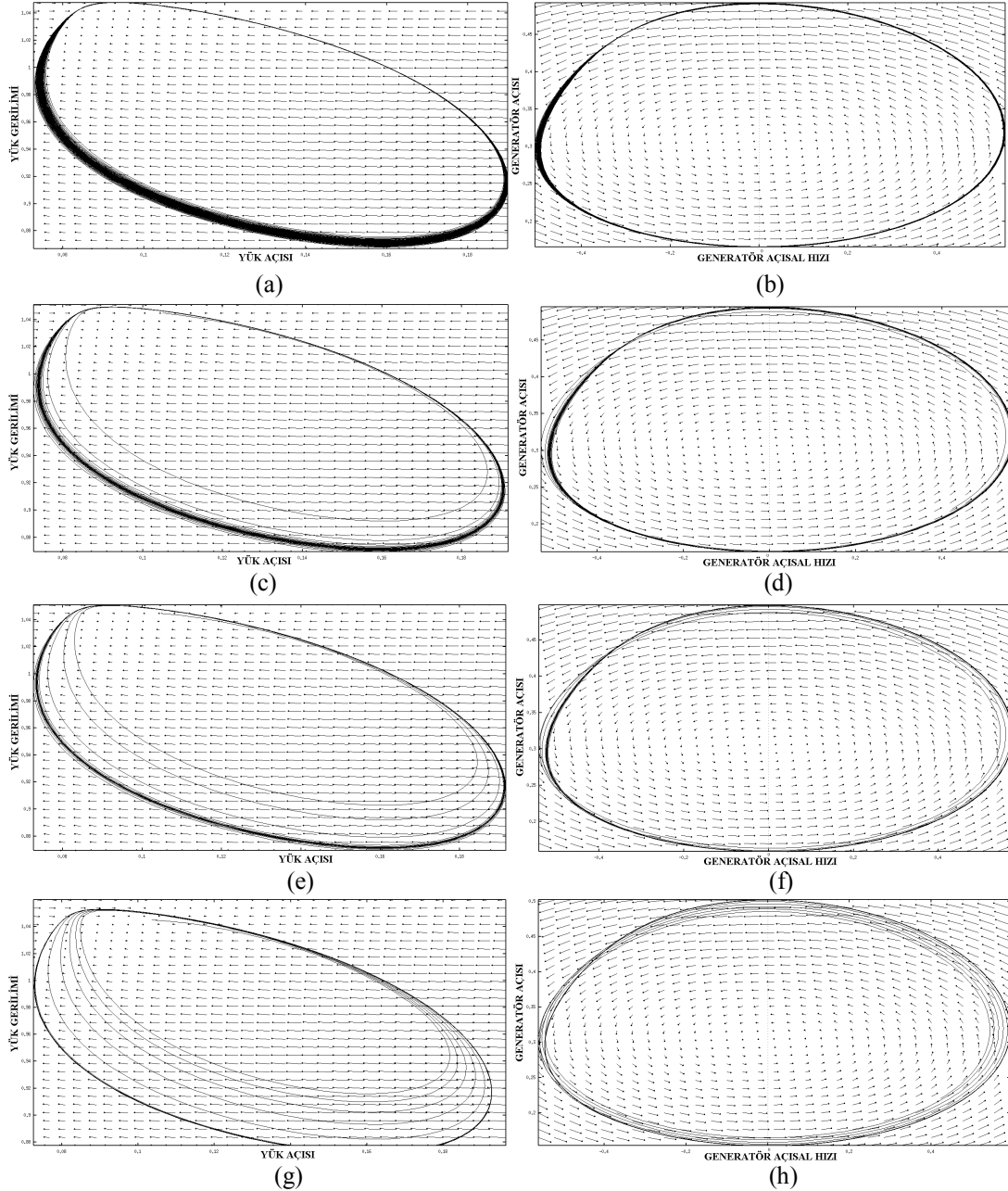
Şekil 4.39'da $Q_1=11.324206$ reaktif güç talebi değeri için yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri vektör alanla değişimleri ile birlikte çizdirilmiştir.



Şekil 4.39. c)- $Q_1=11.324206$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
d)- $Q_1=11.324206$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi

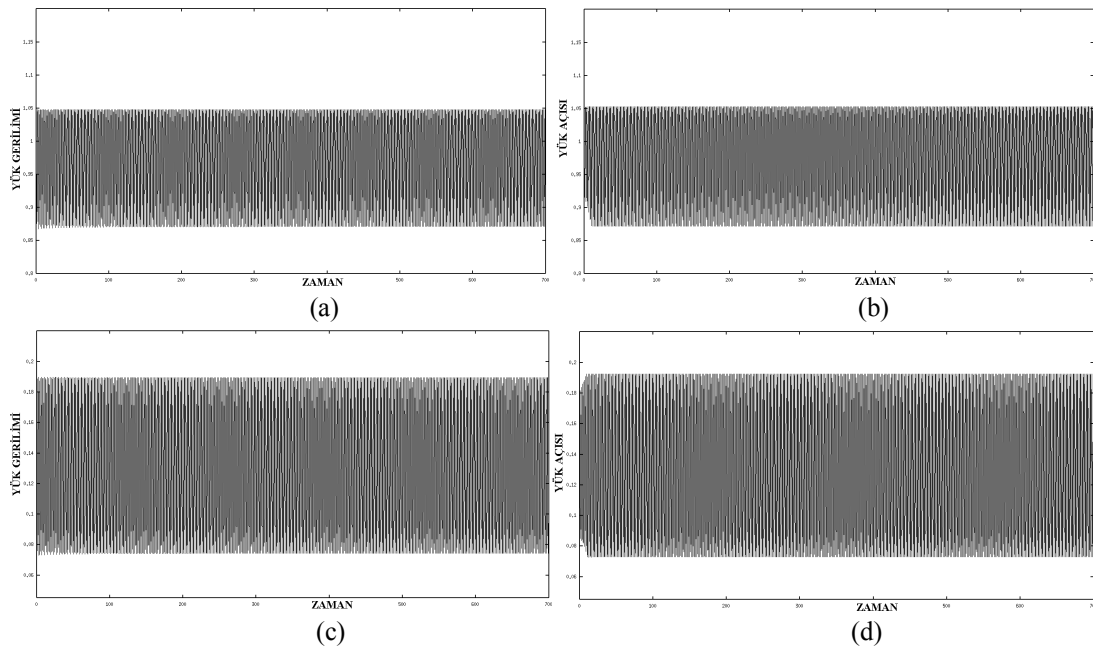
Şekilde de görüldüğü üzere periyot ikiye katlama çatallaşması değerinde faz portrelerinde tam bir limit döngü oluşumu meydana gelmiştir. Kararsız limit döngüsü kaosa doğru giden değişimin önhabercisidir. Bu kararsızlığın sebebi ve nerede

başladığı periyot katlamalı yörüngelerde gezinerek daha iyi anlaşılacaktır. Bu amaçla, çatalaşma noktasının öncesi parametrelerden $Q_1=11.3235$, $Q_1=11.3196$, $Q_1=11.3157$ ve $Q_1=11.3092$ değerleri için yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri çizdirilecektir.



Şekil 4.40 a)- $Q_1=11.3235$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
b)- $Q_1=11.3235$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi
c)- $Q_1=11.3196$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
d)- $Q_1=11.3196$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi
e)- $Q_1=11.3157$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
f)- $Q_1=11.3157$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi
g)- $Q_1=11.3092$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
h)- $Q_1=11.3092$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi

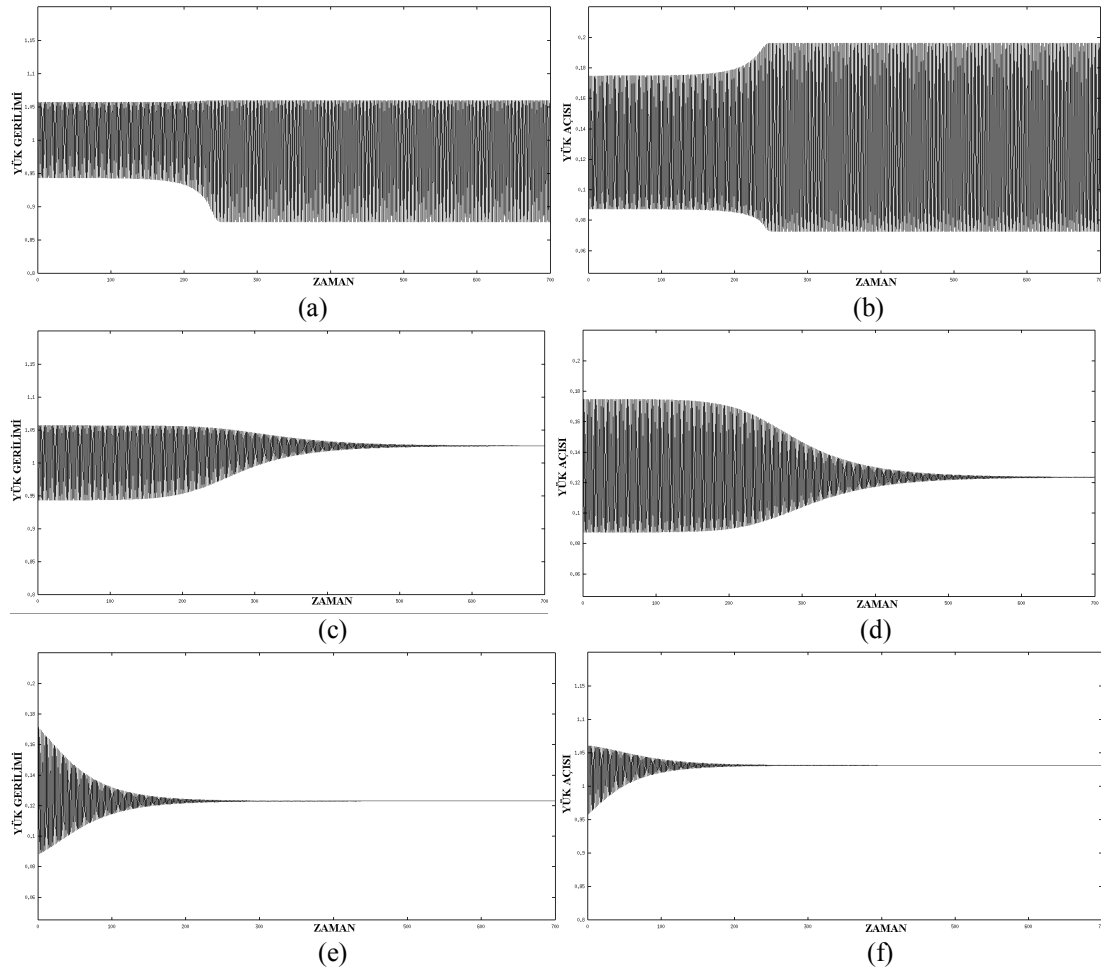
Şekil 4.40'da $Q_1=11.3235$, $Q_1=11.3196$, $Q_1=11.3157$ ve $Q_1=11.3092$ reaktif güç talebi değerleri için yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri vektör alanla değişimleri ile birlikte çizdirilmiştir. Çatallaşma öncesinde meydana gelen kaos çekerleri $Q_1=11.3235$ ve $Q_1=11.3196$ değerlerine ait faz portrelerinde açık görülmektedir. Kaos çekerinden periyot çatallaşmasına doğru giden periyodik yörüngeler kaskat periyot katlama oluşumuna işaret eder. Bu kaskat oluşum $Q_1=11.3157$ ve $Q_1=11.3092$ değerlerine ait faz portrelerinde doğrulanmaktadır. Bu periyotlarda değişimin yönü içeriden dışarıya doğrudur. Yani generatör ve yük parametrelerindeki osilasyonlar artarak devam etmektedir. Bu durum kararsızlığın habercisidir. Bu osilasyon artışının daha net ve detaylı gösterimi aşağıda verilen yük gerilimi-zaman ve yük açısı-zaman değişim eğrileri üzerinden gösterilmiştir.



Şekil 4.41. a)- $Q_1=11.3235$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 b)- $Q_1=11.3235$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi
 c)- $Q_1=11.3092$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 d)- $Q_1=11.3092$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi

Şekil 4.41'de yük gerilimi ve yük açısında meydana gelen osilasyonların artarak devam ettiği açık olarak görülmektedir. Bu reaktif güç talebi değerleri ve başlangıç şartlarında periyodik katlamalar neticesinde meydana gelen osilasyonlar sistemin genel bir kararsızlığa sürüklemiştir. Çatallaşma analizinin üçüncü adımında 1000

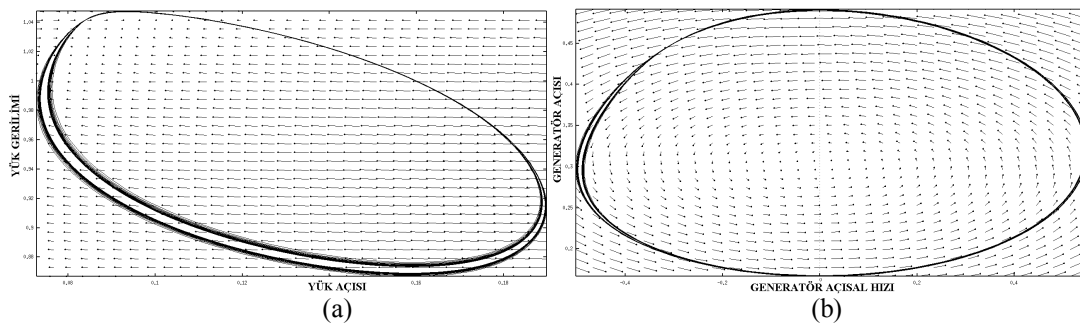
nokta üzerinde yapılan inceleme sonuçlarında (Bakınız Ek-B) sistemin bu aralıklarında benzer başlangıç değerleri için ($Q_1=1.132420E+01$, $Q_1=1.132421E+01$, $Q_1=1.127014E+01$ gibi) onlarca alt çatallaşma noktasının oluştuğu tespit edilmiştir. Bu aralıklarda oluşan çatallaşmalar daha detaylı incelendiğinde sistemin kararsızlığı daha net ortaya çıkacaktır. Burada dinamik çatallaşma analizinin yönünü sistemin geneline ait kararsızlıkları açıklamak yerine özellikle yüklenmelerin fazla olduğu aralıklarda daha hassas adım aralıkları kullanarak analizi yapmanın önemi ortaya çıkmaktadır. Böylesi bir yaklaşım C.W. Taylor'un ifade ettiği Q-V eğri analizinin doğru karar süreçleri oluşturulması amacıyla yönelik kullanımını destekler. Şimdi EK-B'deki benzer başlangıç değerlerinde altında ve $Q_1=1.129895E+01$ değeri için oluşan çatallaşma varlığını bildiğimizi varsayıp $Q_1=11.28712$, $Q_1=11.28710$ ve $Q_1=11.2702$ reaktif güç talebi değerleri için yük gerilimi-zaman ve yük açısı-zaman değişim eğrisi çizdirilerek kararsızlığın başladığı noktanın tespit edilmeye çalışılacaktır.

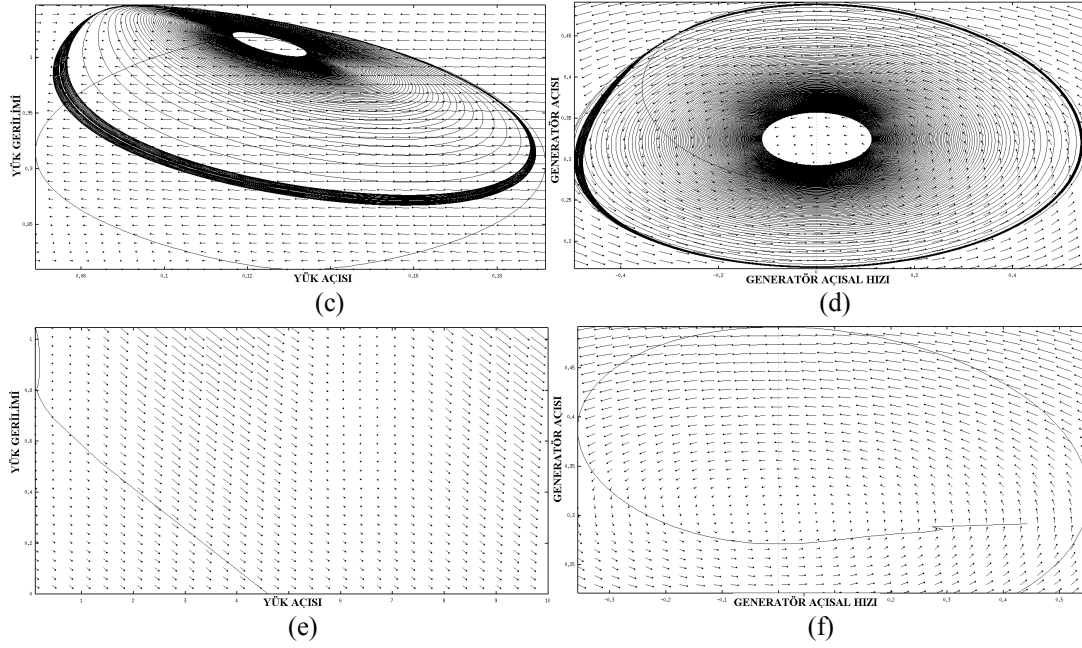


- Şekil 4.42. a)- $Q_1=11.28712$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 b)- $Q_1=11.28712$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi
 c)- $Q_1=11.28710$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 d)- $Q_1=11.28710$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi
 e)- $Q_1=11.27020$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 f)- $Q_1=11.27020$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi

Şekil 4.42-a'da azalıp daha sonrada artmaya başlayan yük açısı ve yük gerilimi osilasyonları bize periyot ikiye katlama çatallaşması başlangıç şartları altında $Q_1=11.28712$ değerine yakın reaktif güç talebi aralıklarında marjinal bir değişimin başladığını haber vermektedir. Bu marjinal değişimin mahiyeti $Q_1=11.28710$ değerinde osilasyonların azalarak kaybolması ve $Q_1=11.2702$ değerinde başlangıç osilasyonlarının daha hızlı kaybolarak sistemin kararlı hale geçmesi şeklindedir. $Q_1=11.28710$ değerinde sisteme ait özdeğerler $e_1=-120.526250+i0$, $e_2=-0.013501+i3.540943$, $e_3=-0.013501-i3.540943$, $e_4=-9.667942+i0$ şeklinde olup osilasyonların sönümlenmeye gitmesi ve kompleks eşlenik özdeğerlerinin negatif olan reel kısımları kararlılığın sağlandığını habercisidir.

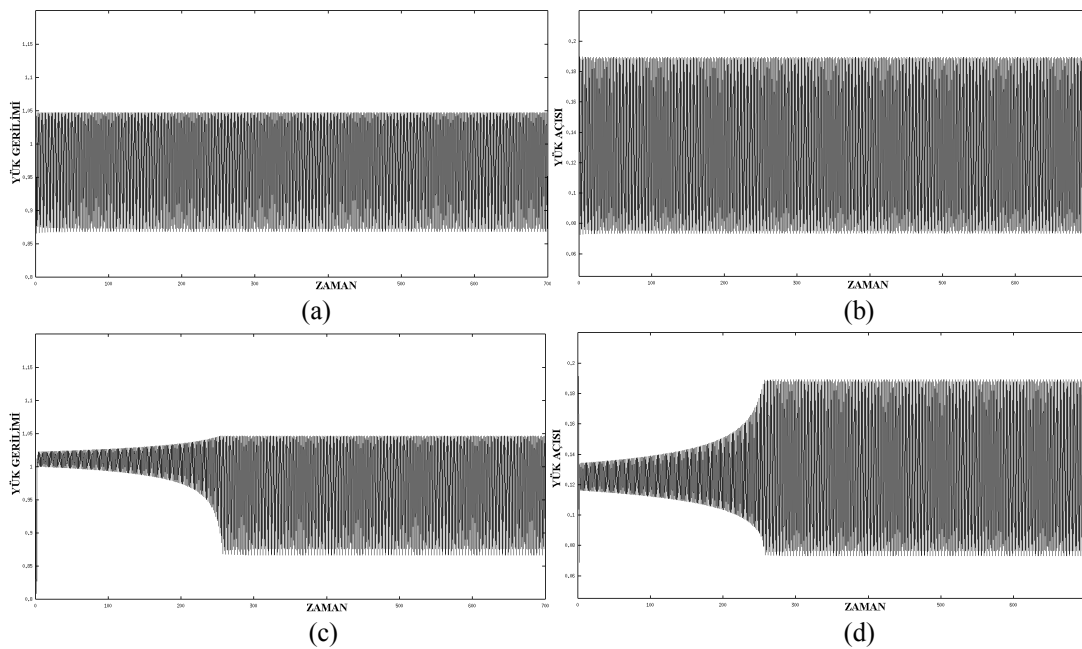
$Q_1=11.324206$ çatallaşma değerine gelinceye kadar generatör ve yük tarafında meydana gelen değişimlerin nasıl olduğunu zaman değişim ve faz portresi değişimlerinde gösterdikten sonra $Q_1=11.324206$ çatallaşma değeri sonrasında ne boyuta ulaşacağı sorusuna cevap aramak adına $Q_1=11.32480$, $Q_1=11.326833$ ve $Q_1=11.326834$ reaktif güç talebi değerlerinde yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri vektör alanla değişimleri ile birlikte Şekil 4.43'de çizdirilmiştir.

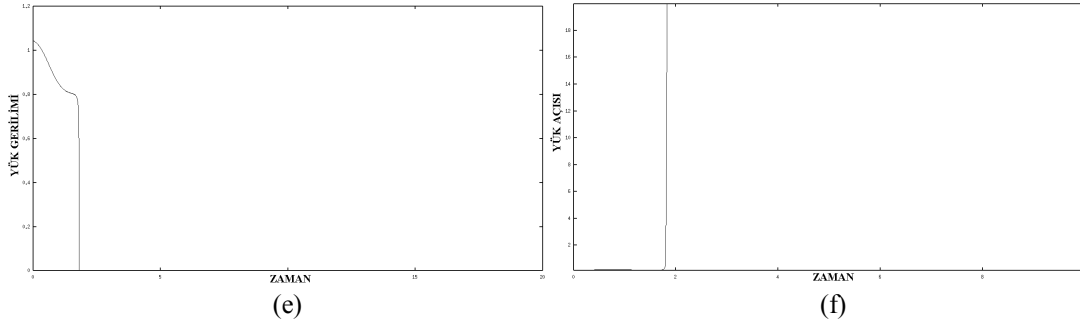




Şekil 4.43. a)- $Q_1=11.3248$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 b)- $Q_1=11.3248$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi
 c)- $Q_1=11.326833$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 d)- $Q_1=11.326833$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi
 e)- $Q_1=326834$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 f)- $Q_1=326834$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısıl Hızı Faz Portresi

Şekil 4.43’de gösterildiği üzere $Q_1=11.3248$ değerinde kaos çekerli ikili yörünge, $Q_1=11.326833$ değerinde tam bir kaos çekeri yörüngesi oluşmuş ve son olarak bu değer onbinde bir fazlası reaktif güç değeri olan $Q_1=11.326834$ değerinde gerilimin tamamen çöküntüye uğramıştır. Bu reaktif güç taleplerine ait yük gerilimi ve açısının zaman ekseninde değişimi Şekil 4.44’de gösterilmiştir.





Şekil 4.44. a)- $Q_1=11.3248$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 b)- $Q_1=11.3248$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi
 c)- $Q_1=11.326833$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 d)- $Q_1=11.326833$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi
 e)- $Q_1=11.326834$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 f)- $Q_1=11.326834$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi

Şekil-4.44'de gösterildiği üzere $Q_1=11.324206$ çatallaşma değerine ait başlangıç parametrelerinde sistem 11.45 reaktif güç yüklenmesi cevabına yetişmeden çökmeye uğramaktadır. Bu durum başlangıç parametrelerine hassas bağımlı olan çatallaşmaların sistem üzerinde yıkıcı etkilerini göstermek adına oldukça açıklayıcıdır.

4.6.2.4. $Q_1=11.270136$ değerinde oluşan eyer noktası çatallaşmasının etkileri

Şimdi de $Q_1=11.270136$ noktası üzerinde oluşan eyer noktası çatallaşma noktasını inceleyelim. Yapılacak analizlerde eyer noktası çatallaşması noktasının başlangıç değerleri esas alınarak periyodik yörünge analizleri yapılacaktır. Buna göre bu çatallaşma noktası için sistemin başlangıç değerleri ve bu değerlere bağlı özdeğerler sırasıyla şu şekildedir;

-Generatör Açısı=0.32202

-Generatör Açısal Hızı=0

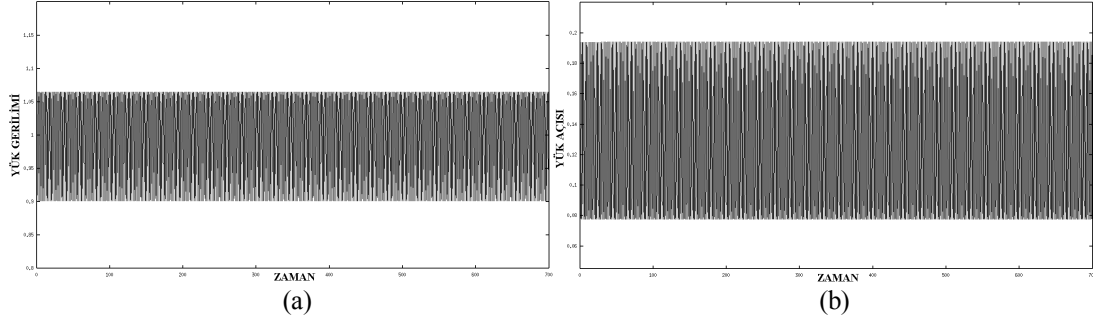
-Yük Açısı= 0.12309

-Yük Gerilimi= 1.0135

$e_1=-121.860725+i0$, $e_2=-0.019369+i3.559426$, $e_3=-0.019369+i3.559426$, $e_4=-10.031282+i0$.

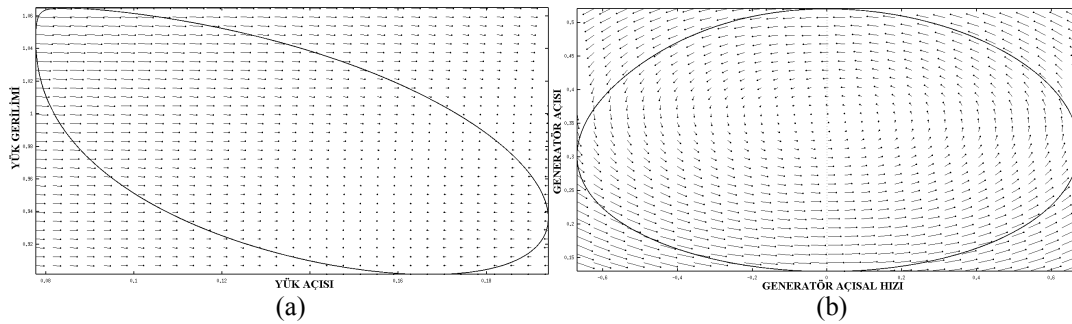
Burada kompleks eşleniklerin negatif olduğu görülmektedir yani eyer noktası çatallaşması noktasında sistem kararlıdır. Şekil 4.45'de, $Q_1=11.270136$ reaktif güç talebi değerinde oluşan eyer noktası çatallaşması için yük gerilimi-zaman ve yük

açısı-zaman değişim eğrisi çizdirilmiştir. Yük gerilimdeki ve yük açısındaki osilasyon artışı açık olarak görülmektedir.



Şekil 4.45 a)- $Q_1=11.270136$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
b)- $Q_1=11.270136$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi

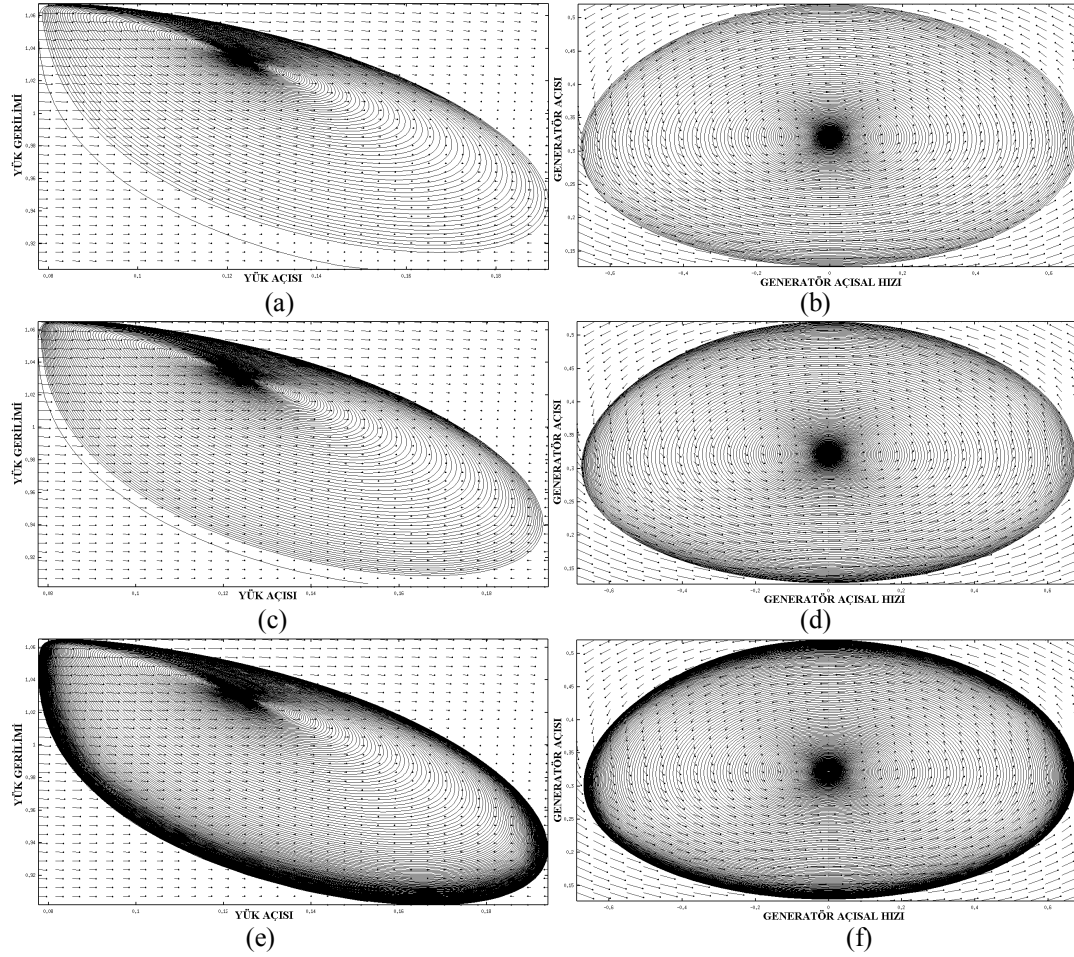
Şekil 4.46'da $Q_1=11.270136$ reaktif güç talebi değeri için yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri vektör alanla değişimleri ile birlikte çizdirilmiştir.



Şekil 4.46. a)- $Q_1=11.270136$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
b)- $Q_1=11.270136$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi

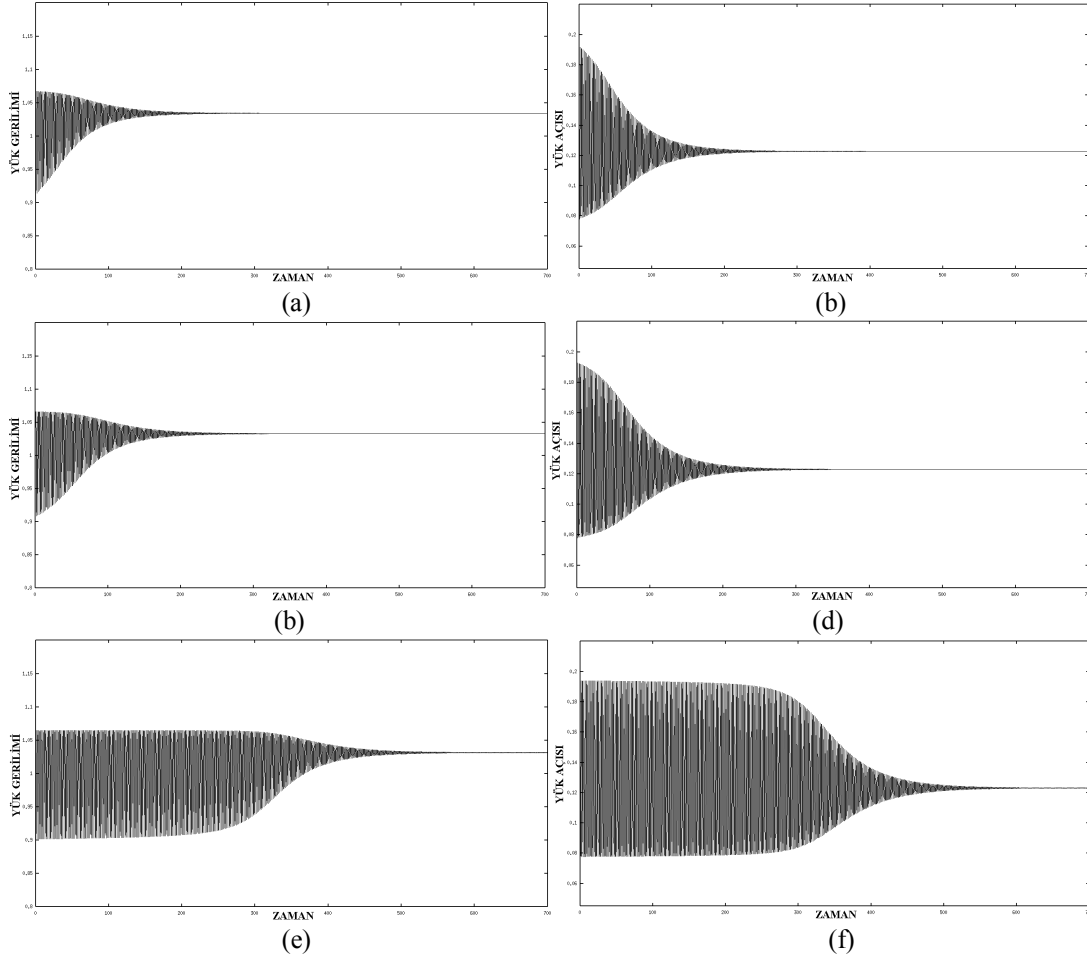
Şekilde de görüldüğü üzere periyot ikiye katlama çatallaşması değerinde faz portrelerinde tam bir limit döngü oluşumu meydana gelmiştir. Eyer noktası çatallaşmasının oluşum aşamaları ve bu çatallaşmaya ait başlangıç parametrelerinde $Q_1=11.270136$ reaktif güç talebi üzerinde değerler için sistemin ne tür bir cevap vereceği periyot katlamalı yörüngelerde gezinerek daha iyi anlaşılacaktır. Bu amaçla, çatallaşma noktasının öncesi parametrelerden $Q_1=11.2600$, $Q_1=11.2650$, $Q_1=11.2700$ ve sonrası parametrelerden de $Q_1=11.270156$, $Q_1=11.2830$ ve $Q_1=11.2900$ değerleri

için yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri çizdirilecektir.



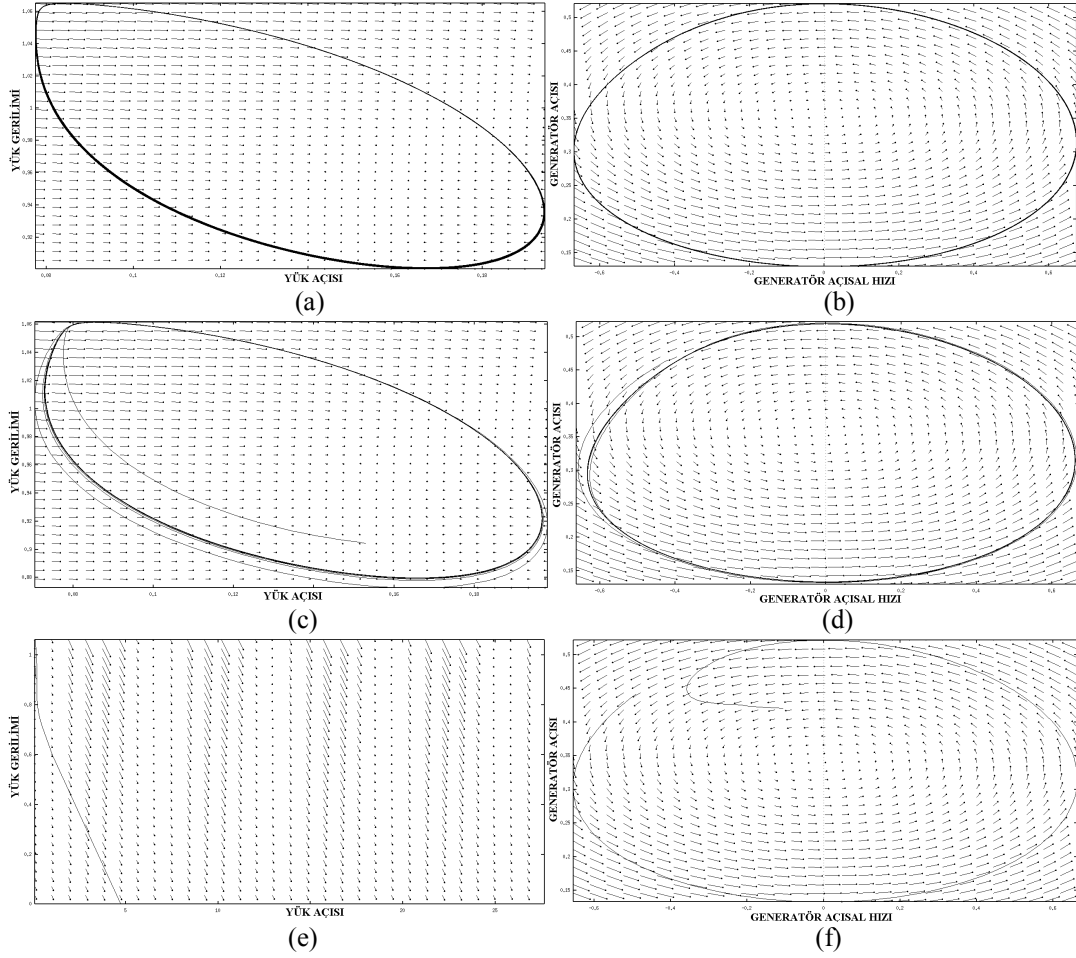
Şekil 4.47. a)- $Q_1=11.2600$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 b)- $Q_1=11.2600$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi
 c)- $Q_1=11.2650$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 d)- $Q_1=11.2650$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi
 e)- $Q_1=11.2700$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 f)- $Q_1=11.2700$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generatör Açısı-Generatör Açısal Hızı Faz Portresi

Buna göre $Q_1=11.2600$ ve $Q_1=11.2650$ değerlerinde periyodik yörünge oluşumlarının görünmeye başladığı, $Q_1=11.2700$ değerinde periyodik yörüngelerde başlangıçta artış gösteren osilasyonları daha sonra sönmülenerak kaybolduğu görülmektedir. Bu değerlerin eyer noktası çatallaşmasına çok yakın olduğu aşikardır. Bu değerlere ilişkin için yük gerilimi-zaman ve yük açısı-zaman değişim eğrileri Şekil 4.48'de çizdirilmiştir.



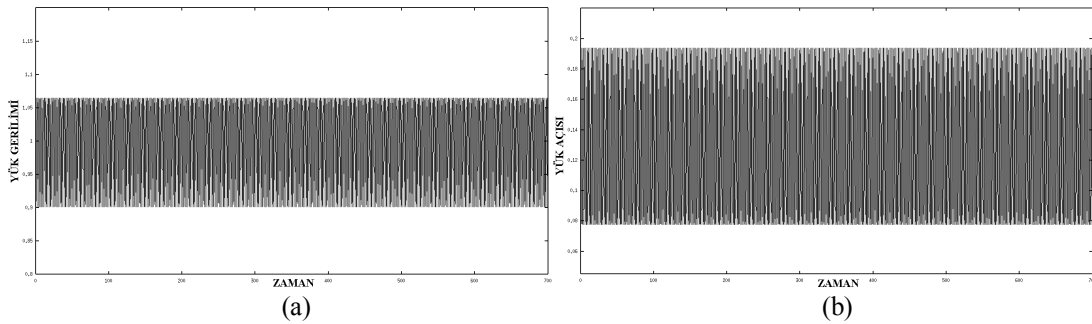
Şekil 4.48. a)- $Q_1=11.2600$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 b)- $Q_1=11.2600$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi
 c)- $Q_1=11.2650$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 d)- $Q_1=11.2650$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi
 e)- $Q_1=11.2700$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 f)- $Q_1=11.2700$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi

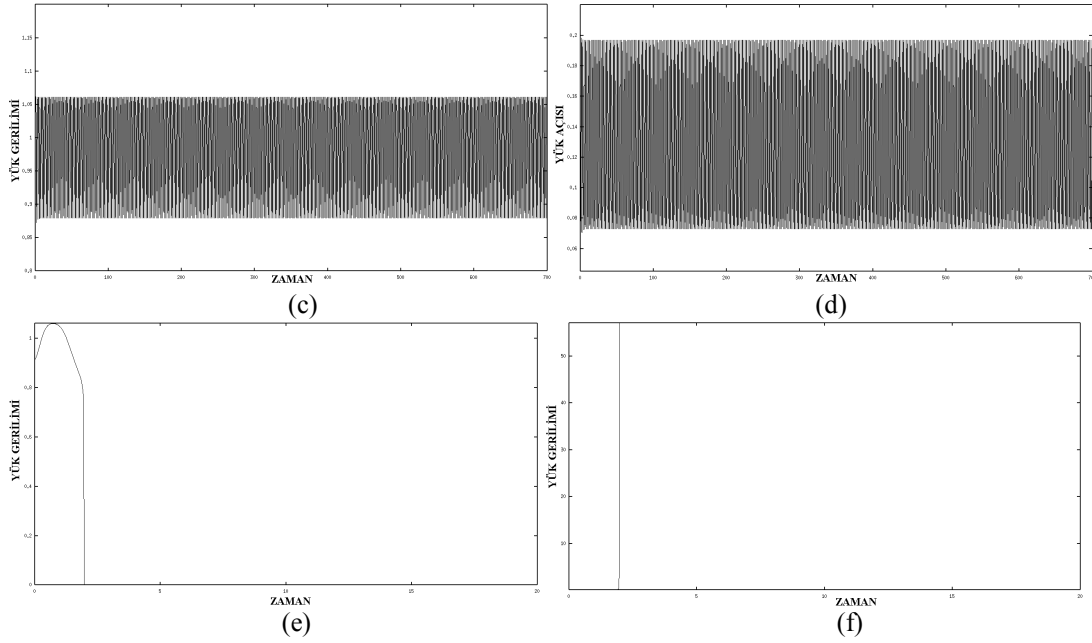
$Q_1=11.2600$ ve $Q_1=11.2650$ ve $Q_1=11.2700$ değerlerinde sistemin kararlı olduğu osilasyonların azalarak kaybolması şeklinde kendini gösterirken, osilasyon kaybolmalarının adım adım gecikmeye uğradığı görülmektedir. Bu durum sistemin tekrardan marjinal bir değişime uğrayacağına habercisi sayılır. Bu değişimin takibi için, Şekil 4.49'da $Q_1=11.270156$, $Q_1=11.2830$ ve $Q_1=11.2900$ değerlerindeki yük açısı-yük gerilimi faz portresi ve generatör açısı-generatör açısal hızı faz portreleri çizdirilmiştir.



Şekil 4.49. a)- $Q_1=11.270156$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 b)- $Q_1=11.270156$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generator Açısı-Generator Açisal Hızı Faz Portresi
 c)- $Q_1=11.2830$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 d)- $Q_1=11.2830$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generator Açısı-Generator Açisal Hızı Faz Portresi
 e)- $Q_1=11.2900$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Yük Gerilimi-Yük Açısı Faz Portresi
 f)- $Q_1=11.2900$ Reaktif Güç Talebi Değeri için Generator Açısı-Generator Açisal Hızı Faz Portresi

faz portrelerinde değişimin yönü vektör alanlarda da görüldüğü gibi içeriden dışarıya doğrudur. Bu durum sistemin kararsızlığını gösterir. Bu değerlere ilişkin için yük gerilimi-zaman ve yük açısı-zaman değişim eğrileri Şekil 4.50'de çizdirilmiştir.



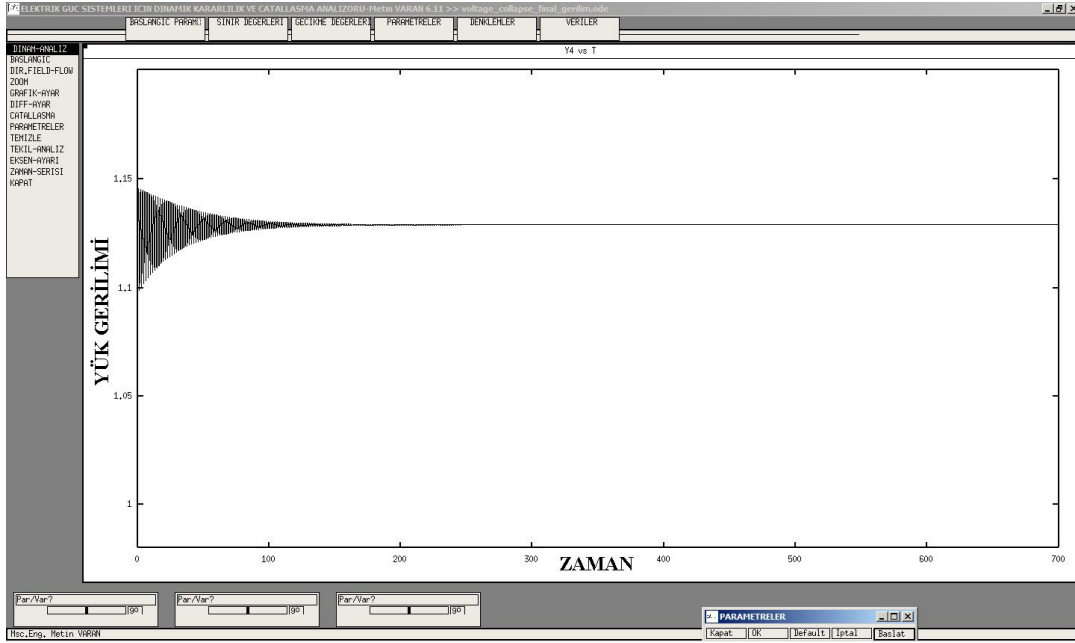


Şekil 4.50. a)- $Q_1=11.270156$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 b)- $Q_1=11.270156$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi
 c)- $Q_1=11.2830$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 d)- $Q_1=11.2830$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi
 e)- $Q_1=11.2900$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Gerilimi-Zaman Değişimi
 f)- $Q_1=11.2900$ Reaktif Güç Talebi Değeri İçin Yük Açısı-Zaman Değişimi

Burada $Q_1=11.270136$ değerinde oluşan eyer noktası çatallaşmasının verilen başlangıç şartları değerleri için son kararlı bölge olduğu söylenebilir. $Q_1=11.2900$ reaktif güç talebi değerinde yük geriliminin tamamen çöktüğü ve yük açısının kaçtığı görülmektedir.

4.7. Üç Baralı Güç Sisteminin $D=0.08$ Parametresi Seçimi Dahilinde Çatallaşma Noktalarının İncelemesi

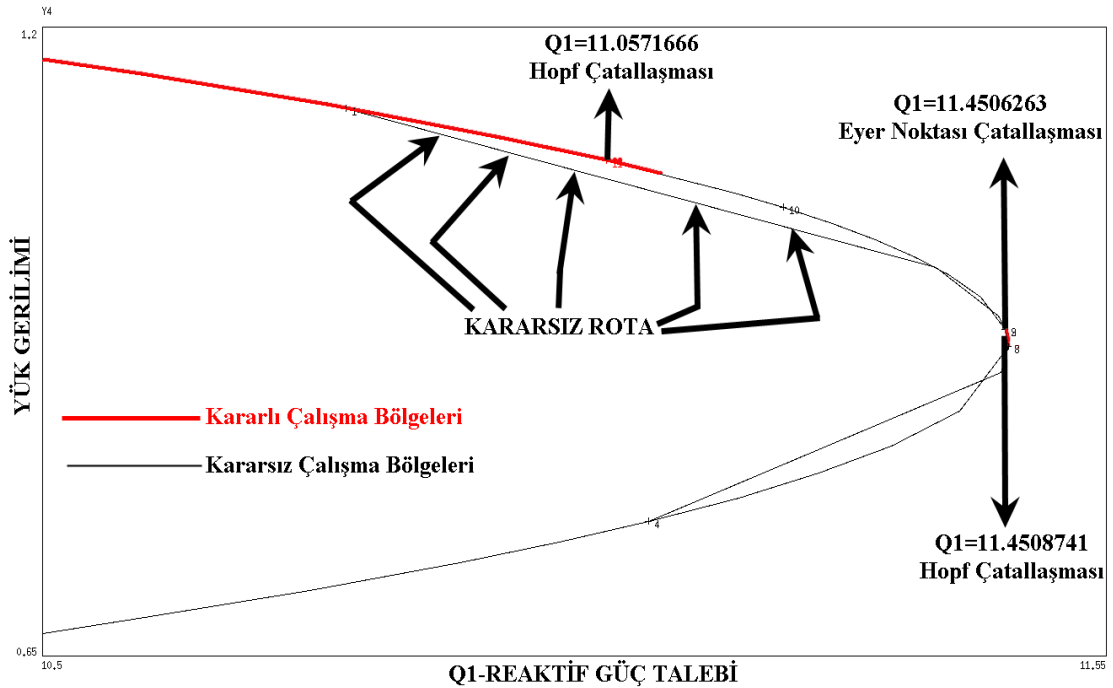
Seçilen parametreler dahilinde yük geriliminin zamanla değişimi Şekil 4.48'de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere yük gerilimi 1.130 (pu) mertebesinde olup, başlangıçta biraz osilasyon yaptıysa da 1.1125 değerinde dengelenmiştir.



Şekil 4.51. $D=0.08$ ve $Q_1=10.80$ Değeri İçin Yük Gerilimi- Zaman Değişimi

4.7.1. Birinci ve ikinci adım çatallaşma analizi

Bu şartlar altında yük barası geriliminin Q_1 -Reaktif Güç Talebi değişimi ile olan çatallaşma diyagramının 1.adımı ve 2. adımları birlikte yapılarak Şekil 4.52’de verildiği üzere elde edilir.



Şekil 4.52. $D=0.08$ Parametresi için Birinci ve İkinci Adım Çatallaşma Diyagramı

Şekil 4.52’de gösterildiği gibi çatallaşma analizinin birinci ve ikinci adımları birlikte yapılarak $Q_1=11.4508741$ reaktif güç talebi değerinde,

-Generatör Açısı= 0.339177

-Generatör Açısıl Hızı= 0

-Yük Açısı= 0.134058244

-Yük Gerilimi= 0.92133089

olan başlangıç değerlerine sahip sistem şartlarında eyer noktası çatallaşması(SNB) tespit edilmiştir. $Q_1=11.4506263$ reaktif güç talebi değerinde,

-Generatör Açısı= 0.3368619

-Generatör Açısıl Hızı= 0

-Yük Açısı= 0.132641

-Yük Gerilimi= 0.93584

olan başlangıç değerlerine sahip sistem şartlarında hopf çatallaşması(HB) tespit edilmiştir. $Q_1=11.0571666$ reaktif güç talebi değerinde,

-Generatör Açısı= 0.314264

-Generatör Açısıl Hızı= 0

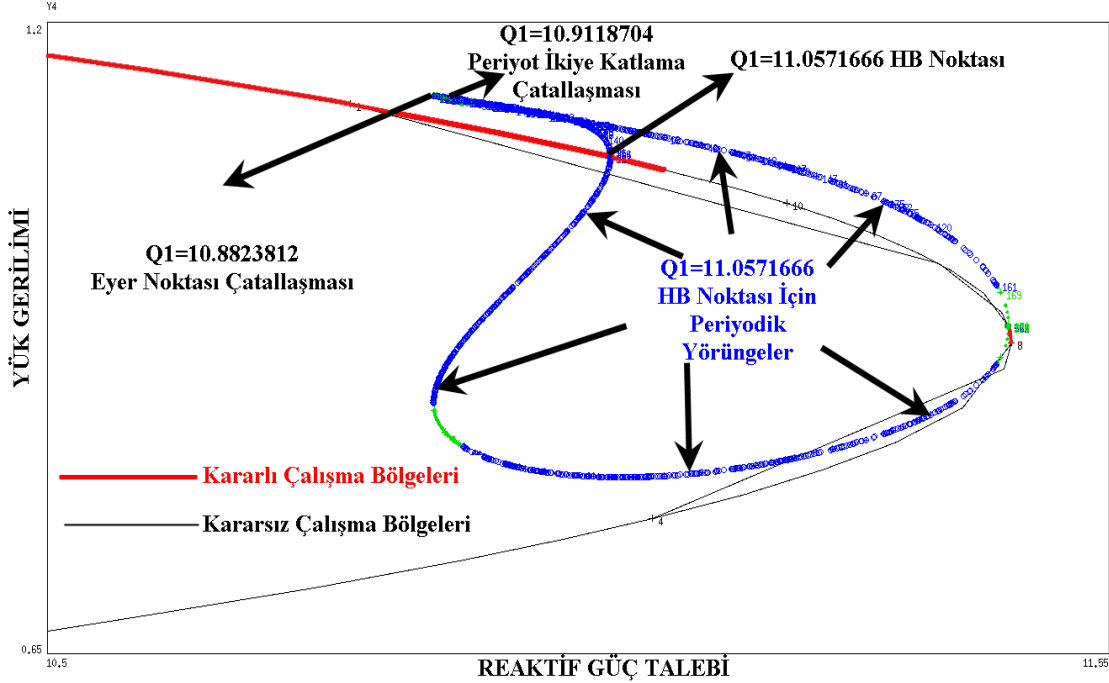
-Yük Açısı= 0.117809162

-Yük Gerilimi= 1.083124711

olan başlangıç değerlerine sahip sistem şartlarında yine bir hopf çatallaşması(HB) tespit edilmiştir.

4.7.2. Üçüncü adım çatallaşma analizi

Bu şartlar altında yük barası geriliminin Q_1 -Reaktif Güç Talebi değişimi ile olan çatallaşma diyagramının üçüncü adımı yapılarak Şekil 4.53’de verildiği üzere elde edilir.



Şekil 4.53. D=0.08 Parametresi için Üçüncü Adım Çatallaşma Diyagramı

Şekil 4.53.'de gösterildiği gibi çatallaşma analizinin üçüncü adımında $Q_1=11.057166$ hopf çatallaşması noktası için periyodik yörünge analizi yapılmıştır. Yapılan bu periyodik yörünge analizi 1000 nokta incelenerek tamamlanmıştır. Yapılan bu analiz tüm noktalara ait tam çatallaşma listesi EK-B'de verilmiştir. Şekil 4.53'de bu noktalar arasından $Q_1=11.9118904$ reaktif güç talebi değerinde

- Generatör Açısı=0.6877884
- Generatör Açısız Hızı=-0.5400177
- Yük Açısı= 0.24257833
- Yük Gerilimi= 0.839380245

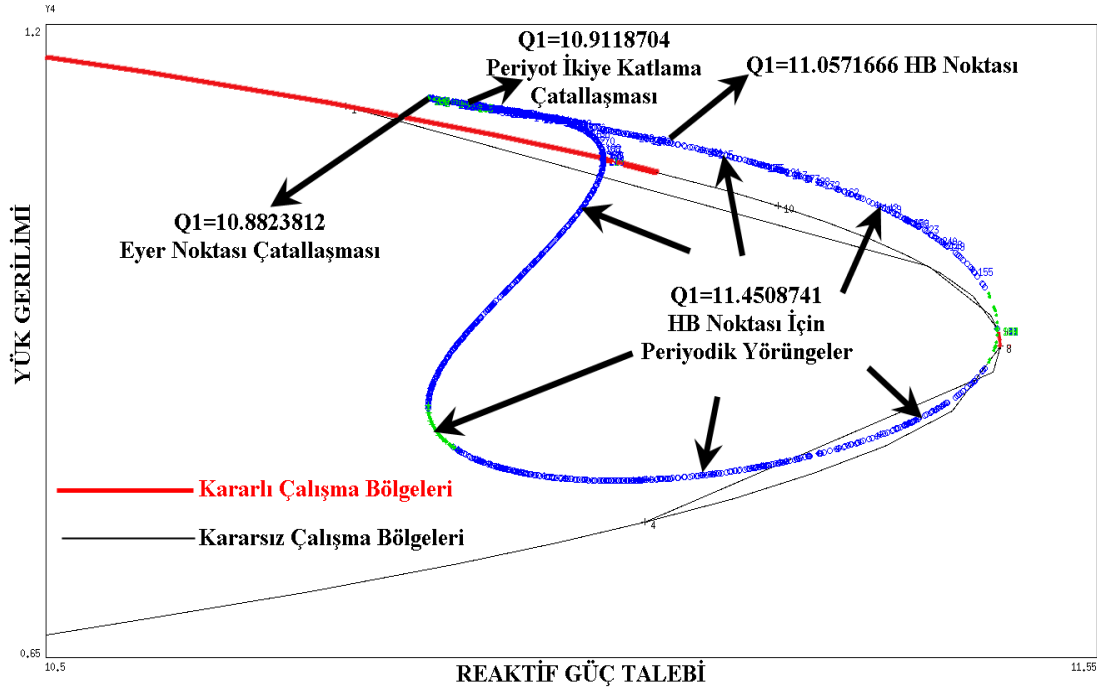
olan başlangıç değerlerine sahip sistem şartlarında periyot ikiye katlama çatallaşması (PDB) tespit edilmiştir. Bundan başka $Q_1=11.8823812$ reaktif güç talebi değerinde,

- Generatör Açısı=0.02480130
- Generatör Açısız Hızı=1.106320
- Yük Açısı= 0.05065145
- Yük Gerilimi= 1.13511259

olan başlangıç değerlerine sahip sistem şartlarında eyer noktası çatallaşması(SNB) tespit edilmiştir.

4.7.3. Dördüncü adım çatallaşma analizi

Bu şartlar altında yük barası geriliminin Q_1 -Reaktif Güç Talebi değişimi ile olan çatallaşma diyagramının dördüncü adımını yapılarak Şekil 4.54’de verildiği üzere elde edilir.



Şekil 4.54. D=0.08 Parametresi için Dördüncü Adım Çatallaşma Diyagramı

Şekil 4.54’de gösterildiği gibi çatallaşma analizinin dördüncü adımında $Q_1=11.4508741$ hopf çatallaşması noktası için periyodik yörünge analizi yapılmıştır. Bu yörünge analizinin üçüncü yörünge analiziyle aynı sonuçlar verdiği görülmektedir. Bunun nedeni hopf çatallaşması için yapılan yörünge analizinin başlangıç iterasyonunda öncelikle bu noktaya en yakın hopf noktasının varlığını araştırılması ile açıklanabilir. Buna göre $Q_1=11.0571666$ hopf noktası periyodik yörünge analizi kendisine en yakın $Q_1=11.4508741$ hopf noktasını bulmakla analize başlar. Bu durum $Q_1=11.4508741$ hopf noktasında başlatılan periyot yörünge analizi için de aynıdır. Bundan başka dördüncü adım çatallaşma analizinde $Q_1=11.4506263$ reaktif güç talebi değerinde oluşan eyer noktası çatallaşmasının alt çatallaşma yörüngeleri yine 1000 nokta üzerinden incelenerek tamamlanmıştır[EK-B]. D=0.08 parametresi için yapılan çatallaşma analizi tüm çatallaşma noktalarının tespit edilmesiyle tamamlanmıştır.

Çalışmanın buraya kadar olan kısmında gerilim kararlılığının çatallaşma teorisi ile ilişkileri yüksek reaktif güç taleplerinde bulunan ve doğrusal olmayan yükler içeren üç baralı güç sistemi üzerinden sebep sonuç ilişkileri kurularak incelenmiştir. Aynı bölüm içerisinde sistemi gerilim çökmesine götüren veya götürebilecek noktaların belli şartlar altında doğrudan çatallaşma noktaları ile ilişkili olduğu gösterilmiştir.

Bu bağlamda denilebilir ki, hopf ve eyer noktası çatallaşmaları gibi sistem üzerinde belirgin etkileri olan çatallaşmalarda sistemi bu kritik noktalara götürecekt rotaların tespit edilmesi önemli bir erken müdahale aşamasıdır. Periyodik yörünge analizi bu amaçla uygulanabilecek en bilinen analiz yöntemidir. Bu çatallaşmalar için periyodik yörüngelerin izlenmesi genel olarak sistemin gidişatının izlenmesi anlamına da gelir.

Bu çalışmada aşırı doğrusal olmayan yüklere maruz üç baralı bir güç sisteminin çatallaşma dinamikleri incelenmiştir. Yapılan bu dinamik analizde farklı reaktif güç talebi değerlerinde sistemin Q-V eğrileri üzerinde tespiti yapılan hopf ve eyer noktası ve periyot ikiye katlama gibi çatallaşmalar için periyodik yörünge analizleri yapılarak, bu çatallaşma oluşumlarının sistem üzerinde fiziksel etkileri irdelenmiştir. Bundan başka periyot yörüngelerinin kaosa bir başka ifade ile kontrol edilemezliğe sürüklendiği değişim aşamaları incelenmiştir. Bu bilgiler ışığında özellikle hopf ve periyot ikiye katlama çatallaşmalarında meydana gelen periyodik-2ⁿ yörüngelerin önce limit döngülerine daha sonra ardışıl bir şekilde ilerleyerek tuhaf çekere(strange attractor) ondan sonra kararsızlığını kaybetmiş olarak periyodik-2n+1 yörüngesine dönüşebildiği bundan en sonra da geri döndürülemeyecek bir karmaşıklıkla tam bir kaosa sürüklenebileceği gösterilmiştir. Tabi burada çizilen genel çerçeve dışında binlerce farklı başlangıç değerleri durumlarında çatallaşma oluşumlarının da olduğu unutulmamalıdır. Burada dikkate alınması gereken diğer bir husus yapılan çatallaşma analizlerindeki başlangıç ve çatallaşma parametresinin hassasiyet aralıklarıdır. Bu çalışmada sadece 1000 birimlik aralık üzerinde çatallaşma analizleri için %0.00001 hassasiyetle yapılabildiği düşünülürse yüksek aralıklarda daha fazla tespiti yapılabilirliği öngörülebilir. Bu ifadeler MIT-Caltech-Boston başta olmak üzere yirminin üzerinde üniversite tarafından desteklenen açık kaynak platformları üzerinden sürekli geliştirilen AUTO çatallaşma algoritmalarının başarımını doğrulamaktadır.

BÖLÜM 5. İYİLEŞTİRİCİ MÜDAHALE ALGORİTMALARI

5.1. Giriş

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

Üretim merkezlerinin tüketim merkezleri yanında 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[93].

Bilindiği üzere, elektrik enerji iletim sistemlerinde enerji iletiminin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi için seri ve şönt kompanzasyon uygulanır. İdeal olarak her iki kompanzasyon sistemi şu faydaları sağlamaktadır.

1. Her enerji iletim kademesinde düzgün bir gerilim profili oluşturmak
2. iletilebilecek maksimum gücü artırarak sistem kararlılığını geliştirmek
3. iletim sisteminin gerektirdiği reaktif gücü sağlayarak ekonomik anlamda katkıda bulunmak

Reaktif güç sağlamanın oldukça ekonomik şekli yük yakınına yerleştirilen şönt kompanzatorlerdir. Şönt kompanzatorler, 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

düşünürler. 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.

5.2. Elektrik Güç İletim Sistemlerinde Reaktif Güç Kontrolü

İletim şebekelerinde şönt ve seri elemanlar olarak seri kapasitör veya şönt kompanzatörler 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[93].

5.2.1. 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 [6]. 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 [4].

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.

5.2.2. 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 [2-6]. Mekanik anahtarlama şönt ve seri elemanlar güç sistemlerinde meydana gelen değişimlere hızlı ve etkili bir biçimde cevap verememektedirler. Yük barasına yeterli reaktif gücün verilemeyişi gerilim çökmesinin birincil nedeni olduğundan hızlı ve tam olarak yapılacak bir reaktif güç kompanzasyonu sistemi gerilim çökmesi olayından uzaklaştıracaktır [80]. Son yıllarda iletim hatlarının kompanzasyonu güç elektroniği endüstrisinde meydana gelen değişimler neticesinde oldukça ileri boyutları varmıştır. Bunun neticesinde FACTS(Flexible Alternatif Current Transmission Systems) adı verilen cihazlar geliştirilmiş ve halende bu konuda yoğun bir çalışmalar mevcuttur.

5.2.3. 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[90]. 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,

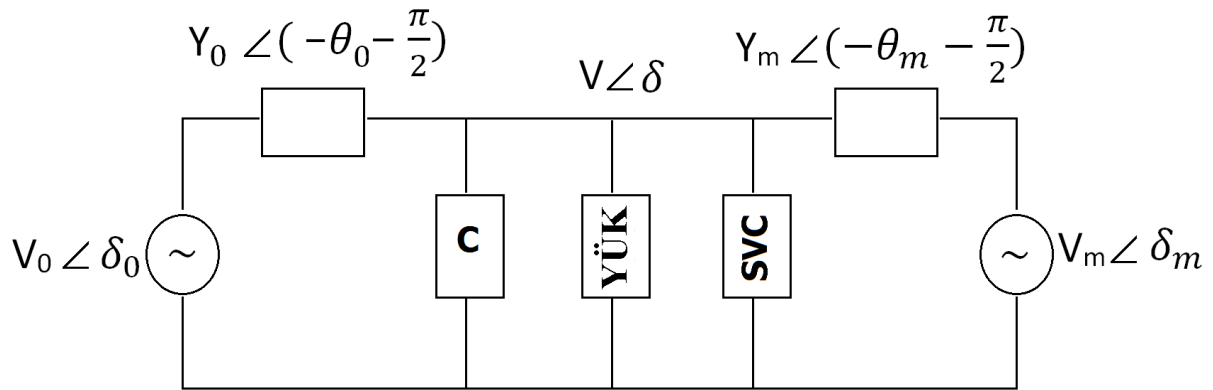
kontrol merkezi tarafından devamlı bir şekilde takip edilmektedir. Bilinen FACTS cihazları aşağıdadır [91-93].

- Static Var Kompanzatorü(SVC)
- Static Kompanzatorler(STATCOM)
- Tristor Kontrollü Seri Kapasitörler(TCSC)
- Universal Güç Akışı Kontrolörleri (UPFC)
- Yüksek Gerilim Doğru Akım İletimi (HVDC)

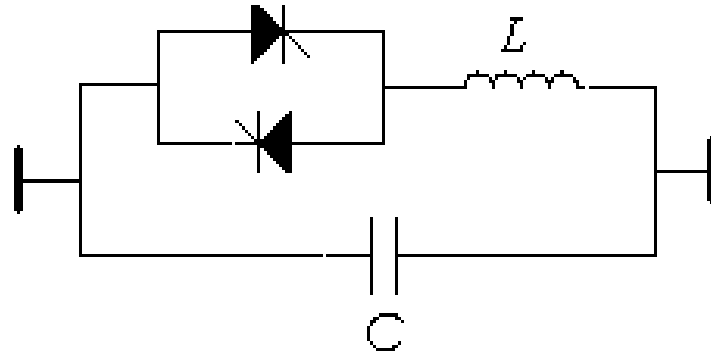
Bunlara ilave olarak; daha önceki uygulamalarda devre elemanlarından geçen akımı kontrol etmek için kullanılan TCPST (thyristor -controlled phase- shifting transformers) adı verilen bir FACTS cihazı geliştirilerek, yük kademe değiştiricilerde tristör tetikleme ile anahtarlama hareketlerinde kullanılabilmektedir.

5.3. Doğrusal Olmayan Yükler İçeren Üç Baralı Güç Sistemine SVC Uygulanması

Yukarıda da bahsedildiği üzere üretim merkezlerinin tüketim merkezleri yakınında kurulmasından dolayı reaktif güç kompanzasyon yöntemi sistem gerilim kontrol etmek ve iletim kapasitesini arttırmak için tasarlanırlar. 4. Bölümde çatallaşma analizleri yapılan üç baralı güç sistemine yük tarafına bir SVC cihazı bağlanmasıyla kritik çatallaşmaların temizlenmesi bundan başka sistemin reaktif güç yüklenebilirlik sınırlarının artırılması hedeflenmiştir. Aşağıda SVC bağlı üç baralı güç sistemi modeli gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Lineer Olmayan Yükler İçeren SVC Bağlı Dinamik Güç Modeli

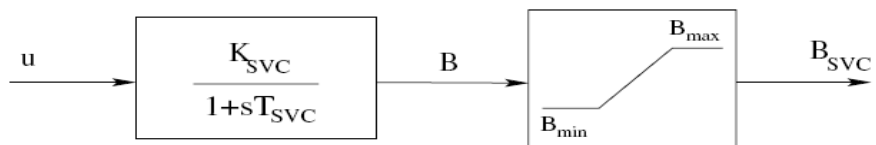


Şekil 5.2. SVC Modeli

Tasarlanan SVC 'de Şekil 5.2'de gösterildiği üzere sabit değerli bir kondansatör tristör kontrollü seri reaktöre paralel bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan SVC matematiksel modeli birinci mertebeden adi bir diferansiyel denklem formunda olup, aşağıda verilmiştir.

$$\dot{B} = \frac{1}{T_{SVC}} (K_{SVC} u - B), B_{\min} \leq B \leq B_{\max} \quad (5.1)$$

Burada B, SVC'nin süseptans değeri olup K_{SVC} SVC'nin kazancı, T_{SVC} SVC'nin zaman sabiti ve u kontrol parametresidir. Yapılan statik geribeslemeli kontrol diyagramı aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.3. Statik Geribeslemeli SVC Kontrol Şeması

İyileştirme müdahalesi kısmında yüke en yakın noktadan statik geribeslemede SVC kontrol girişi ifadesi

$$u = k_s (V_L - V_0) \quad (5.2)$$

şeklinde olup, Burada V_0 hedef gerilim, V_L ise SVC'nin bağlı olduğu yük barasıdır. (5.1) ve (5.2) denklemleri birleştirilerek aşağıdaki süseptans durum denklemi ifadesi yazılabilir.

$$\dot{B} = \frac{1}{T_{SVC}} (K_{SVC} k_s (V_L - V_0) - B), B_{\min} \leq B \leq B_{\max} \quad (5.3)$$

SVC'nin ürettiği reaktif güç ifadesi, süseptans ve SVC'nin bağlı olduğu yük barası gerilimine bağlı olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$Q_{SVC} = BV_L^2 \quad (5.4)$$

SVC tarafından karşılanan reaktif gücün dinamik güç sistemi modeline eklenmesi yük durum denklemlerindeki yük açısı ve yük gerilimi denklemlerine Q_{SVC} -reaktif güç ilavesi yapılmasıyla tamamlanır. Yeni yük açısı ve yük gerilimi durum denklemleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$\begin{aligned} K_{qw} \dot{\delta} = & -K_{qv2} V^2 - K_{qv} V + V_0' V Y_0' \cos(\delta + \theta_0') \\ & + V_m V Y_m \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) - (Y_0' \cos(\theta_0')) \\ & + Y_m \cos(\theta_m) V^2 + Q - Q_o - Q_1 + Q_{SVC} \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} TK_{qw} K_{pv} \dot{V} = & K_{pw} K_{qv2} V^2 + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V \\ & + K_{pw} (Q_o + Q_1 - Q - Q_{SVC}) - K_{qw} (P_o + P_1 - P) \end{aligned} \quad (5.6)$$

Güç Sistemine İlişkin Sabitler

$$M = 0.30, Q_0 = 0.3, Q_1 = 9.86, V_0 = 1.0, V_m = 1.05, Y_0 = 3.33, Y_m = 5.0$$

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

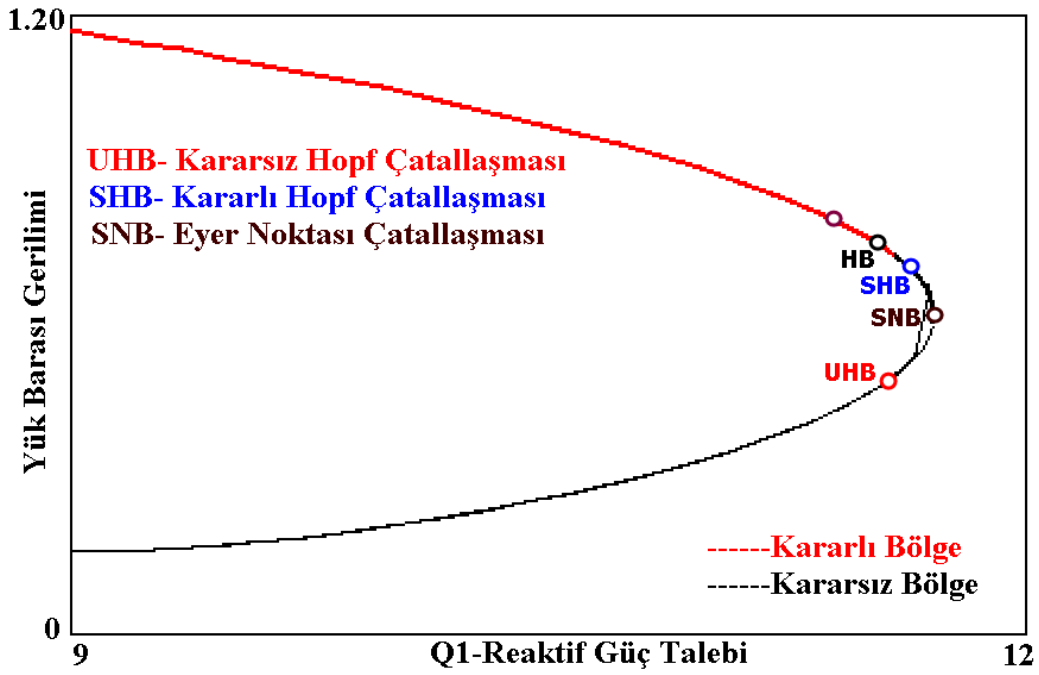
$$P_1 = 0.0, C = 12, P_m = 1.0, D = 0.12$$

Güç Sistemine Ait Durum Değişkenlerinin Başlangıç Değerleri

$$\delta_m = 0.40, \omega_m = 0.02, \delta = 0.10, V = 0.96$$

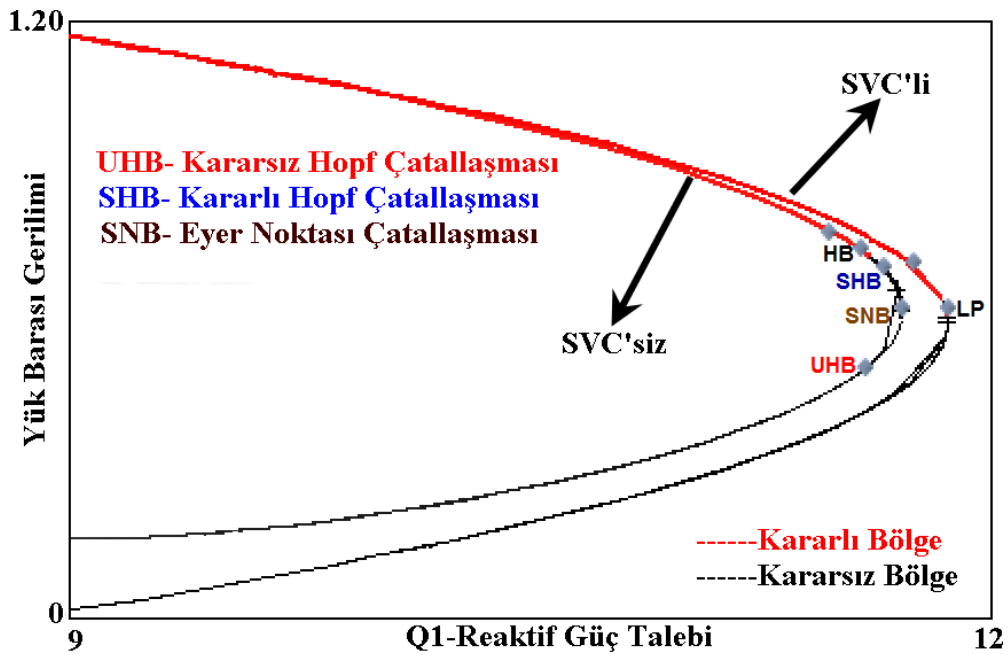
Burada seçilen kritik hopf çatallaşmalarının temizlendiği değerlerde zaman sabiti ve kazanç değeri sırasıyla $T_{SVC}=0.0145$ s and $K_{SVC} = 5$ şeklinde seçilmiştir.

Bu değerlerde analiz edilen sistem için Q1-Reaktif Güç Talebi çatallaşma parametresi seçilerek çatallaşma diyagramı aşağıdaki gibi çizdirilmiştir.



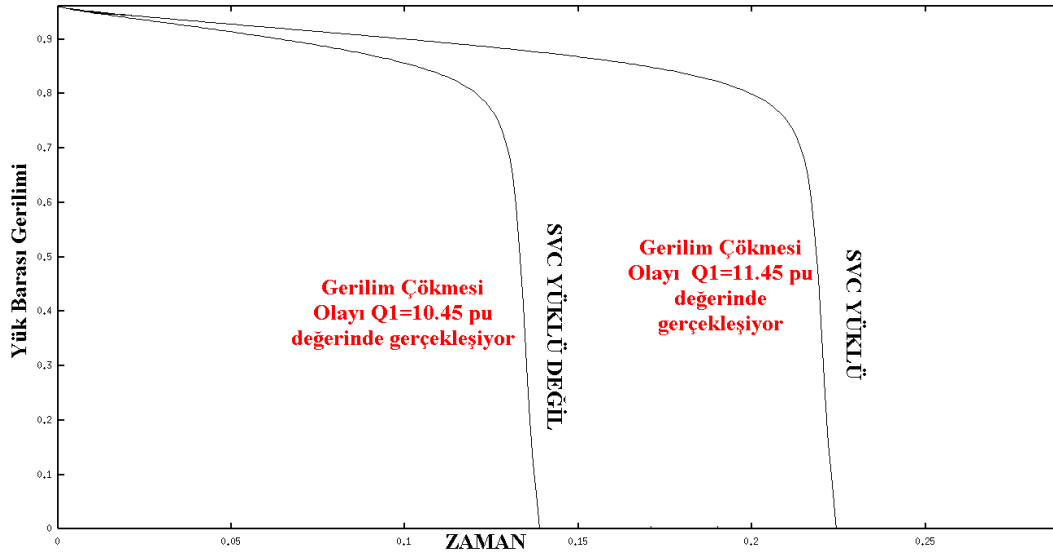
Şekil 5.4. SVC Bağlı Değilken Elde Edilen Çatallaşma Diyagramı

Burada aşırı yüklenme sınırlarında kararlı ve kararsız hopf çatallaşmaları ve eyer noktası çatallaşmalarının oluşumu görülmektedir. Yük barasına SVC bağlandıktan sonraki çatallaşma diyagramı aşağıdaki gibi çizdirilmiştir.



Şekil 5.5. SVC Bağlı İken Elde Edilen Çatallaşma Diyagramı

SVC yüklendikten sonra kritik hopf çatallaşmaların daha az tehlikeli olan çatallaşmalarla değiştirildiği bundan başka reaktif güç yüklenme sınırlarının $Q1=10.45$ p.u'den $Q1=11.45$ p.u seviyelerine yükseltildiği görülmektedir.

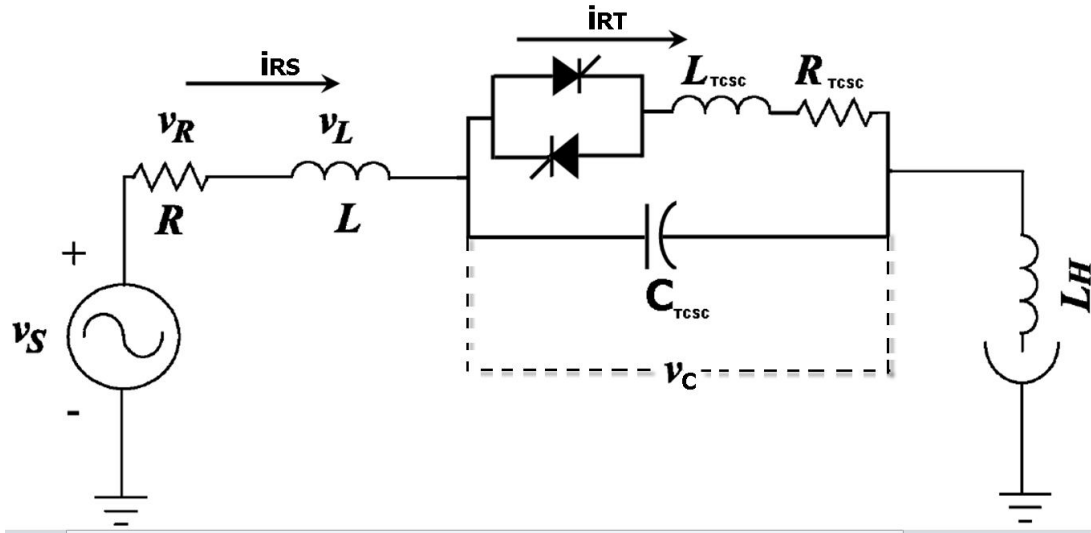


Şekil 5.6. SVC'li ve SVC'siz Yük Barası Geriliminin Zamana Göre Değişimi

Şekil 5.6'da SVC yüklenmesinin gerilim çökmesi olayını geciktirdiği de görülmektedir. Yapılan iyileştirici müdahale sonucunda sistem üzerinde meydana gelecek kritik çatallaşmaların temzilenmesi ve reaktif güç yüklenebilirlik sınırlarının arttırılması mümkün hale gelmiştir.

5.4. Elektrik Ark Ocağı Yüğü İçeren Güç Sistemine TCSC Uygulanması

Tristör kontrollü seri kompanzatorler(TCSC), günümüzün modern elektrik güç iletim sistemlerinde artan bir şekilde uygulaması yapılan FACTS ailesinin üyesi olan cihazlardır. Şekil 5.7'de gösterildiği üzere elektrik ark ocağı yükü içeren güç sisteminde TCSC tristör kontrollü reaktöre bağlı paralel bir kapasite içermekte olup kaynağa ve ark ocağı yükü arasında seri olarak bağlanır. Yük gerilimi TCSC tarafından PPL ile senkron değişken faz gecikmeli tristör tetikleme sinyalleri ile kontrol edilir[91-92].



Şekil 5.7. TCSC Bağlı Elektrik Ark Ocağı Yüklü İçeren Güç Sistemi Modeli

Burada modellenmesi yapılan TCSC

- Bypass Edilmiş Tristör Modu
- Bloke Edilmiş Tristör Modu
- Vernier Modu

olmak üzere üç çalışma modunda incelenmiştir. Vernier modunda, modellenen TCSC sürekli değişen tristör tetikleme açıları ile sürülmüştür.

Şekil 5.7’de gösterildiği gibi TCSC bağlı elektrik ark ocağı yükü içeren güç sisteminde Kirchhoff akım ve gerilim yasaları uygulanarak düğüm ve çevre denklemleri yazılırsa, güç sisteminin durum denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\frac{di_{RS}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1}i_{RS} - v_C + v_S \quad (5.7)$$

$$\frac{di_{RT}}{dt} = -\frac{R_T}{L_2}i_{RT} + S(t)v_C \quad (5.8)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{L_s C_1}i_{RS} + -\frac{S(t)}{L_T C_1}i_{RT} \quad (5.9)$$

Burada $S(t)$, tetikleme açısı fonksiyonu olup bu fonksiyon 0 ile 1 arasında değişerek uygun tetikleme açısıyla TCSC’nin sürülmesini kontrol eder. Bu durum denklemleri Bölüm-3’de verilen ark ocağı durum denklemleri ile birleştirilip sistemin genel durum denklemleri elde edilerekten dinamik analiz safhasına geçilir. Analiz boyunca seçilen TCSC parametreleri p.u değerler üzerinden alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu parametre değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir. Bundan başka güç sistemine ait sistem parametre değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Ark Ocağı Yüğü İçeren Güç Sistemine Ait Parametreler

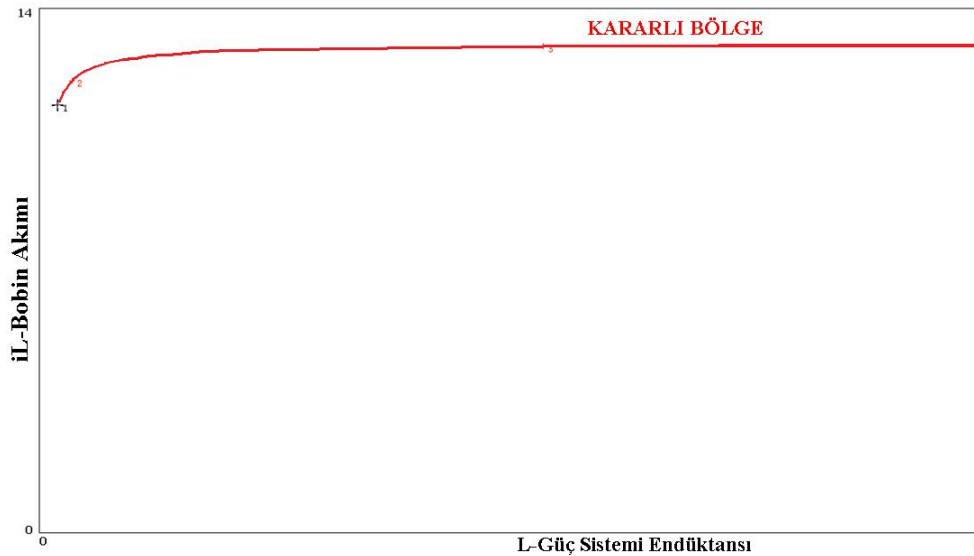
Parametreler	Başlangıç Şartları
L	0.120
V_S	1
m	2
n	2
K_1	0.08
K_2	0.079199
K_3	3
R	0.10
L_H	0.10

Tablo 5.2 Ark Ocağı Yüğü ile Güç Sistemi Arasına Bağlanan TCSC'ye Ait Tasarım Parametreleri

Parametreler	Başlangıç Şartları
C_{TCSC}	0.790
L_{TCSC}	0.891
R_{TCSC}	0.00206
R_1	0.00206
L_1	0.447
L_S	0.10
S_{FIRE-1}	0.49
S_{FIRE-2}	0.60
S_{FIRE-3}	0.83

5.4.1. TCSC Bağlı Güç Sistemi İçin L- Çatallaşma Parametresi Seçilerek Yapılan Çatallaşma Analizi

Yukarıda verilen başlangıç şartları altında bobin akımının L-Güç Sistemi Hat Endüktansı değişimi ile olan çatallaşma diyagramının 1. adımı ve 2. adımları birlikte yapılarak Şekil-5.8'de verildiği üzere elde edilir.

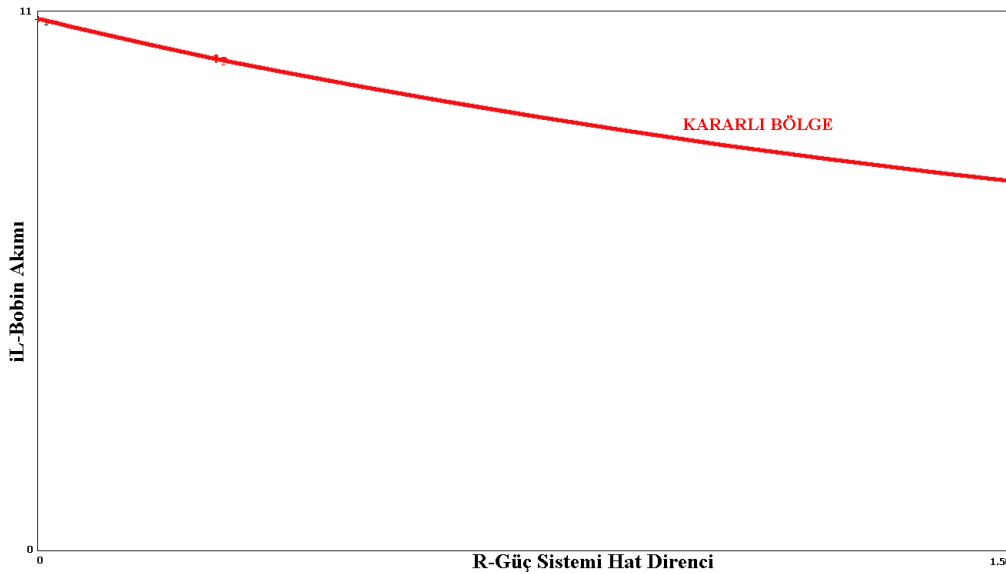


Şekil 5.8. TCSC Bağlı Güç Sisteminde Birinci ve İkinci Adım Çatallaşma Diyagramı

Şekil 5.8’de gösterildiği gibi çatallaşma analizinin birinci ve ikinci adımları birlikte yapılarak tasarlanan TCSC’nin sistemi kritik hopf ve eyer noktası çatallaşmalarında temizlemesinin yanında sistemin değişen güç endüktansı değerlerinde kararlı çalışma bölgesininin genişlettiği görülmektedir.

5.4.2. TCSC Bağlı Güç Sistemi İçin R- Çatallaşma Parametresi Seçilerek Yapılan Çatallaşma Analizi

Yukarıda verilen başlangıç şartları altında bobin akımının R-Güç Sistemi Hat Direnci değişimi ile olan çatallaşma diyagramının 1.adımı ve 2. adımları birlikte yapılarak Şekil-5.9’da verildiği üzere elde edilir.



Şekil 5.9. TCSC Bağlı Güç Sisteminde Birinci ve İkinci Adım Çatallaşma Diyagramı

Şekil 5.9’da gösterildiği gibi çatallaşma analizinin birinci ve ikinci adımları birlikte yapılarak tasarlanan TCSC’nin sistemi kritik hopf ve eyer noktası çatallaşmalarında temizlemesinin yanında sistemin değişen güç sistemi hat direnci değerlerinde kararlı çalışma bölgesininin genişlettiği görülmektedir. Burada asıl müdahalenin sistemin harmoniklerinin elimine edilmesi olduğu bilinmelidir. Harmonik kaynaklı hopf çatallaşmaları da dolaylı olarak elimine edilmiş ve kararlılık marjı arttırılmıştır. Diğer bir ifadeyle tasarlanan TCSC burada hat empendansının kontrol altında tutulması görevini yapmıştır.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzün hızlı teknolojik gelişmelerine paralel olarak elektrik enerjisine olan talep de aynı ölçüde artmaktadır. Aşırı çalışma koşulları altında, büyük bir enterkonnekte güç sisteminin veya elektrik üretim tesisinin devre dışı kalmasına neden olan, oluşan kesintilerin hem üretici hem tüketici tarafında meydana getirdiği iş kaybı yanında; generatörler, trafolar, kesiciler gibi sistem ekipmanları üzerinde oluşan bozucu etkileri olan gerilim çökmesi olarak da adlandırılan yeni bir kararsızlık problemiyle karşı karşıya kalınmaktadır.

Bu bağlamda gelinen nokta sürekli artan güç ihtiyaçlarına cevap verebilmek için öncelikle yeni üretim tesisleri kurmanın kaçınılmaz olduğu gerçeğidir. Bununla beraber gerek halihazırda kullanıcılara hizmet veren güç hatları gerekse de yeni kurulacak üretim tesislerinden elektriksel yüklerin dinamik davranışlarına ve meydana gelebilecek bozucu etkilere (paralel iletim hatlarından birisinin devre dışı kalması, yıldırım darbesi etkileri, kısa devreler veya büyük miktarlarda yük almalar gibi) daha hızla cevap verebilmeleri için sistem üzerinde statik analiz, modal analiz, sürekli güç akışı analizi, tekil değer ayrıştırması analizi, ve çatallaşma analizi gibi metotlar ile gerilim kararlılığı başta olmak üzere, güç sisteminin maksimum yüklenebilirlik sınırı, kararlılık sınırı ve meydana gelebilecek kararsızlık mekanizmaları hakkında öngörüler geliştirilmesi, detaylı iyileştirme algoritmaları ve erken müdahale araçları oluşturulması elzemdir.

Güç akışı analizleri sistemin durumunun görüntülenmesi açısından faydalı olmasına rağmen sisteme herhangi bir arıza durumunda yapılacak pahalı müdahaleler daha doğru ve kapsamlı dinamik analiz metodlarının kullanılmasını da gerektirir. Dinamik analiz, güç akışı tabanlı simulasyon sonuçlarını doğrulamak, zamana bağlı kontrol ve koruma müdahaleleri ve operatör müdahalelerinin zamanlama öngörüsünü sağlamak adına önemli bir araçtır. Bununla birlikte hem geçici, hem uzun dönemli kararlılık modellemelerinin tam dinamik analiz yöntemiyle yapılması mümkündür.

Çatallaşma analizi güç sistemlerinde işletme ve planlama aşamalarında, dinamik sistem analizi incelemelerinde özellikle de gerilim kararlılığı menşeli reaktif güç planlamalarında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz yönteminin en bilinen uygulamalarının başında hiç şüphesiz, Q-V eğrileri üzerinde yapılan çatallaşma hesaplamaları gelmektedir. Bu analiz metodu güç akışı programlarının özellikle maksimum güç transferi şartlarına yakın çalışma bölgelerinde yakınsama hatalarının zorluklarının üstesinden gelmek amacıyla gerek planlama gerekse de işletme çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Uygun modellemelerin yapılması önkoşuluyla uzun dönemli sistem analizlerinde Q-V metodu oldukça yardımcı bir araçtır. Q-V çatallaşma analizleri P-V eğrileriyle birlikte incelenerek işletme durumunda doğru müdahale adımları oluşturur[4].

Bu çalışmada aşırı doğrusal olmayan yüklere maruz üç baralı bir güç sisteminin çatallaşma dinamikleri incelenmiştir. Yapılan bu dinamik analizde farklı reaktif güç talebi değerlerinde sistemin Q-V eğrileri üzerinde tespiti yapılan hopf ve eyer noktası ve periyot ikiye katlama gibi çatallaşmalar için periyodik yörünge analizleri ve alt çatallaşma tespitleri yapılarak, bu çatallaşma oluşumlarının sistem üzerinde fiziksel etkileri irdelenmiştir. Bundan başka periyot yörüngelerinin kaosa bir başka ifade ile kontrol edilemezliğe sürüklendiği değişim aşamaları incelenmiştir. Bu bilgiler ışığında özellikle hopf ve periyot ikiye katlama çatallaşmalarında meydana gelen periyodik-2ⁿ yörüngelerin önce limit döngülerine daha sonra ardışıl bir şekilde ilerleyerek tuhaf çekere(strange attractor) ondan sonra kararsızlığını kaybetmiş olarak periyodik-2n+1 yörüngesine dönüşebildiği bundan en sonra da geri döndürülemeyecek bir karmaşıklıkla tam bir kaosa sürüklenebileceği gösterilmiştir. Tabi burada çizilen genel çerçeve dışında binlerce farklı başlangıç değerleri durumlarında çatallaşma oluşumlarının da olduğu unutulmamalıdır. Hopf ve eyer noktası çatallaşmaları gibi sistem üzerinde belirgin etkileri olan çatallaşmalarda sistemi bu kritik noktalara götürecek rotaların tespit edilmesi önemli bir erken müdahale aşamasıdır. Çalışmanın iyileştirici müdahale kısmında reaktif güce maruz üç baralı güç sistemi için yüklü baraya periyodik yörünge takibi yapılarak reaktif güç temininin ilgili bara üzerinde oluşması muhtemel kritik çatallaşmaları elimine ederek diğer çatallaşma oluşumlarını da daha yüksek reaktif güç talebi değerlerine öteleyeceği, bundan başka ilgili baranın yüklenebilirlik sınırlarını genişlettiği

gösterilmiştir. Aşırı harmonikler barındıran ark ocağı yükü içeren güç sisteminde ise besleme ile ark yükü arasında seri olarak bağlanan ve özel olarak tasarlanan tetikleme ve tasarım parametrelerine sahip TCSC kontrolörü kullanılarak bara üzerinde oluşması muhtemel kritik çataşmaları tamamen ortadan kaldıracak şekilde gösterilmiştir.

Bu çalışmada, literatürde sistem üzerinde tespit edilmesi yerine daha çok felaket etkileri tartışılan çataşmaların sistem üzerindeki muhtemel yıkıcı etkilerinin fiziksel karşılıkları açığa kavuşturulmuş ve hassas parametre aralıklarında tüm çataşmalarının elde edilmesi hedefi, AUTO çataşma algoritmalarının yüksek doğruluk başarımıyla tatbik edilmesini sağlamak üzere doğrusal olmayan diferansiyel çözücü ve süreleyici arasında koordinasyon sağlanarak gerçekleştirilmiştir. Burada dikkate alınması gereken diğer bir husus yapılan çataşma analizlerindeki başlangıç ve çataşma parametresinin hassasiyet aralıklarıdır. Bu çalışmada sadece 1000 birimlik aralık üzerinde çataşma analizleri için %0.00001 hassasiyetle yapılabildiği düşünülürse yüksek aralıklarda daha fazla tespiti yapılabilirliği öngörülebilir. Bu ifadeler MIT-Caltech-Boston başta olmak üzere yirminin üzerinde üniversite tarafından desteklenen açık kaynak platformları üzerinden sürekli geliştirilen AUTO çataşma algoritmalarının başarımını doğrulamaktadır. Bundan başka AUTO'nun CODIM merkezi çataşmaları etrafında alt çataşma ve periyodik yörünge tespiti için kullandığı "arclength" süreklilik yöntemindeki çevrim kırılmaları, "pseudo-arclength" sürekliliği ile optimize edilerek 1000 değer üzerinde 300'e varan alt çataşma noktasının elde edilmesiyle başarımını doğrulamıştır.

BPA ve WSCC işletmelerinde kullanılmakta ve halen geliştirilmesi devam eden "Online Güç Sistemi Kararlılık İzleme ve Değerlendime" sistemlerinde çok sayıda erken müdahale analiz aracı mevcuttur. Bu tezde ağırlıklı olarak Q-V eğrilerin üzerinden incelemesi yapılan güç sisteminin uzun dönem ve kısa dönem gerilim kararlılık analizlerinde ve gerilim çökmelerine doğru sürüklenen sistem davranışlarının tespit edilmesinde, dinamik çataşma noktası tespiti algoritmalarının çoklu kararlılık analiz araçlarının yardımcı bir unsuru olarak

kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu araçlar arasında uygun koordinasyonların sağlanarak etkin erken müdahale yönergeleri oluşturmak mümkündür.

Bu konuyla alakalı çalışmaların çoğu patentler eşliğinde geliştirildiği için konu ile ilgili çok yoğun teorik bilgiler ve ilgili broşrsel bilgiler dışında pek çalışma yoktur. Bu tezde BPA ve WSCC işletmelerinde yaygın olarak kullanıldığı bilinen ve hem planlama hem de işletme çalışmalarında özellikle kritik yüklenme durumları için reaktif güç tayin yönergeleri oluşturulurken başvurulan Q-V eğrileri üzerinden yapılan çatallaşma analizlerinin temelini teşkil eden çatallaşma noktalarının oluşum yörüngelerinin dinamik olarak tespit edilmesi hedefi, alışma prensibi akış diyagramları ile detaylı olarak gösterilen bir kurgu dahilinde gerekleştirilmiştir.

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] CIGRE TASK FORCE 38.02.11, Indices Predicating Voltage Collapse Including, Dynamic Phenomena, Final Reprot, July 1994.
- [3] CIGRE TASK FORCE L38.02.12, Criteria and Counter Measure for Voltage Collapse, Preprint, April 1994.
- [4] KUNDUR, P., Definition and clasification of power system stability. IEEE Trans. Power Syst. May 2004 ; 19(2):1387-1401
- [5] C. W. TAYLOR, Power System Voltage Stability. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [6] P. KUNDUR, Power System Stability and Control. Sections 2.12, 11.2 and Chapter 14. New York: McGraw- Hill, 1994.
- [7] T. J. E MILLER, editor, Reactive Power Control in Electric Systems. New York: John Wiley & Sons, 1982
- [8] YALÇIN, M.A., Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Yeni Bir Yaklaşımla İncelenmesi. Doktora Tezi, İTÜ Elektrik- Elektronik Fakültesi, İstanbul.
- [9] SEYDEL, R., From Equilibrium to Chaos-Practical Bifurcation and Stability Analysis. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland–Elsevier Science, 1988.
- [10] GUCKENHEIMER, J., HOLMES, P., Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields. New York: Springer-Verlag, 1986.
- [11] KOPPEL, N., WASHBURN, R.B., Chaotic motions in the two-degree-of-freedom swing equations IEEE Trans. 1982; CAS(29):738–746.
- [12] VARAIYA, P., WU, F.F., CHEN, R., Direct methods for transient stability analysis of power systems: recent results. IEEE Proc. 1985; 73:1703–1715.
- [13] KAPLAN, B.Z., YARDENI, D., Possible chaotic phenomenon in a three-phase oscillator. Nonlinear dynamics 1990;1: 313-339

- [14] NAYFEH, M.A., HAMDAN, A.M.A., NAYFEH, A.H., Chaos and instability in a power system - primary resonant case. IEEE Trans. 1989, CAS(36):1148-1151
- [15] LAI, L.L., JAING, Z.Y., JAING, R.H., Chaotic phenomena in power systems. Proceedings of international conference Control '91 Edinburgh - UK, 1991
- [16] AJJARAPU, V., LEE, B., Bifurcation theory and its application to nonlinear dynamical phenomena in an electrical power system. IEEE Trans., Feb. 1992, 7(1): 424-431
- [17] AJJARAPU, V., LEE, B., Nonlinear oscillations and voltage collapse phenomena in an electrical power system. Proceedings of 22nd North American Power Symposium, Auburn, AL. USA, 1990
- [18] CHIANG, H.D., DOBSON, I., THOMAS, R.J., THORP, J.S., FEKIH-AHMED, On voltage collapse in electric power systems. IEEE PICA coderena, Seattle, WA, USA, 1989
- [19] ABED, E.H., ALEXANDER, J.C, WANG, H., HAMDAN, A.M.A., LEE, H.C. Dynamic murcutions in a power system model exhibiting voltage collapse. Technical march report, University of Maryland, College Park, MD, USA, 1992
- [20] LAUBY, M.G., Chaos in a simple power system. IEEE PES winter mating paper 92WMI51-1PWRS
- [21] VENKATASUBRAMANIAN, V., SCHÄTTLER, H., ZABORSZKY, J., Dynamics of large constrained nonlinear systems-a taxonomy, Proc. IEEE 1995, 83:1530–1561
- [22] FINK, L. H., ED., Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena II-Voltage Stability and Security, Fairfax, VA, Aug. 1991.
- [23] ED., Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena-Voltage Stability and Security, EL-6183, Jan. 1989.
- [24] ED., Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena III-Voltage Stability and Security, Fairfax, VA, Aug. 1994.
- [25] MANSOUR, Y., ED., Suggested techniques for voltage stability analysis, IEEE/PES, Tech. Rep. 93TH0620-5PWR, 1993
- [26] VOLTAGE STABILITY OF POWER SYSTEMS: Concepts, analytical tools, and industry experience,” IEEE/PES, Tech. Rep. 90TH0358-2PWR, 1990.

- [27] CIGRE, TECH. REP. TF 38-02-10, Modeling of voltage including dynamic phenomena, Apr. 1993.
- [28] HATZIARGYRIOU, N. D., VAN CUTSEM, T., ED., Indices predicting voltage collapse including dynamic phenomena, CIGRE, Tech. Rep. TF 38-02-11, 1994.
- [29] TAYLOR, C., ED., Criteria and countermeasures for voltage collapse, CIGRE, Tech. Rep. TF 38-02-12, June 1994, second draft.
- [30] DOBSON, I., LU, L., Immediate change in stability and voltage collapse when generator reactive power limits are encountered, in Proc. Bulk-Power Voltage Phenomena II – Voltage Stability and Security, Deep Creek Lake-MD. Aug. 1991: 65–73.
- [31] CAÑIZARES, C.A., ALVARADO, F.L., Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems, IEEE Trans. Power Syst. Feb. 1993, 8:1-8.
- [32] KWATNY, H. G., PASRIJA, A. K., BAHAR, L. Y., Static bifurcations in electric power networks: Loss of steady-state stability and voltage collapse, IEEE Trans. Circuits Syst. Oct. 1986, 33:981–991.
- [33] DOBSON, I., CHIANG, H. D., Toward a theory of voltage collapse in electric power systems, Syst. Contr. Lett. 1989., 13:253–262.
- [34] BEGOVIC, M. M., PHADKE, A. G., Dynamic simulation of voltage collapse, IEEE Trans. Power Syst. Nov. 1990, 5:1529–1534.
- [35] CAÑIZARES, C.A., On bifurcations, voltage collapse and load modeling, IEEE Trans. Power Syst. Feb. 1995., 10(1):512–522.
- [36] DOBSON, I., LU, L., HU, Y., A direct method for computing a closest saddle node bifurcation in the load power parameter space of an electric power system, in Proc. ISCAS-1991, 1:3019–3022.
- [37] LEE, B., AJJARAPU, V., A piecewise global small-disturbance voltage stability analysis of structure-preserving power system models,” IEEE Trans. Power Syst. Nov. 1995., 10:1963–1971.
- [38] OVERBYE, T. J., DEMARCO, C. L., Voltage security enhancement using energy based sensitivities, IEEE Trans. Power Syst. Aug. 1991., 6:1196–1202.
- [39] CAÑIZARES, C. A., Calculating optimal system parameters to maximize the distance to saddle-node bifurcations, IEEE Trans. Circuits System-I Mar. 1998., 45:225–237.

- [40] CAÑIZARES, C. A., Conditions for saddle-node bifurcations in AC/DC power systems,” *Int. J. Elect. Power & Energy Syst.* Feb. 1995., 17(1): 61–68.
- [41] LESIEUTRE, B. C., SAUER, P.W., PAI, M. A., Why power/voltage curves are not necessarily bifurcation diagrams,” in *Proc. 25th North Amer. Power Symp.* Washington, D.C. Oct. 1993, 1:30–37.
- [42] PAI, M.A., SAUER, P.W., LESIEUTRE, B.C., Static and dynamic nonlinear loads and structural stability in power systems, *Proc. IEEE* - Nov. 1995., 83: 1562–1572.
- [43] ABED, E.H., VARAIYA, P.P., Nonlinear oscillations in power systems, *Int. J. Elect. Power Energy Syst.* 1984, 6:37–43.
- [44] ROSEHART, W.D., CAÑIZARES, C.A., Bifurcation analysis of various power system models, *Int. J. Elect. Power Energy Syst.* 1999., 12:171–182.
- [45] MITHULANANTHAN, N., SRIVASTAVA, S.C., Investigation of a voltage collapse incident in Sri Lankan power system network, in *Proc. Energy Manage. Power Delivery-Singapore*, Mar. 1998,1: 47–52.
- [46] ALSBERG, C., WSCC Issues Preliminary Rep. on August Power Outage: September-1996. PRESS RELEASE. Tech. Rep., WSCC. [Online] <http://www.wsc.com/augdist.htm>
- [47] KIM, T., ABED, E.H., Closed-loop monitoring systems for detecting impending instability, *IEEE Trans. Circuits Syst.* Oct-2000, 47:1479–1493,
- [48] CIGRE TF 38.05.040, Analysis and Optimization of SVC Use in Transmission Systems, CIGRE Brochure No. 77, 1993.
- [49] IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE WORKING GROUP K12, System Protection and Voltage Stability, IEEE publication No. 93, THO 596-7 PWR.
- [50] IEEE WORKING GROUP ON VOLTAGE STABILITY, Suggested Techniques for Voltage Stability Analysis, 1993.
- [51] CIGRE TASK FORCE 38.02.10, Modeling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena, Summary in *Electra*, No.147, April 1993.
- [52] NERC INTERCONNECTION DYNAMICS TASK FORCE, Survey of the Voltage Collapse Phenomena, 1991, North American Reliability Council, 1991.
- [53] HOWARD UNIVERSITY, “A Knowledge-Based Support System for Voltage Collapse Detection and Prevention”, EPRI Final Report EL-7168, Research Project RP2473- 36, February 1991.

- [54] IEEE WORKING GROUP ON VOLTAGE STABILITY, Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience, 1990.
- [55] CIGRE REPORT, PLANNING AGAINST VOLTAGE COLLAPSE, Electra No. 111. pp. 55-75, March 1987.
- [56] DREXEL UNIVERSITY, "Performance Indexes for Predicting Voltage Collapse", Final Reprot EPRI EL-6461, Research Project RP1999-10, July 1989.
- [57] EPRI/NERC, FORUM ON VOLTAGE STABILITY, Sept. 14-15 1992. Breckenridge, CO. U.S.A.
- [58] R. J. O'KEEFE, R. P. SCHULZ, AND N. B. BHAT, "Improved representation of generator and load dynamics in the study of voltage limited power system operations", IEEE PES Winter Power Meeting, 96 WM 282-4-P WRS .
- [59] X. SUN, G.P. LIU, W. WANG AND D. REES, Stability analysis for systems with large delay period: a switching method, Int. Journal of Innov. Comp., Inf. and Cont. (IJICIC), 2012, Vol.8(6), pp. 4235-4248
- [60] I.A. HISKENS, Analysis tools for power systems-contending with nonlinearities, Proc. IEEE, 1995, Vol.83, pp. 1573-1587
- [61] A. MEDINA, M.A. MARTINEZ, App. of bifurcation theory to assess nonlinear oscillations produced by AC electric arc furnaces, IEEE Trans. On Power Delivery, 2005, Vol.20 (2), pp. 801-806
- [62] Y. LI, H. WANG AND W. JIANG, Stability and Hopf Bifurcation Analysis in Coupled Limit Cycle Oscillators with Time Delay, Int. Journal of Innov. Comp., Inf. and Cont. (IJICIC), 2010, Vol6.(4), pp. 1823-1832
- [63] G. REVEL, D.M. ALANSO, J.L. MOILA, Bifurcation theory applied to the analysis of power systems, Revista De La Union Math. Argentina, 2008, Vol.49 (1), pp. 1-4
- [64] R. WANG, J. HUANG, Effects of hard limits on bifurcation, chaos and stability, Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2004, Vol. 20(3), pp. 441-456
- [65] GUOJIANG ZHANG, CHUNSONG HAN, YU GUAN AND LIGANG WU , Exponential Stability Analysis and Stabilization of Discrete-Time Nonlinear Switched Systems with Time Delays, Int. Journal of Innov. Comp., Inf. and Cont. (IJICIC), 2012, Vol.8(3), pp. 1973-1986

- [66] CHALERMCHAT MANOP, VIJIT KINNARES AND SUPHOT CHUNWIPHAT, SVM-Based Stator Fault Diagnosis for Induction Motors Using dq0 Voltage Components, *Int. Journal of Innov. Comp., Inf. And Cont. (IJICIC)*, 2010, Vol6.(10), pp. 4539-4554
- [67] W. MARSZALEK, Z. TRZASKA, Singular hopf bifurcations in DAE models of power systems, *Energy and Power Engineering*, 2011, Vol.3, pp. 1-8
- [68] Q. DU, Z. SU, S. LI, Some design and simulation of SMVSC for hopf bifurcation in power systems, *Energy and Power Engineering*, 2011, Vol.3, pp. 24-28
- [69] P. JAVANBAKHT, M. NOROOZIAN, M. ABEDI AND G.B. GHAREHPET, The Enhancement of Transient Stability of a Wind Farm in a Weak Network Using SVC and OLTC, *International Journal of Distributed Energy Resources*, 2010, Vol. 6(4), pp. 325-341
- [70] P.K. SATPATHY, D. DAS, P.B. DUTTA GUPTA, A Fuzzy approach to handle parameter uncertainties in Hopf bifurcation analysis of power systems *Int J Elect Power Energy Syst*, 26 (7) (2004), pp. 527–534
- [71] W. DU-QU, L. XIAO-SHU, Z. BO, Noise-induced voltage collapse in power systems, *China Physics Letters*, 2012, Vol.29(3), pp. 1-5
- [72] N. MITHULANANTHAN, C.A. CANIZARES, J. REEVE, J.R. GRAHAM, Comparison of PSS, SVC and STATCOM controllers for damping power system oscillations, *IEEE Trans Power Syst*, 2003, Vol.18 (2), pp. 786–790
- [73] MA, YOUJIE; WEN, HULONG; ZHOU, XUESONG; LI, JI; YANG, HAISHAN; ZHOU, XUANZHENG, Multi-Parameter Static Bifurcation Analysis of Wind Power System Based on Dynamic Model, *Advanced Science Letters*, 2011, Vol.4(4), pp. 1792-1795
- [74] A. YAZDANI, L. MARIESA, J. GUO: An Improved Nonlinear STATCOM Control for Electric Arc Furnace Voltage Flicker Mitigation, *IEEE Trans. On Power Delivery* 24, No. 4, 2009, 2284-2290
- [75] Y.F.-WANG, J.G. - JIANG, L.S.-GE, X.J.-YANG: Mitigation of electric arc furnace voltage flicker using static synchronous compensator, *Proc. IEEE Power Electronics and Motion Control Conf.*, No. 3, 2006, 1-5
- [76] W.D.-ROSEHART, C.A.-CAÑIZARES: Bifurcation analysis of various power system models, *Int. J. Elect. Power Energy Syst.* 21, No. 3, 1999, 171-182
- [77] C.-HAN, Z.-YANG, B.-CHEN, A.-HUANG, B.-ZHANG, M. - INGRAM, A.A.- EDRIS: Evaluation of cascade-multilevel-converter-based

- STATCOM for arc furnace flicker mitigation, IEEE Trans. Ind. Appl.43, No. 2, 2007, 378-385
- [78] H.-SAMET, M.E H.-GOLSHAN: Employing stochastic models for prediction of arc furnace reactive power to improve compensator performance, IET Gen. Transmission and Distribution 2, No. 4, 2008, 505-515
- [79] N.-MITHULANANTHAN, C.-CAÑIZARES, J.-REEVE, G. J.-ROGERS, Comparison on PSSS, SVC and STATCOM controllers for damping power systems oscillations, IEEE Trans. Power Syst. 18, No. 2, 2003, 786-792
- [80] A.-TESTA, Network impedance uncertainty in harmonic and interharmonic distortion studies, Journal of PowerTech-Budapest 99, No. 1, 1999, 227-240
- [81] E.O.-CARRILLO, B.- BANFAI, G.T. HEYDTH : EMTP Implementation and Analysis of Nonlinear Load Models, Electric Power Components and Systems 29, No. 1, 2001, 809-820
- [82] H.-YU-JEN, C.- KUAN-HUNG, H.-PO-YI : Electric Arc Furnace Voltage Flicker Analysis and Prediction, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement 60, No. 10, 2011, 3360-3368
- [83] A.- MEDINA and N.- GARCIA : Newtons methods for the fast computation of the periodics steady state solutions of systems with nonlinear and time-varying components, in Conf IEEE PES Summer Meeting 2, Edmonton-Canada, No. 2, 1999, 664–669
- [84] A.- MEDINA, M. A.- GÓMEZ-MARTÍNEZ, C.R.-FUERTE-ESQUIVEL : Application of Bifurcations Theory to Assess Nonlinear Oscillations Produced by AC Electric Arc Furnaces, IEEE Trans. On Power Delivery 20, No. 2, 2005, 801-807
- [85] A.E.-EMANUEL, J.A-ORR : An Improved Method of Simulation of the Voltage-Current Characteristic, 9th international Conference on Harmonics and Quality of Power, Proceedings, Orlando-Florida, 2000, 148-150
- [86] A.-LINDBLOM, J.-ISBERG, H.-BERNHOFF,M.-LEIJON : Inductive High Voltage Pulse Generator Based On Resonance System, Journal of ELECTRICAL ENGINEERING 58, No. 1, 2007, 19–25
- [87] E. -ACHA, A. -SEMLYN, N.- RAJAKOVÍCK : A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its applications to electric arcs, IEEE Trans. On Power Delivery 5, No.1, 1990, 1390–1397
- [88] J.D. –CRAWFORD : Introduction to bifurcation theory, Reviews of Modern Physics 63, No. 4, 1991, 991-992

- [89] H. S.-STROGATZ : Nonlinear Dynamics and Chaos, Cambridge-Perseus publishing, 2000.
- [90] S.-PANDA : Multi-Objective Non-Dominated Shorting Genetic Algorithm-II For Excitation And TCSC-Based Controller Design, Journal of ELECTRICAL ENGINEERING 60, No. 2, 2009, 86–93
- [91] A.-MEDINA, A.-RAMOZ-PAZ, C.R.-FUERTE-ESQUIVEL : Swift computation of the periodic steady state solution of power systems containing TCSCs, Electrical Power and Energy Systems 25, No.3 ,2003, 689–694
- [92] M.I.-ALOMOUSH : Multicriteria Selection of Optimal Location of TCSC in a Competitive Energy Market, Journal of ELECTRICAL ENGINEERING 61, No. 3, 2010, 129–140
- [93] ABACI K., YALÇIN M.A., UYAROĞLU Y., YILDIZ M. “The Observing Oscillations in Power Systems With Static Var Compensator”, 5th. International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2007, pp.183-187,Bursa

EKLER

EK A

A.1 3 Baralı Güç Sistemi Dinamik Modeli AUTO Uyumlu ODE Dosyası

```
***** Power System Model Bifurcation Analysis*****#  
*****Voltage Collapse.ode*****#  
*****FINAL PHD WORKS*****#  
*****Metin VARAN *****#
```

#PQ-IM Loads- Genarator-Transmission Diger Parametreleri

param Q1=10.80, K9=0.00, Qsvc=0.00, Kpw=0.40, Kpv=0.30, Kqw=-0.03, Kqv=-
2.80, Kqv2=2.10, P1=0

param T_e=8.50, P0=0.6, Q0=1.2, Y0=20, teta00=-8, teta0=-0.1471659574468085

param Vu0=2.5, Ym=5, tetam0=-8, tetam=-0.1471659574468085

param Vm=1.00, Pm=1, M=0.30, D=0.12, Yu0=8, tetau00=-12, tetau0=-
0.2037659574468085

#====Ara Denklemler=====

A=Yu0*sin(tetau0)+Ym*sin(tetam)

B=Yu0*cos(tetau0)+Ym*cos(tetam)

C=T_e*Kqw*Kpv

Pd=-Vu0*Y4*Yu0*sin(Y3+tetau0)-Vm*Y4*Ym*sin(Y3-Y1+tetam)+A*Y4^2

Qd=Vu0*Y4*Yu0*cos(Y3+tetau0)+Vm*Y4*Ym*cos(Y3-Y1+tetam)-B*Y4^2

#Initials-Güc Sisteminde Kullanilacak Baslangiç Sartlarimiz

#Y1=Generator Voltage Phase Angle

#Y2=Generator Rotor Speed

#Y3=Load Voltage Phase Angle

#Y4=Magnitude of Load Voltage

```

#Q1=Reactive Power Demand[Bifurcation Parameter Lamda=Q1
Y1(0)=0.40
Y2(0)=0.02
Y3(0)=0.10
Y4(0)=0.90
#=====
# 3-Bus Power System Dynamic Model For Bifurcation Analysis
Y1'=Y2
Y2'=(-D*Y2+Pm+Vm*Y4*Ym*sin(Y3-Y1-tetam)+Vm^2*Ym*sin(tetam))/M
Y3'=(-Kqv2*(Y4^2)-Kqv*Y4+Qd-Q0+Qsvc-Q1)/Kqw
Y4'=(((Kpw*Kqv2*(Y4^2)+(Kpw*Kqv-Kqw*Kpv)*Y4+Kqw*(Pd-P0-
P1)+Kpw*(Q0+Q1-Qsvc-Qd))/C)+K9*Y1^2*Y2
#=====

#Simulation Axes Conditions - TIME SERIES SIMULASYONLARI
#=====Y4-Gerilim Çökmesini Etkin Gösterir-TIME DOMAIN=====
#@total=1000,xlo=0,xhi=10,ylo=0.85,yhi=1.00,dt=0.005, xp=T, yp=Y4, lt=4,
rangestep=1
#@range=1 20 tane integrasyon ciktisini dat olarak kaydededer.
@ total=1000,maxstor=10000000, xlo=0,xhi=700,ylo=0.120,yhi=0.140, yp=Y4,
xp=T,lt=1 # to prevent "out of bounds" error
@ DT=2e-3, BOUNDS=1000
@ autoxmin=0,autoxmax=12, autoymin=0, autoymax=1.8, autovar=Y4
@ ntst=20, nmax=1000, npr=10, dsmin=1e-9,dsmx=0.5,
ds=0.3,parmin=0,parmax=12
@ epsl=1e-5, epsu=1e-5, epss=1e-5
done
#@ ntst=20, nmax=10000, npr=10, dsmin=1e-9,dsmx=50, ds=1e-
2,parmin=0,parmax=12
#@ epsl=1e-5, epsu=1e-5, epss=1e-5

```


A.2. Bol Harmonikli Ark Ocağı Modeli

```

#####ARC FURNACE MODEL.ode#####
#####FINAL WORK#####

#Furnace Parameters
param L=0.12, LH=0.1, R0=0.10, K4=1, T0=15,TS=30, C=0.05, VS=1 M=2 N=2
K1=0.08, K2=0.0791999, K3=3, a=0.004041, b=0.005671
#Güç Sisteminde Kullanilacak Baslangıç Sartlarımız
#Y1=IL=====
#Y2=VC=====
#Y3=IH=====
#Y4=R=====

#INITIAL CONDITIONS
Y2(0)=0.22
Y4(0)=0.55
# Arc Furnace Dynamic Equation From Acha and Martinez Model IEEE-2006
Y1'=(-R/L)*Y1-(1/L)*Y2+(1/L)*VS
Y2'=(1/C)*Y1-(1/C)*Y3
Y3'=(1/LH)*Y2-(((K3*Y4^(-M-2))*(1+a*(TS-T0)))/LH)*Y3
Y4'=(K3*(Y4^(-M-3))*Y3/K2)*Y3+((-K1*(Y4^(N-2))/K2))*Y4
#=====BIFURCATION PARAMETERS=====
#@total=1000,xlo=0,xhi=10,ylo=0.85,yhi=1.00,dt=0.005, xp=T, yp=y4, lt=4,
rangestep=1
#@range=1 20 tane integrasyon ciktisini dat olarak kaydededer.
@ total=1000,maxstor=10000000, xlo=0,xhi=500,ylo=-10,yhi=10, yp=Y1,
xp=T,lt=1 # to prevent "out of bounds" error
@ DT=0.005, BOUNDS=1000000
@ dsmin=0.00001, dsmax=0.05, parmin=-2, parmax=3
@ autoxmin=0,autoxmax=2, autoymin=-10, autoymax=10, autovar=Y1
@ ntst=20, nmax=1000, npr=10, dsmin=1e-9,dsmax=0.5, ds=1e-
2,parmin=0,parmax=2
@ epsl=1e-5, epsu=1e-5, epss=1e-5
done

```

EK B

B.1 3 Baralı Güç Sistemi Dinamik Modeli 1. Ve 2. Adım Çatallaşmaları

Parameters:

$$|Q1|=10.800000 \quad |K9|=0.000000 \quad |Qsvc|=0.000000 \quad |Kpw|=0.400000 \quad |Kpv|=0.300000 \quad |Kqw|=-0.030000 \\ |Kqv|=-2.800000 \quad |Kqv2|=2.100000 \quad |P1|=0.000000$$

Parameters:

$$|T_e|=8.500000 \quad |P0|=0.600000 \quad |Q0|=1.200000 \quad |Y0|=20.000000 \quad |teta00|=-8.000000 \quad |teta0|=-0.147166$$

Parameters:

$$|Vu0|=2.500000 \quad |Ym|=5.000000 \quad |tetam0|=-8.000000 \quad |tetam|=-0.147166$$

Parameters:

$$|Vm|=1.000000 \quad |Pm|=1.000000 \quad |M|=0.300000 \quad |D|=0.120000 \quad |Yu0|=8.000000 \quad |tetau00|=-12.000000 \\ |tetau0|=-0.203766$$

$$YU0 * \sin(TETAU0) + YM * \sin(TETAM)$$

$$YU0 * \cos(TETAU0) + YM * \cos(TETAM)$$

$$T_E * KQW * KPv$$

$$= -VU0 * Y4 * YU0 * \sin(Y3 + TETAU0) - VM * Y4 * YM * \sin(Y3 - Y1 + TETAM) + A * Y4^2$$

$$= VU0 * Y4 * YU0 * \cos(Y3 + TETAU0) + VM * Y4 * YM * \cos(Y3 - Y1 + TETAM) - B * Y4^2$$

$$YU0 * \sin(TETAU0) + YM * \sin(TETAM)$$

$$YU0 * \cos(TETAU0) + YM * \cos(TETAM)$$

$$T_E * KQW * KPv$$

$$= -VU0 * Y4 * YU0 * \sin(Y3 + TETAU0) - VM * Y4 * YM * \sin(Y3 - Y1 + TETAM) + A * Y4^2$$

$$= VU0 * Y4 * YU0 * \cos(Y3 + TETAU0) + VM * Y4 * YM * \cos(Y3 - Y1 + TETAM) - B * Y4^2$$

$$\text{initial } Y1(0) = 0.40$$

$$\text{initial } Y2(0) = 0.02$$

$$\text{initial } Y3(0) = 0.10$$

$$\text{initial } Y4(0) = 0.90$$

$$dY1/dt = Y2$$

$$dY2/dt = (-D * Y2 + PM + VM * Y4 * YM * \sin(Y3 - Y1 - TETAM) + VM^2 * YM * \sin(TETAM)) / M$$

$$dY3/dt = (-KQV2 * (Y4^2) - KQV * Y4 + QD - Q0 + Qsvc - Q1) / KQW$$

$$dY4/dt = (((Kpw * Kqv2 * (Y4^2) + (Kpw * Kqv - Kqw * Kpv) * Y4 + Kqw * (PDB - P0 - P1) + Kpw * (Q0 + Q1 - Qsvc - QD))) / C) + K9 * Y1^2 * Y2$$

All formulas are valid!!

$$nvar=4 \quad naux=0 \quad nfix=5 \quad nmark=0 \quad NEQ=4 \quad NODE=9$$

32 Adet Sabit ve 142 sembol tanımlı ifade girilmiştir!!

ELEKTRİK GÜC SİSTEMLERİ İÇİN DİNAMİK CATALLASMA VE KARARLILIK
ANALİZÖRÜ 6.11 Copyright (C) 20011-2012 Msc.Eng. Metin VARAN

BR	PT	TYPE	NO	Q1	L2-NORM	G-ANGLE	G-ANGUL-VEL	LD-ANG
LD-VOLT								
1	1	EP	1	1.080000E+01	1.175579E+00	3.076491E-01	-3.428927E-04	1.130784E-01
1.128961E+00								
1	5	SNB	2	1.145406E+01	9.908828E-01	3.391794E-01	0.000000E+00	1.340591E-01
9.213220E-01								
1	10		3	1.129363E+01	9.040313E-01	3.562256E-01	0.000000E+00	1.438033E-01
8.183498E-01								
1	20		4	9.909397E+00	7.389432E-01	3.976019E-01	0.000000E+00	1.616037E-01
6.015264E-01								
1	30		5	5.303792E+00	6.002146E-01	5.028316E-01	0.000000E+00	1.657780E-01
2.827289E-01								
1	40		6	3.630683E-01	1.025144E+00	1.022436E+00	0.000000E+00	-3.077513E-02
6.780168E-02								
1	41	EP	7	-3.285458E-02	1.322521E+00	1.316614E+00	0.000000E+00	-1.117554E-01
5.568333E-02								

BR	PT	TYPE	NO	Q1	L2-NORM	G-ANGLE	G-ANGUL-VEL	LD-ANG
LD-VOLT								
1	3	SNB	8	1.145406E+01	9.908901E-01	3.391780E-01	0.000000E+00	1.340583E-01
9.213304E-01								
1	4	HB	9	1.132003E+01	1.073236E+00	3.244726E-01	0.000000E+00	1.247260E-01
1.015379E+00								
1	10		10	1.071176E+01	1.187942E+00	3.055235E-01	0.000000E+00	1.116335E-01
1.142541E+00								
1	20		11	6.803030E+00	1.498770E+00	2.592041E-01	0.000000E+00	7.583202E-02
1.474237E+00								
1	30		12	1.809155E+00	1.732290E+00	2.269705E-01	0.000000E+00	4.871329E-02
1.716665E+00								
1	34	EP	13	-1.892686E-01	1.808352E+00	2.167457E-01	0.000000E+00	3.984360E-02
1.794873E+00								

**B.2 3 Baralı Güç Sistemi Dinamik Modeli 3. Ve 4. Adım Çatallaşmaları
(Sırasıyla 440 ve 1000 Adet Nokta İçin)**

BR	PT	TYPE	NO	Q1	L2-NORM	G-ANGLE	G-ANGUL-VEL	LD-ANG
2	95	SNB	23	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	3.442860E-26	1.340583E-01
9.213304E-01	4.693429E+01							
2	100		24	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	-1.043615E-24	1.340583E-01
9.213304E-01	4.943429E+01							
2	103	SNB	25	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	5.405862E-26	1.340583E-01
9.213304E-01	5.076870E+01							
2	110		26	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	-2.827307E-25	1.340583E-01
9.213304E-01	5.426870E+01							
2	120		27	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	-8.378188E-26	1.340583E-01
9.213304E-01	5.926870E+01							
2	130		28	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	1.417901E-25	1.340583E-01
9.213304E-01	6.426870E+01							
2	140		29	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	-5.271038E-25	1.340583E-01
9.213304E-01	6.926870E+01							
2	141	SNB	30	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	-1.106666E-25	1.340583E-01
9.213304E-01	6.946955E+01							
2	150		31	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	4.040248E-26	1.340583E-01
9.213304E-01	7.396955E+01							
2	160		32	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	6.681158E-27	1.340583E-01
9.213304E-01	7.896955E+01							
2	170		33	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	1.081107E-25	1.340583E-01
9.213304E-01	8.396955E+01							
2	175	SNB	34	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	-7.410778E-27	1.340583E-01
9.213304E-01	8.608746E+01							
2	180		35	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	3.073714E-25	1.340583E-01
9.213304E-01	8.858746E+01							
2	185	SNB	36	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	8.196829E-27	1.340583E-01
9.213304E-01	9.075474E+01							
2	190		37	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	-1.601906E-25	1.340583E-01
9.213304E-01	9.325474E+01							
2	200		38	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	-3.163138E-25	1.340583E-01
9.213304E-01	9.825474E+01							
2	210		39	1.145406E+01	9.908900E-01	3.391780E-01	1.971650E-26	1.340583E-01
9.213304E-01	1.032547E+02							

2 220 40 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -5.736547E-26 1.340583E-01
9.213304E-01 1.082547E+02

2 222 **SNB** 41 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -1.022877E-27 1.340583E-01
9.213304E-01 1.088779E+02

2 230 42 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -4.737061E-26 1.340583E-01
9.213304E-01 1.128779E+02

2 439 **SNB** 63 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -1.202612E-26 1.340583E-01
9.213304E-01 2.169538E+02

2 440 64 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 1.348479E-26 1.340583E-01
9.213304E-01 2.174538E+02

2 515 **SNB** 72 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -1.479617E-26 1.340583E-01
9.213304E-01 2.547541E+02

2 520 73 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 1.168172E-26 1.340583E-01
9.213304E-01 2.572541E+02

2 530 74 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -6.417854E-27 1.340583E-01
9.213304E-01 2.622541E+02

2 540 75 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 5.261837E-27 1.340583E-01
9.213304E-01 2.672541E+02

2 550 76 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 5.461981E-26 1.340583E-01
9.213304E-01 2.722541E+02

2 557 **SNB** 77 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -2.996532E-27 1.340583E-01
9.213304E-01 2.755502E+02

2 560 78 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -1.360800E-26 1.340583E-01
9.213304E-01 2.770502E+02

2 610 83 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 9.211507E-27 1.340583E-01
9.213304E-01 3.020502E+02

2 616 **SNB** 84 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -9.059133E-27 1.340583E-01
9.213304E-01 3.046504E+02

2 620 85 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 1.715675E-26 1.340583E-01
9.213304E-01 3.066504E+02

2 622 **SNB** 86 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -8.000555E-27 1.340583E-01
9.213304E-01 3.073172E+02

2 630 87 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -1.257161E-26 1.340583E-01
9.213304E-01 3.113172E+02

2 640 88 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -1.642672E-27 1.340583E-01
9.213304E-01 3.163172E+02

2 650 89 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 1.097709E-26 1.340583E-01
9.213304E-01 3.213172E+02

2 656 **SNB** 90 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -7.349015E-26 1.340583E-01
9.213304E-01 3.239841E+02

2 709841E+02
 2 760 101 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -4.869679E-26 1.340583E-01
 9.213304E-01 3.759841E+02
 2 767 **SNB** 102 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -4.475988E-28 1.340583E-01
 9.213304E-01 3.792342E+02
 2 770 103 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -7.502509E-27 1.340583E-01
 9.213304E-01 3.807342E+02
 2 874 **SNB** 114 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -3.534958E-27 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.326010E+02
 2 880 115 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -6.511102E-26 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.356010E+02
 2 890 116 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -4.464107E-26 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.406010E+02
 2 900 117 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 4.399922E-26 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.456010E+02
 2 910 **SNB** 118 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -1.623097E-27 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.503512E+02
 2 920 119 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -1.534327E-27 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.553512E+02
 2 974 **SNB** 125 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -2.680794E-27 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.820179E+02
 2 978 **SNB** 126 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -2.273890E-26 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.837681E+02
 2 980 127 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 2.409724E-26 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.847681E+02
 2 982 **SNB** 128 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -1.221992E-26 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.854349E+02
 2 985 **SNB** 129 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 6.003290E-27 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.864643E+02
 2 990 130 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 9.027326E-27 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.889643E+02
 2 1000 EP 131 1.145406E+01 9.908900E-01 3.391780E-01 -1.409520E-27 1.340583E-01
 9.213304E-01 4.939643E+02

BR PT TYPE NO Q1 L2-NORM MAX G-ANGLE MAX G-ANGUL-VEL
MAX LD-ANG MAX LD-VOLT PERIOD

9 5 **SNB** 130 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203611E-01 6.728899E-01 1.940392E-01
 1.064867E+00 1.858209E+00

9 10 131 1.127880E+01 1.159613E+00 5.211456E-01 6.707176E-01 1.971237E-01
 1.062658E+00 1.890079E+00
 9 17 **PDB** 132 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908007E-01 5.497914E-01 1.893158E-01
 1.047548E+00 1.954943E+00
 9 20 133 1.139443E+01 1.044663E+00 4.286040E-01 3.143923E-01 1.688639E-01
 1.013384E+00 2.054123E+00
 9 21 **PDB** 134 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126164E-01 2.557152E-01 1.632012E-01
 1.003006E+00 2.081499E+00
 9 30 135 1.127034E+01 1.169702E+00 5.217686E-01 6.773585E-01 1.949975E-01
 1.064898E+00 1.862784E+00
 9 31 **SNB** 136 1.127014E+01 1.169783E+00 5.202642E-01 6.731141E-01 1.940143E-01
 1.064857E+00 1.858227E+00
 9 40 137 1.129593E+01 1.123154E+00 4.566542E-01 4.581117E-01 1.664721E-01
 1.052131E+00 1.812738E+00
 9 50 138 1.127018E+01 1.169615E+00 5.195647E-01 6.704835E-01 1.935275E-01
 1.064822E+00 1.856122E+00
 9 51 **SNB** 139 1.127014E+01 1.169783E+00 5.203778E-01 6.729487E-01 1.940420E-01
 1.064879E+00 1.858220E+00
 9 60 **PDB** 140 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908292E-01 5.492145E-01 1.893073E-01
 1.047540E+00 1.954943E+00
 9 63 **PDB** 141 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126038E-01 2.558007E-01 1.631992E-01
 1.003008E+00 2.081500E+00
 9 70 142 1.127046E+01 1.169591E+00 5.218949E-01 6.778512E-01 1.951410E-01
 1.064862E+00 1.863934E+00
 9 73 **SNB** 143 1.127014E+01 1.169782E+00 5.202514E-01 6.732576E-01 1.940099E-01
 1.064867E+00 1.858212E+00
 9 80 144 1.128605E+01 1.141715E+00 4.812930E-01 5.422412E-01 1.758965E-01
 1.057661E+00 1.821930E+00
 9 90 145 1.127091E+01 1.168218E+00 5.162717E-01 6.605860E-01 1.916421E-01
 1.064436E+00 1.849708E+00
 9 92 **SNB** 146 1.127014E+01 1.169782E+00 5.204004E-01 6.735494E-01 1.940314E-01
 1.064868E+00 1.858218E+00
 9 100 147 1.129295E+01 1.143008E+00 5.130444E-01 6.369818E-01 1.956117E-01
 1.058352E+00 1.913704E+00
 9 104 **PDB** 148 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908335E-01 5.497034E-01 1.893378E-01
 1.047531E+00 1.954943E+00
 9 108 **PDB** 149 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126151E-01 2.558051E-01 1.632010E-01
 1.003029E+00 2.081500E+00
 9 110 150 1.144800E+01 1.008194E+00 3.359910E-01 2.799486E-06 1.321038E-01
 9.413369E-01 2.189017E+00

9 119 **SNB** 151 1.127014E+01 1.169781E+00 5.203963E-01 6.735170E-01 1.940082E-01
 1.064876E+00 1.858197E+00
 9 120 152 1.127091E+01 1.168217E+00 5.163327E-01 6.605602E-01 1.915864E-01
 1.064438E+00 1.849706E+00
 9 130 153 1.131494E+01 1.084330E+00 3.856181E-01 2.129581E-01 1.425291E-01
 1.034038E+00 1.799313E+00
 9 139 **SNB** 154 1.127014E+01 1.169782E+00 5.202881E-01 6.734346E-01 1.940315E-01
 1.064869E+00 1.858216E+00
 9 140 155 1.127051E+01 1.169546E+00 5.220195E-01 6.784290E-01 1.952444E-01
 1.064870E+00 1.864323E+00
 9 150 156 1.132345E+01 1.109841E+00 4.913748E-01 5.517433E-01 1.894965E-01
 1.047831E+00 1.953988E+00
 9 151 **PDB** 157 1.132420E+01 1.109069E+00 4.908122E-01 5.497358E-01 1.893160E-01
 1.047547E+00 1.954930E+00
 9 154 **PDB** 158 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126216E-01 2.557251E-01 1.632001E-01
 1.003006E+00 2.081500E+00
 9 160 159 1.127240E+01 1.167351E+00 5.231074E-01 6.797197E-01 1.964793E-01
 1.064422E+00 1.873764E+00
 9 163 **SNB** 160 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203837E-01 6.735414E-01 1.940036E-01
 1.064874E+00 1.858210E+00
 9 170 161 1.128477E+01 1.144039E+00 4.841955E-01 5.525474E-01 1.771224E-01
 1.058285E+00 1.823327E+00
 9 180 162 1.130060E+01 1.113990E+00 4.433566E-01 4.123828E-01 1.616441E-01
 1.048982E+00 1.809056E+00
 9 184 **SNB** 163 1.127014E+01 1.169782E+00 5.202957E-01 6.731014E-01 1.940343E-01
 1.064870E+00 1.858211E+00
 9 190 164 1.128245E+01 1.155249E+00 5.194064E-01 6.628035E-01 1.969295E-01
 1.061581E+00 1.896989E+00
 9 196 **PDB** 165 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908088E-01 5.497973E-01 1.893101E-01
 1.047547E+00 1.954943E+00
 9 200 **PDB** 166 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126218E-01 2.556743E-01 1.631995E-01
 1.003000E+00 2.081500E+00
 9 204 **PDB** 167 1.140903E+01 1.033466E+00 4.125740E-01 2.557677E-01 1.631920E-01
 1.003038E+00 2.081500E+00
 9 206 **PDB** 168 1.132421E+01 1.109057E+00 4.907888E-01 5.498563E-01 1.893480E-01
 1.047536E+00 1.954944E+00
 9 210 **SNB** 169 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203978E-01 6.730728E-01 1.940380E-01
 1.064863E+00 1.858199E+00
 9 220 170 1.130604E+01 1.103028E+00 4.255463E-01 3.511121E-01 1.554656E-01
 1.044599E+00 1.805133E+00

9 230 171 1.131063E+01 1.093503E+00 4.074679E-01 2.884571E-01 1.494490E-01
1.039961E+00 1.802051E+00

9 234 **SNB** 172 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203855E-01 6.730811E-01 1.940212E-01
1.064860E+00 1.858200E+00

9 240 173 1.128218E+01 1.155562E+00 5.194528E-01 6.635160E-01 1.969364E-01
1.061662E+00 1.896518E+00

9 246 **PDB** 174 1.132421E+01 1.109058E+00 4.907648E-01 5.498061E-01 1.893308E-01
1.047548E+00 1.954943E+00

9 250 **PDB** 175 1.140903E+01 1.033465E+00 4.125576E-01 2.555657E-01 1.631874E-01
1.003011E+00 2.081501E+00

9 256 **PDB** 176 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908196E-01 5.497819E-01 1.892984E-01
1.047548E+00 1.954942E+00

9 260 177 1.127283E+01 1.166837E+00 5.230018E-01 6.800001E-01 1.966244E-01
1.064317E+00 1.875235E+00

9 262 **SNB** 178 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203875E-01 6.733140E-01 1.940421E-01
1.064880E+00 1.858217E+00

9 270 179 1.129515E+01 1.124661E+00 4.588246E-01 4.655456E-01 1.672246E-01
1.052619E+00 1.813386E+00

9 280 180 1.127017E+01 1.169640E+00 5.195883E-01 6.706278E-01 1.935863E-01
1.064828E+00 1.856352E+00

9 281 **SNB** 181 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203074E-01 6.728494E-01 1.940350E-01
1.064876E+00 1.858213E+00

9 290 182 1.130476E+01 1.129768E+00 5.050855E-01 6.056972E-01 1.935049E-01
1.054485E+00 1.930020E+00

9 292 **PDB** 183 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908261E-01 5.499261E-01 1.893423E-01
1.047509E+00 1.954943E+00

9 296 **PDB** 184 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126049E-01 2.555860E-01 1.631993E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 300 185 1.138342E+01 1.053650E+00 4.397194E-01 3.555213E-01 1.726788E-01
1.020134E+00 2.035830E+00

9 302 **PDB** 186 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908379E-01 5.494933E-01 1.893328E-01
1.047542E+00 1.954942E+00

9 308 **SNB** 187 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203193E-01 6.735484E-01 1.940083E-01
1.064877E+00 1.858217E+00

9 310 188 1.127222E+01 1.165942E+00 5.125524E-01 6.481235E-01 1.896467E-01
1.063859E+00 1.844414E+00

9 320 189 1.131848E+01 1.076646E+00 3.582426E-01 1.178350E-01 1.343026E-01
1.026100E+00 1.797166E+00

9 327 **SNB** 190 1.127014E+01 1.169782E+00 5.202990E-01 6.732643E-01 1.940342E-01
1.064880E+00 1.858213E+00

9 330 191 1.127605E+01 1.162936E+00 5.223722E-01 6.756735E-01 1.970550E-01
1.063428E+00 1.884079E+00

9 338 **PDB** 192 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908381E-01 5.499127E-01 1.893302E-01
1.047520E+00 1.954943E+00

9 340 193 1.136610E+01 1.068653E+00 4.559184E-01 4.165742E-01 1.781798E-01
1.029439E+00 2.009918E+00

9 342 **PDB** 194 1.140903E+01 1.033466E+00 4.125619E-01 2.555064E-01 1.631887E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 348 **PDB** 195 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908208E-01 5.499618E-01 1.893445E-01
1.047544E+00 1.954942E+00

9 350 196 1.128376E+01 1.153689E+00 5.186331E-01 6.591050E-01 1.968167E-01
1.061196E+00 1.899289E+00

9 354 **SNB** 197 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203426E-01 6.735482E-01 1.939939E-01
1.064875E+00 1.858217E+00

9 360 198 1.128376E+01 1.145850E+00 4.864729E-01 5.601266E-01 1.780289E-01
1.058776E+00 1.824471E+00

9 370 199 1.127789E+01 1.156226E+00 4.995334E-01 6.045314E-01 1.835442E-01
1.061455E+00 1.832344E+00

9 373 **SNB** 200 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203902E-01 6.730709E-01 1.940420E-01
1.064869E+00 1.858213E+00

9 380 201 1.129003E+01 1.146366E+00 5.149736E-01 6.446230E-01 1.960638E-01
1.059273E+00 1.909359E+00

9 384 **PDB** 202 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908355E-01 5.499067E-01 1.893169E-01
1.047519E+00 1.954943E+00

9 388 **PDB** 203 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126168E-01 2.556154E-01 1.632009E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 390 204 1.144800E+01 1.008194E+00 3.359917E-01 4.682159E-06 1.321041E-01
9.413374E-01 2.189017E+00

9 394 **PDB** 205 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908129E-01 5.498145E-01 1.893042E-01
1.047548E+00 1.954942E+00

9 400 **SNB** 206 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203944E-01 6.733342E-01 1.940427E-01
1.064880E+00 1.858217E+00

9 410 207 1.130734E+01 1.100353E+00 4.207771E-01 3.346142E-01 1.538634E-01
1.043404E+00 1.804240E+00

9 419 **SNB** 208 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203015E-01 6.728004E-01 1.940344E-01
1.064875E+00 1.858214E+00

9 420 209 1.127052E+01 1.169526E+00 5.220653E-01 6.779491E-01 1.952771E-01
1.064868E+00 1.864484E+00

9 430 **PDB** 210 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908279E-01 5.499170E-01 1.893415E-01
1.047513E+00 1.954943E+00

9 434 **PDB** 211 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126049E-01 2.555981E-01 1.631993E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 440 **PDB** 212 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908383E-01 5.494657E-01 1.893319E-01
1.047541E+00 1.954942E+00

9 446 **SNB** 213 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203235E-01 6.735490E-01 1.940062E-01
1.064877E+00 1.858217E+00

9 450 214 1.127605E+01 1.159411E+00 5.035656E-01 6.179826E-01 1.854168E-01
1.062240E+00 1.835472E+00

9 460 215 1.131286E+01 1.088782E+00 3.970005E-01 2.522762E-01 1.460913E-01
1.037166E+00 1.800617E+00

9 465 **SNB** 216 1.127014E+01 1.169782E+00 5.202971E-01 6.732741E-01 1.940338E-01
1.064880E+00 1.858213E+00

9 470 217 1.128087E+01 1.157131E+00 5.202276E-01 6.662687E-01 1.969794E-01
1.062047E+00 1.894108E+00

9 476 **PDB** 218 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908382E-01 5.499095E-01 1.893297E-01
1.047519E+00 1.954943E+00

9 480 **PDB** 219 1.140903E+01 1.033466E+00 4.125635E-01 2.555126E-01 1.631891E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 486 **PDB** 220 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908247E-01 5.499615E-01 1.893432E-01
1.047543E+00 1.954942E+00

9 490 221 1.127283E+01 1.166837E+00 5.229706E-01 6.801020E-01 1.966208E-01
1.064314E+00 1.875235E+00

9 492 **SNB** 222 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203535E-01 6.735457E-01 1.939860E-01
1.064873E+00 1.858217E+00

9 500 223 1.129515E+01 1.124661E+00 4.588232E-01 4.655232E-01 1.672170E-01
1.052616E+00 1.813386E+00

9 510 224 1.127017E+01 1.169635E+00 5.195898E-01 6.712060E-01 1.935686E-01
1.064829E+00 1.856298E+00

9 511 **SNB** 225 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203871E-01 6.730320E-01 1.940421E-01
1.064868E+00 1.858213E+00

9 520 226 1.130476E+01 1.129768E+00 5.051249E-01 6.056975E-01 1.935183E-01
1.054485E+00 1.930020E+00

9 522 **PDB** 227 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908353E-01 5.498974E-01 1.893165E-01
1.047515E+00 1.954943E+00

9 526 **PDB** 228 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126193E-01 2.556428E-01 1.632008E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 530 229 1.138343E+01 1.053644E+00 4.396449E-01 3.556279E-01 1.726981E-01
1.020117E+00 2.035841E+00

9 532 **PDB** 230 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908073E-01 5.498359E-01 1.893083E-01
1.047548E+00 1.954942E+00

9 538 **SNB** 231 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203973E-01 6.733580E-01 1.940429E-01
1.064880E+00 1.858217E+00

9 540 232 1.127222E+01 1.165942E+00 5.125377E-01 6.479362E-01 1.896730E-01
1.063870E+00 1.844414E+00

9 550 233 1.131848E+01 1.076646E+00 3.582539E-01 1.178252E-01 1.342983E-01
1.026102E+00 1.797166E+00

9 557 **SNB** 234 1.127014E+01 1.169782E+00 5.202933E-01 6.727815E-01 1.940324E-01
1.064875E+00 1.858214E+00

9 560 235 1.127605E+01 1.162936E+00 5.223782E-01 6.756418E-01 1.970458E-01
1.063431E+00 1.884079E+00

9 568 **PDB** 236 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908263E-01 5.499124E-01 1.893422E-01
1.047511E+00 1.954943E+00

9 570 237 1.136610E+01 1.068653E+00 4.559198E-01 4.166164E-01 1.781798E-01
1.029439E+00 2.009918E+00

9 572 **PDB** 238 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126062E-01 2.556091E-01 1.631996E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 578 **PDB** 239 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908387E-01 5.494452E-01 1.893303E-01
1.047540E+00 1.954942E+00

9 580 240 1.128376E+01 1.153690E+00 5.186794E-01 6.591564E-01 1.967734E-01
1.061195E+00 1.899289E+00

9 584 **SNB** 241 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203342E-01 6.735460E-01 1.940003E-01
1.064876E+00 1.858217E+00

9 590 242 1.128376E+01 1.145850E+00 4.864345E-01 5.602352E-01 1.780401E-01
1.058767E+00 1.824471E+00

9 600 243 1.127790E+01 1.156215E+00 4.995296E-01 6.041474E-01 1.835764E-01
1.061440E+00 1.832334E+00

9 603 **SNB** 244 1.127014E+01 1.169782E+00 5.202782E-01 6.733021E-01 1.940299E-01
1.064880E+00 1.858214E+00

9 610 245 1.129003E+01 1.146365E+00 5.149516E-01 6.446436E-01 1.960512E-01
1.059276E+00 1.909359E+00

9 614 **PDB** 246 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908384E-01 5.498975E-01 1.893277E-01
1.047515E+00 1.954943E+00

9 618 **PDB** 247 1.140903E+01 1.033466E+00 4.125694E-01 2.555337E-01 1.631907E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 620 248 1.144800E+01 1.008194E+00 3.359916E-01 4.337817E-06 1.321040E-01
9.413373E-01 2.189017E+00

9 624 **PDB** 249 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908261E-01 5.499611E-01 1.893427E-01
1.047543E+00 1.954942E+00

9 630 **SNB** 250 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203579E-01 6.735441E-01 1.939823E-01
1.064873E+00 1.858217E+00

9 640 251 1.130734E+01 1.100353E+00 4.207826E-01 3.346598E-01 1.538500E-01
1.043403E+00 1.804240E+00

9 649 **SNB** 252 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203857E-01 6.730143E-01 1.940422E-01
1.064867E+00 1.858213E+00

9 650 253 1.127052E+01 1.169526E+00 5.221332E-01 6.781475E-01 1.952966E-01
1.064858E+00 1.864484E+00

9 660 **PDB** 254 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908355E-01 5.498940E-01 1.893170E-01
1.047514E+00 1.954943E+00

9 664 **PDB** 255 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126202E-01 2.556542E-01 1.632006E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 670 **PDB** 256 1.132421E+01 1.109059E+00 4.907980E-01 5.498660E-01 1.893141E-01
1.047547E+00 1.954942E+00

9 676 **SNB** 257 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203997E-01 6.733244E-01 1.940426E-01
1.064880E+00 1.858217E+00

9 680 258 1.127605E+01 1.159411E+00 5.035871E-01 6.180466E-01 1.854230E-01
1.062233E+00 1.835472E+00

9 690 259 1.131287E+01 1.088771E+00 3.969580E-01 2.523185E-01 1.460987E-01
1.037158E+00 1.800613E+00

9 695 **SNB** 260 1.127014E+01 1.169782E+00 5.202877E-01 6.728342E-01 1.940319E-01
1.064874E+00 1.858214E+00

9 700 261 1.128087E+01 1.157131E+00 5.202501E-01 6.661988E-01 1.970109E-01
1.062049E+00 1.894109E+00

9 706 **PDB** 262 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908275E-01 5.499011E-01 1.893417E-01
1.047510E+00 1.954943E+00

9 710 **PDB** 263 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126079E-01 2.556248E-01 1.631999E-01
1.003037E+00 2.081501E+00

9 716 **PDB** 264 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908390E-01 5.494172E-01 1.893282E-01
1.047539E+00 1.954942E+00

9 720 265 1.127283E+01 1.166837E+00 5.231124E-01 6.796116E-01 1.966124E-01
1.064330E+00 1.875235E+00

9 722 **SNB** 266 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203367E-01 6.735452E-01 1.939997E-01
1.064873E+00 1.858217E+00

9 730 267 1.129515E+01 1.124661E+00 4.588317E-01 4.651737E-01 1.672551E-01
1.052631E+00 1.813386E+00

9 740 268 1.127017E+01 1.169632E+00 5.195612E-01 6.710720E-01 1.935587E-01
1.064828E+00 1.856277E+00

9 741 **SNB** 269 1.127014E+01 1.169782E+00 5.202915E-01 6.733349E-01 1.940243E-01
1.064879E+00 1.858213E+00

9 750 270 1.130476E+01 1.129768E+00 5.050675E-01 6.056077E-01 1.935389E-01
1.054487E+00 1.930021E+00

9 752 **PDB** 271 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908381E-01 5.498804E-01 1.893242E-01
1.047509E+00 1.954943E+00

9 756 **PDB** 272 1.140903E+01 1.033466E+00 4.125776E-01 2.555599E-01 1.631929E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 760 273 1.138343E+01 1.053644E+00 4.396488E-01 3.555819E-01 1.726983E-01
1.020104E+00 2.035842E+00

9 762 **PDB** 274 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908286E-01 5.499598E-01 1.893416E-01
1.047543E+00 1.954942E+00

9 768 **SNB** 275 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203659E-01 6.735405E-01 1.939754E-01
1.064872E+00 1.858217E+00

9 770 276 1.127222E+01 1.165942E+00 5.125407E-01 6.480717E-01 1.896593E-01
1.063868E+00 1.844414E+00

9 780 277 1.131848E+01 1.076646E+00 3.582524E-01 1.178160E-01 1.343011E-01
1.026102E+00 1.797166E+00

9 787 **SNB** 278 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203828E-01 6.729803E-01 1.940422E-01
1.064866E+00 1.858214E+00

9 790 279 1.127605E+01 1.162936E+00 5.223642E-01 6.755979E-01 1.970558E-01
1.063434E+00 1.884080E+00

9 798 **PDB** 280 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908316E-01 5.498755E-01 1.893105E-01
1.047510E+00 1.954943E+00

9 800 281 1.136610E+01 1.068653E+00 4.559293E-01 4.165669E-01 1.781793E-01
1.029439E+00 2.009918E+00

9 802 **PDB** 282 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126208E-01 2.556722E-01 1.632003E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 808 **PDB** 283 1.132421E+01 1.109059E+00 4.907923E-01 5.498804E-01 1.893171E-01
1.047547E+00 1.954942E+00

9 810 284 1.128376E+01 1.153689E+00 5.186402E-01 6.598759E-01 1.967661E-01
1.061171E+00 1.899289E+00

9 814 **SNB** 285 1.127014E+01 1.169782E+00 5.204001E-01 6.733083E-01 1.940423E-01
1.064880E+00 1.858217E+00

9 820 286 1.128376E+01 1.145850E+00 4.865219E-01 5.601723E-01 1.780552E-01
1.058762E+00 1.824471E+00

9 830 287 1.127789E+01 1.156220E+00 4.995068E-01 6.042438E-01 1.835863E-01
1.061455E+00 1.832339E+00

9 833 **SNB** 288 1.127014E+01 1.169782E+00 5.202823E-01 6.728589E-01 1.940305E-01
1.064873E+00 1.858213E+00

9 840 289 1.129003E+01 1.146366E+00 5.149751E-01 6.445707E-01 1.960648E-01
1.059275E+00 1.909359E+00

9 844 **PDB** 290 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908283E-01 5.498944E-01 1.893413E-01
1.047509E+00 1.954943E+00

9 848 **PDB** 291 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126089E-01 2.556332E-01 1.632001E-01
1.003037E+00 2.081501E+00

9 850 292 1.144800E+01 1.008194E+00 3.359918E-01 4.907624E-06 1.321041E-01
9.413375E-01 2.189017E+00

9 854 **PDB** 293 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908390E-01 5.494085E-01 1.893275E-01
1.047538E+00 1.954942E+00

9 860 **SNB** 294 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203355E-01 6.735470E-01 1.940008E-01
1.064872E+00 1.858217E+00

9 870 295 1.130734E+01 1.100353E+00 4.207822E-01 3.346088E-01 1.538428E-01
1.043408E+00 1.804240E+00

9 879 **SNB** 296 1.127014E+01 1.169782E+00 5.202961E-01 6.733456E-01 1.940231E-01
1.064879E+00 1.858214E+00

9 880 297 1.127052E+01 1.169526E+00 5.221357E-01 6.780938E-01 1.952960E-01
1.064856E+00 1.864485E+00

9 890 **PDB** 298 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908377E-01 5.498732E-01 1.893226E-01
1.047506E+00 1.954943E+00

9 894 **PDB** 299 1.140903E+01 1.033466E+00 4.125812E-01 2.555702E-01 1.631939E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 900 **PDB** 300 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908295E-01 5.499591E-01 1.893411E-01
1.047542E+00 1.954942E+00

9 906 **SNB** 301 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203688E-01 6.735389E-01 1.939781E-01
1.064871E+00 1.858217E+00

9 910 302 1.127605E+01 1.159411E+00 5.035727E-01 6.181692E-01 1.854227E-01
1.062243E+00 1.835472E+00

9 920 303 1.131287E+01 1.088776E+00 3.969713E-01 2.523667E-01 1.460935E-01
1.037151E+00 1.800615E+00

9 925 **SNB** 304 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203818E-01 6.729671E-01 1.940422E-01
1.064865E+00 1.858214E+00

9 930 305 1.128087E+01 1.157131E+00 5.202093E-01 6.661872E-01 1.969844E-01
1.062050E+00 1.894108E+00

9 936 **PDB** 306 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908299E-01 5.498684E-01 1.893082E-01
1.047508E+00 1.954943E+00

9 940 **PDB** 307 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126207E-01 2.556766E-01 1.632003E-01
1.003038E+00 2.081501E+00

9 946 **PDB** 308 1.132421E+01 1.109059E+00 4.907890E-01 5.498890E-01 1.893187E-01
1.047547E+00 1.954942E+00

9 950 309 1.127283E+01 1.166837E+00 5.230626E-01 6.801096E-01 1.966339E-01
1.064311E+00 1.875235E+00

9 952 **SNB** 310 1.127014E+01 1.169782E+00 5.204018E-01 6.733596E-01 1.940423E-01
1.064880E+00 1.858217E+00

9 960 311 1.129515E+01 1.124661E+00 4.588332E-01 4.655762E-01 1.672419E-01
1.052612E+00 1.813386E+00

9 970 312 1.127018E+01 1.169627E+00 5.195167E-01 6.705650E-01 1.935502E-01
1.064820E+00 1.856225E+00

9 971 **SNB** 313 1.127014E+01 1.169782E+00 5.202797E-01 6.728737E-01 1.940298E-01
1.064873E+00 1.858214E+00

9 980 314 1.130476E+01 1.129767E+00 5.050692E-01 6.056471E-01 1.935119E-01
1.054483E+00 1.930021E+00

9 982 **PDB** 315 1.132421E+01 1.109058E+00 4.908288E-01 5.498905E-01 1.893410E-01
1.047509E+00 1.954943E+00

9 986 **PDB** 316 1.140903E+01 1.033466E+00 4.126095E-01 2.556379E-01 1.632002E-01
1.003036E+00 2.081501E+00

9 990 317 1.138342E+01 1.053648E+00 4.397137E-01 3.556353E-01 1.726827E-01
1.020135E+00 2.035834E+00

9 992 **PDB** 318 1.132421E+01 1.109059E+00 4.908390E-01 5.494007E-01 1.893269E-01
1.047538E+00 1.954942E+00

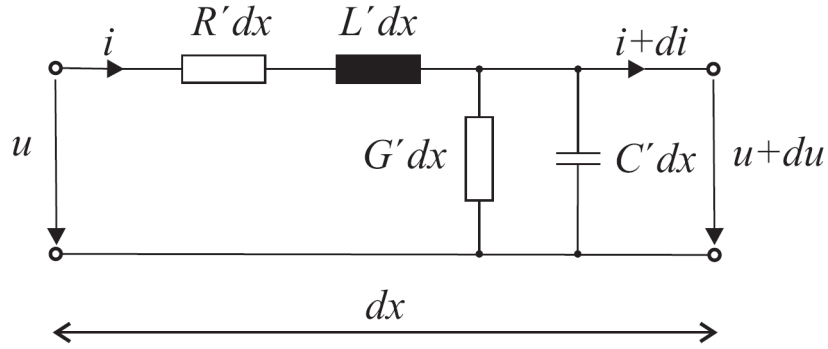
9 998 **SNB** 319 1.127014E+01 1.169782E+00 5.203290E-01 6.735485E-01 1.940049E-01
1.064869E+00 1.858217E+00

9 1000 EP 320 1.127222E+01 1.165942E+00 5.125629E-01 6.481308E-01 1.896549E-01
1.063859E+00 1.844414E+00

EK C. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ

Tüm mühendislik bilimlerinde analiz uygun modellerin formüle edilmesiyle başlar. Elektrik güç sistemleri analizinde matematiksel bir model, analizi yapılan bileşenin çalışmasına etki eden farklı parametreler arasındaki etkileşimleri gösteren bir denklem veya ilişkiler takımı anlamına gelip, modelin başarımı sistemin hedeflenen fiziksel doğruluğunu göstermesi ile değerlendirilmektedir. Bu bilgiler ışığında, yapılan analizin amacına göre aynı fiziksel sistemin veya bileşenin farklı modellerinin olması mümkündür.

Örneğin bir iletim sisteminin genelleştirilmiş modeli; parçalı bir diferansiyel denklem, sabit sinüoidal kabulü yapılan uzun hat denklemleri ve adi diferansiyel denklemler ile ifade edilmiş olup, bu denklemlerin birbirleri arasında çözülmesiyle iletim sisteminin cebirsel π modeli elde edilir.

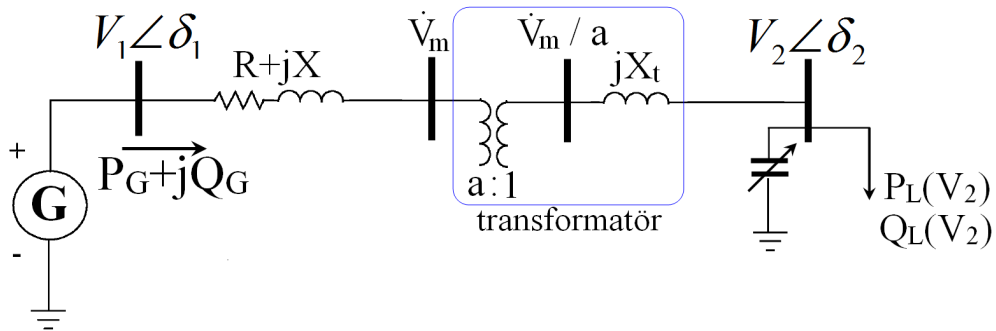


Şekil C.1. dx Uzunluğuna Sahip Bir İletim Hattının Eşdeğer Devresi

Prensip olarak bütünsel iletim sistemi denklemleri, şebeke düğümlerinde sürekli hal şartları için geçerlidir. Bu çözümün içinde hat boyunca başlangıç anahtarlama transientleri mevcuttur fakat şebekenin transientleri elimine edilerek iletim hattının sürekli hal ifadesi elde edilir. Yukarıda ifade edilen örnekte sistemi olabildiğince yalın ifade etmek esas alındığı için sistemin transientleri genel denklem içerisinde çıkarılarak ifade anlaşılabilir ve kolay hesaplanabilir hale getirilmiştir. Fakat birçok

mühendislik sisteminde doğru modelin seçilmesi oldukça kritik bir aşamadır. Bu bağlamda bütün sistemler için sistemin bütününe her parametresiyle karşılaman bir model oluşturmak oldukça zor bir iştir. İletim hattının modellenmesi bu bölümün ilerleyen aşamasında daha detaylı anlatılacaktır.

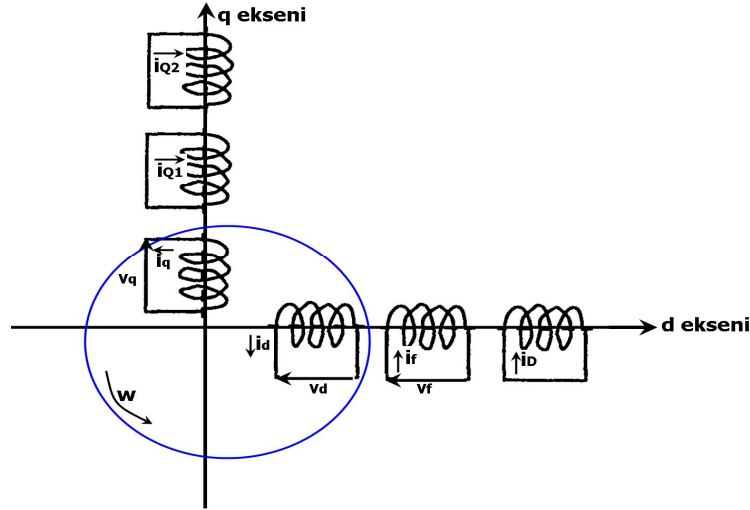
Bir güç sisteminin kararlılık analizi için matematiksel modelleri generatör, transformator, baralar, iletim hatları, yükler ve FACTS kontrolörlerinden oluşan sistem bileşenlerini gösteren diferansiyel ve cebrik eşitliklerden oluşur. Sistemin dengeli bir sistem olduğu kabul edilmekte ve sistem modeli tek faz için oluşturulmaktadır. Şekil C.2’de bu bileşenlerden oluşan bir güç sistemi gösterilmiştir. Bu bölümde sırasıyla bu bileşenlere ait ve literatürde kabul görmüş detaylı matematiksel modeller anlatılacaktır.



Şekil C.2. Bir güç sistemi gösterimi

C.1. Senkron Makinanın Modellenmesi

Enerji üretim sistemlerinde yapısı ve kontrolünün uygun olmasından dolayı senkron makinalar kullanılmaktadır. Şekil C.3’de d-q modeli verilen bir senkron makina modeli gösterilmiştir. Bu model baz alınarak aşağıdaki makina-gerilim denklemleri yazılabilir. Burada makinadan çıkan akımın yönü pozitif olduğu temel alınmıştır[22,4].



Şekil C.3. Senkron Bir Makinanın d-q Modeli

$$v_d = \frac{d\lambda_d}{dt} - i_d r_a - \omega \lambda_q, \quad v_q = \frac{d\lambda_q}{dt} - i_q r_a - \omega \lambda_d, \quad v_f = \frac{d\lambda_f}{dt} - i_f r_f \quad (\text{C.1})$$

$$0 = r_D i_D + \frac{d\lambda_D}{dt}, \quad 0 = r_{Q1} i_{Q1} + \frac{d\lambda_{Q1}}{dt}, \quad 0 = r_{Q2} i_{Q2} + \frac{d\lambda_{Q2}}{dt} \quad (\text{C.2})$$

Stator transientleri (λ_d ve λ_q) ve stator sargılarındaki dirençler (r_a) ihmal edilirse yukarıdaki ilk üç gerilim eşitliği aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir;

$$v_d = -\omega \lambda_q, \quad v_q = -\omega \lambda_d, \quad v_f = \frac{d\lambda_f}{dt} - i_f r_f \quad (\text{C.3})$$

Makinanın hızı senkron hıza çok yakın olduğu kabul edilerek (ω p.u değerinde),

λ_d, λ_q ve λ_f akı bağıntıları aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\lambda_d = -x_d i_d + x_{md} i_f + x_{mD} i_D, \quad \lambda_q = -x_q i_q + x_{mQ} (i_{Q1} + i_{Q2}) \quad (\text{C.4})$$

$$\lambda_f = (x_f + x_{md}) i_f - x_{md} i_d + x_{fD} i_D$$

$$\lambda_D = (x_D + x_{fD}) i_D + x_{fD} i_f - x_{mD} i_d \quad (\text{C.5})$$

$$\lambda_{Q1} = (x_{Q1} + x_{mq}) i_{Q1} - x_{mQ} i_q + x_{mq} i_q \quad (\text{C.6})$$

$$\lambda_{Q2} = x_{mQ} i_{Q1} + (x_{Q2} + x_{mQ}) i_{Q2} - x_{mQ} i_q \quad (\text{C.7})$$

x_{fD} , x_{mD} ve x_{mQ} p.u empedans değerlerinin x_{md} empedansı ile aynı olduğu kabul edilerek (C.3) ve (C.5) eşitlikleri birlikte düzenlenirse;

$$\frac{d\lambda_f}{dt} = v_f - r_f \frac{\lambda_f + x_{md} i_d - x_{md} i_D}{(x_{md} + x_f)} \quad (C.8)$$

elde edilir.

Genel olarak x_d , x_q , x_d' , x_q' , x_d'' , x_q'' , T'_{d0} , T''_{d0} , T'_{q0} , T''_{q0} ve x_l -kaçak reaktans bilinen parametreler olup, diğer parametreler bu bilinen parametreler kullanılarak aşağıdaki şekilde hesap edilir;

$$x_{md} = x_d - x_l, \quad x_{mq} = x_q - x_l \quad (C.9)$$

$$x_{rd} = x_{md} x_f + x_{md} x_D + x_f x_D$$

$$x_{rq} = x_{mq} x_{Q1} + x_{mq} x_{Q2} + x_{Q1} x_{Q2} \quad (C.10)$$

$$x_f = \frac{x_{md} (x'_d - x_l)}{x_d - (x'_d - x_l)}, \quad x_D = \frac{x_{md} x_f (x''_d - x_l)}{x_{md} x_f - (x_{md} + x_f)(x''_d - x_l)} \quad (C.11)$$

$$x_{Q1} = \frac{x_{mq} (x'_q - x_l)}{x_q - (x'_q - x_l)}, \quad x_{Q2} = \frac{x_{mq} x_{Q1} (x''_q - x_l)}{x_{mq} x_{Q1} - (x_{mq} + x_{Q1})(x''_q - x_l)} \quad (C.12)$$

$$r_f = \frac{x_f + x_{md}}{T'_{d0}}, \quad r_D = \frac{x_{rd}}{(x_{md} + x_f) T''_{d0}} \quad (C.13)$$

$$r_{Q1} = \frac{x_{Q1} + x_{mq}}{T'_{q0}}, \quad r_{Q2} = \frac{x_{rq}}{(x_{Q1} + x_{mq}) T''_{q0}} \quad (C.14)$$

e'_d , e'_q ve e_{fd} 'nin de tanım bağıntıları aşağıdaki gibi verilmek üzere :

$$e'_d = \frac{x'_d - x_l}{x_f} \lambda_f, \quad e'_q = \frac{x'_q - x_l}{x_{Q1}} \lambda_{Q1}, \quad e_{fd} = x_{md} \frac{v_f}{r_f} \quad (C.15)$$

(C.8) ve (C.15) eşitlikleri birlikte tekrar düzenlenirse;

$$\begin{aligned} \frac{de'_q}{dt} &= \frac{x'_d - x_l}{x_f} \left(v_f - r_f \frac{\lambda_f + x_{md}i_d - x_{md}i_D}{x_f} \right) \\ &= \frac{1}{T'_{d0}} \left[e_{fd} - e'_q - (x_d - x'_d)(i_d - i_D) \right] \end{aligned} \quad (C.16)$$

Burada, $T'_{d0} \stackrel{\Delta}{=} \frac{x_f + x_{md}}{r_f}$, $x_d - x'_d \stackrel{\Delta}{=} \frac{(x'_d - x_l)x_{md}}{x_f}$ dir.

(C.2), (C.6) ve (C.15) eşitlikleri birlikte tekrar düzenlenirse;

$$\begin{aligned} \frac{de'_d}{dt} &= \frac{r_{Q1}}{x_{Q1} + x_{mq}} \frac{x'_q - x_l}{x_{Q1}} (\lambda_{Q1} + x_{mq}(i_q - i_{Q2})) \\ &= \frac{1}{T'_{q0}} \left[-e'_d + (x_q - x'_q)(i_q - i_{Q2}) \right] \end{aligned} \quad (C.17)$$

Burada, $T'_{q0} \stackrel{\Delta}{=} \frac{x_{Q1} + x_{mq}}{r_{Q1}}$, $x_q - x'_q \stackrel{\Delta}{=} \frac{(x'_q - x_l)x_{mq}}{x_{Q1}}$ dir.

Ayrıca e''_d ve e''_q 'nin tanım bağıntıları aşağıdaki gibi verilmek üzere :

$$e''_d \stackrel{\Delta}{=} -\frac{x_{mq}x_{Q1}x_{Q2}}{x_{rq}} \left(\frac{\lambda_{Q1}}{x_{Q1}} + \frac{\lambda_{Q2}}{x_{Q2}} \right) \text{ ve } e''_q \stackrel{\Delta}{=} \frac{x_{md}x_f x_D}{x_{rd}} \left(\frac{\lambda_f}{x_f} + \frac{\lambda_D}{x_D} \right) \quad (C.18)$$

(C.2) ve (C.15) eşitlikleri birlikte tekrar düzenlenirse;

$$\frac{d\lambda_f}{dt} = \frac{x_f}{x'_d - x_l} \frac{de'_q}{dt} \text{ ve } \frac{d\lambda_D}{dt} = -r_D i_D \quad (C.19)$$

elde edilir. Dolayısıyla;

$$\frac{de''_q}{dt} = \frac{x_{md}x_l x_D}{x_{rd}} \left(\frac{1}{x'_d - x_l} \frac{de'_q}{dt} - \frac{r_D}{x_D} i_D \right) \quad (C.20)$$

$$= \frac{1}{T''_{d0}} \left[\frac{x_D}{r_D} \frac{de'_q}{dt} - (x'_d - x_l) i_D \right]$$

Burada, T''_{d0} zaman sabiti aşağıdaki gibi verilir;

$$T''_{d0} \stackrel{\Delta}{=} \frac{x_{rd}}{r_D (x_{md} + x_f)} \quad (C.21)$$

(C.2) denkleminin türevi alınıp, (C.15) denkleminde yerine koyulup ve eşitlikler birlikte tekrar düzenlenirse;

$$\frac{d\lambda_{Q1}}{dt} = \frac{-x_{Q1}}{x'_q - x_l} \frac{de'_d}{dt} \quad (C.22)$$

ifadesi yazılabilir.

Dolayısıyla

$$\begin{aligned} \frac{de''_d}{dt} &= \frac{r_{Q2} x_{mQ} x_{Ql} x_{Q2}}{x_{rq}} \left(\frac{1}{x'_q - x_l} \frac{de'_d}{dt} + \frac{1}{x_{Q2}} i_{Q2} \right) \\ &= \frac{1}{T''_{q0}} \left[\frac{x_{Q2}}{r_{Q2}} \frac{de'_d}{dt} + (x'_q - x_l) i_{Q2} \right] \end{aligned} \quad (C.23)$$

Burada, T''_{q0} zaman sabiti aşağıdaki gibi verilir;

$$T''_{q0} \stackrel{\Delta}{=} \frac{x_{rq}}{r_{Q2} (x_{mq} + x_{Q1})} \quad (C.24)$$

(C.15), (C.17), (C.20) ve (C.20) eşitlikleri, makinanın d-q ekseninde sönümlenme sargıları olan dinamik stator davranışını temsil eder. Eğer sönümlenme sargıları ihmal edilirse (C.15) denkleminde ifade edilen i_D sıfır alınır.

(C.2) denklemi ve e'_q , e''_q tanım ifadeleri birlikte tekrar düzenlenirse;

$$i_f = \frac{1}{x_{md}} \left[e'_q + (x_d - x'_d) (i_d - i_D) \right] \quad (C.25)$$

$$i_D = \frac{1}{x'_d - x_l} \left[e''_q - e'_q - ((x_d - x'_d) - \frac{x_{md}^2 (x_f + x_D)}{X_{rd}}) i_d \right] \quad (C.26)$$

Makinanın rotor hareketi dinamiği, salınım denklemi adıyla da bilinen aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (C.27)$$

Burada elektriksel gücü temsil eden P_e aşağıdaki ifade ile temsil edilir;

$$P_e = (v_d i_d + v_q i_q) \quad (C.28)$$

Dolayısıyla salınım denklemi şu şekilde düzenlenebilir;

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - (v_d i_d + v_q i_q) \quad (C.29)$$

C. dereceden bir değişkenli bu diferansiyel ifade, 1. Dereceden iki diferansiyel denklem ile aşağıdaki gibi temsil edilebilir;

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (C.30)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} [P_m - (v_d i_d + v_q i_q)] \quad (C.31)$$

Yukarıda ifadesi yazılan (C.30) ve (C.31) denklemleri makinanın dinamik rotor davranışını temsil eder.

C.1.1. 6. Mertebeden Senkron Makina Modeli

Stator transientleri ve dirençlerinin etkisini ihmal edilebilir kabul ederek, d-q eksenlerinde çift sönümlenmiş sargısı bulunan senkron bir makinanın dinamiği aşağıdaki diferansiyel denklemlerle temsil edilebilir;

$$\frac{de''_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} [e_{fd} - e'_q - (x_d - x'_d)(i_d - i_D)] \quad (C.32)$$

$$\frac{de''_q}{dt} = \frac{1}{T''_{d0}} \left[\frac{x_D}{r_D} \frac{de'_q}{dt} - (x'_d - x_l) i_D \right] \quad (C.33)$$

$$\frac{de'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{q0}} \left[-e'_d + (x_q - x'_q)(i_q - i_{Q2}) \right] \quad (C.34)$$

$$\frac{de''_d}{dt} = \frac{1}{T''_{q0}} \left[\frac{x_{Q2}}{r_{Q2}} \frac{de'_d}{dt} + (x'_d - x_l)i_{Q2} \right] \quad (C.35)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (C.36)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} \left[P_m - (v_d i_d + v_q i_q) \right] \quad (C.37)$$

Burada,

$$v_t = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}, v_d = e''_d + x''_q i_q, v_q = e''_q + x''_d i_d \quad (C.38)$$

$$i_D = \frac{1}{x'_d - x_l} \left[e''_q - e'_q - ((x_d - x'_d) - \frac{x_{md}^2 (x_f + x_D)}{X_{rd}}) i_d \right] \quad (C.39)$$

$$i_{Q2} = \frac{1}{x'_d - x_l} e'_d - \frac{1}{x'_q + x_{Q2} - x_l} \left(\frac{x_{Q2}}{x''_q - x_l} e''_d - (x'_q - x_l) i_q \right) \quad (C.40)$$

Herbir senkron makinanın için durum dinamiğini; yukarıda verilen 6 adet durum denklemi, e'_q , e''_q , e'_d , e''_d , ω , δ olmak üzere 6 adet durum değişkeni ve makina sabitlerinden başka v_d , v_q , i_d , i_q , i_D , i_{Q2} olmak üzere 6 adet ara değişken temsil eder [4].

C.1.2. 3. Mertebeden Senkron Makina Modeli

Senkron bir makinanın transient dinamiklerini uygun olarak analiz etmek için, d-q eksenlerinde sönümlenme sargıları ihmal edilen daha basit bir makina modeli seçilebilir. Böyle bir amaçla geliştirilen senkron makina modelinin, aynı zamanda

bozucu etkilerden yeterince uzak bir noktaya yerleştirilen makina modeli için de uygun olacağı düşünülmüştür.

Sönümlenme sargıları ihmal edildiğinde, makinanın statoru için dinamik denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} [e_{fd} - e'_q - (x_d - x'_d) i_d] \quad (C.41)$$

(C.2) denklemi aşağıdaki şekilde düzenlenebilir;

$$\lambda_d = -x_d i_d + x_{md} i_f \quad (C.42)$$

$$\lambda_f = -x_{md} i_d + (x_{md} + x_f) i_f \quad (C.43)$$

Bu iki denklemde i_f ler birbirine eşitlenirse;

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \frac{x_{md}}{x_f + x_{md}} \lambda_f - \left(x_d - \frac{x_{md}^2}{x_f + x_{md}} \right) i_d \\ &= -e'_q + x'_d i_d \quad ZZ \end{aligned} \quad (C.44)$$

$v_f = \lambda_d$ eşitliği dikkate alınarak denklem (C.44)

$$v_q = e'_q + x'_d i_d \quad (C.45)$$

Şeklinde ifade edilir.

(C.11) denklemi şu şekilde yazılabilir;

$$\lambda_q = -x_q i_q \quad (C.46)$$

$v_d = -\lambda_q$ eşitliği dikkate alınarak denklem (C.46) aşağıdaki gibi düzenlenebilir;

$$v_d = x_q i_q \quad (C.47)$$

(C.45) ve (C.47) denklemleri, sönümlenme sargıları ihmal edildiği zaman, akım ve gerilim arasındaki ilişkiyi gösteren ifadelerdir. Sönümlenme sargılarının ihmal edilmesi salınım denklemleri üzerinde bir değişiklik meydana getirmediğinden, 3.

Mertebeden senkron makina modeli aşağıdaki genelleştirilmiş durum denklemleri ile ifade edilebilir;

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} [e_{fd} - e'_q - (x_d - x'_d) i_d] \quad (C.48)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (C.49)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} [P_m - (v_d i_d + v_q i_q)] \quad (C.50)$$

Burada,

$$v_t = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}, \quad v_d = x_q i_q \quad \text{ve} \quad v_q = e'_q - x'_d i_d \quad \text{dir.}$$

Herbir senkron makinanın için durum dinamiğini; yukarıda verilen 3 adet durum denklemi, e'_q, ω, δ olmak üzere 3 adet durum değişkeni ve makina sabitlerinden başka v_d, v_q, i_d, i_q olmak üzere 4 adet ara değişken temsil eder.

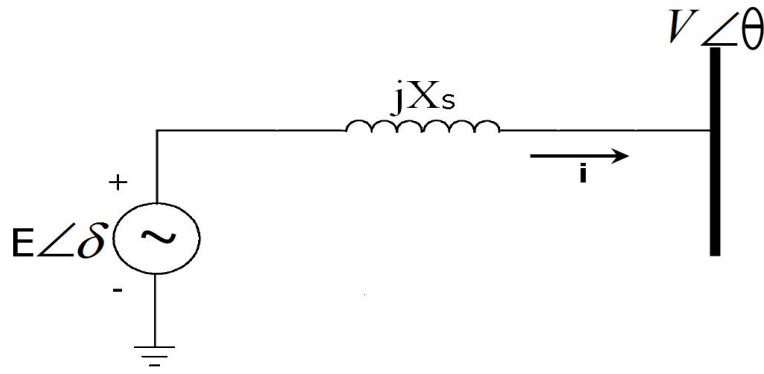
C.1.3. Sürekli Hal Senkron Makina Modeli

Daha önceki senkron makina modelinde, çıkıntılar ihmal edilirse (rotor silindiri pürüzsüz bir yüzeye sahipse),

$$x_d = x_q = x_s \quad \text{yazılabilir.}$$

Burada x_s senkron reaktans olup, Sürekli hal şartlarında makina modeli Şekil C.4'de gösterilen E genliğinde bir gerilim kaynağı ve x_s - senkron reaktans ile temsi edilir. Şekil C.4 'de model gösterimi yapılan sürekli hal senkron makina akımı aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$i = \frac{E \angle \delta - V \angle \theta}{j x_s} \quad (C.51)$$



Şekil C.4. Rotor Silindiri Pürüzsüz Kabul Edilen Senkron Bir Makinanın Sürekli Hal Eşdeğer Modeli

C.2. Güç Transformatörlerin Modellenmesi

Modern elektrik güç sistemlerinin maksimum güç sistemi transfer kapasitesi ve verimlilikleri açısından üretim ve tüketim noktaları arasında 4-5 farklı gerilim seviyesi bulunur. Örneğin hat kayıplarının asgariye çekilmesi açısından iletim gerilim seviyelerinin yüksek olması elzemdir. Üretim ve tüketim noktalarında bu yüksek gerilimlerin üretilmesi/kullanılması mümkün değildir. Bu amaçla elektrik güç sistemlerinde, trafolar güç sistemi boyunca farklı gerilim seviyeleri ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılır. Trafolar gerilim dönüşümünden başka, gerilim kontrolü ve reaktif güç akışı kontrolü amaçları için de kullanılır[2,22,24].

Burada trafo modellemesi başlığı altında, İki sargılı güç trafosunun matematiksel modeli verilecektir.

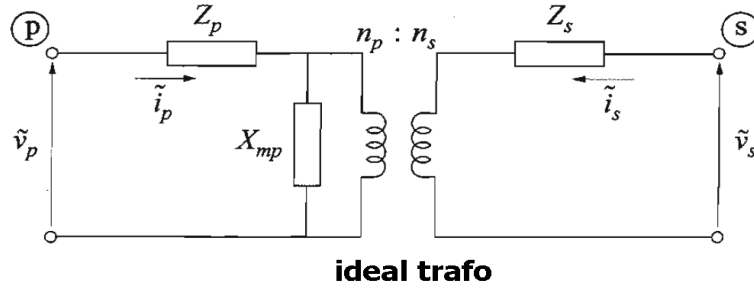
C.2.1. İki Sargılı Güç Transformatörlerin Modellenmesi

Şekil-C.5’de iki sargılı transformatörlerin tüm bileşenleri ile birlikte verilen eşdeğer devre modeli verilmiştir. p ve s alt indisleri sırasıyla, primer ve sekonder sargılarını temsil eder. Manyetik reaktans X_{mp} oldukça büyük olup , genelde ihmal edilir. Sadece trafonun doymasının incelendiği özel çalışmalarda bu parametre denklemlere dahil edilerek analiz yapılır. Şekil-C.5 ‘de verilen eşdeğer devre modelinden ;

$$\tilde{V}_p = Z_p \tilde{i}_p + \frac{n_p}{n_s} \tilde{V}_s - \frac{n_p}{n_s} Z_s \tilde{i}_s \quad (C.52)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_s = Z_s \tilde{\mathbf{i}}_s + \frac{n_s}{n_p} \tilde{\mathbf{v}}_p - \frac{n_s}{n_p} Z_p \tilde{\mathbf{i}}_p \quad (\text{C.53})$$

yazılabilir.



Şekil C.5. İki Sargılı İdeal Güç Transformatorünün Eşdeğer Devre Modeli

Burada $Z_p=R_p+jX_p$; $Z_s=R_s+jX_s$ olup

R_p, R_s = primer ve sekonder sargı dirençleri

X_p, X_s = primer ve sekonder kaçak sargı dirençleri

n_p, n_s = primer ve sekonder sargılarının sarım sayısı

X_{mp} = primer taraf baz alınarak elde edilen magnetik reaktans 'ı temsil eder.

Bundan başka;

Z_{p0} = Primer taraftaki nominal kademe pozisyonundaki Z_p

Z_{s0} = Sekonder taraftaki nominal kademe pozisyonundaki Z_s

n_{p0} = Primer taraftaki nominal sarım sayısı

n_{s0} = Sekonder taraftaki nominal sarım sayısı

olmak üzere primer ve sekonder taraflarındaki (C.52) ve (C.53) gerilim denklemleri tekrardan düzenlenirse,

$$\tilde{\mathbf{v}}_p = \left(\frac{n_p}{n_{p0}} \right)^2 Z_{p0} \tilde{\mathbf{i}}_p + \frac{n_p}{n_s} \tilde{\mathbf{v}}_s - \left(\frac{n_s}{n_{s0}} \right)^2 Z_{s0} \tilde{\mathbf{i}}_s \quad (\text{C.54})$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_s = \left(\frac{n_s}{n_{s0}} \right)^2 Z_{s0} \tilde{\mathbf{i}}_s + \frac{n_s}{n_p} \tilde{\mathbf{v}}_p - \frac{n_s}{n_p} \left(\frac{n_p}{n_{p0}} \right)^2 Z_{p0} \tilde{\mathbf{i}}_p \quad (\text{C.55})$$

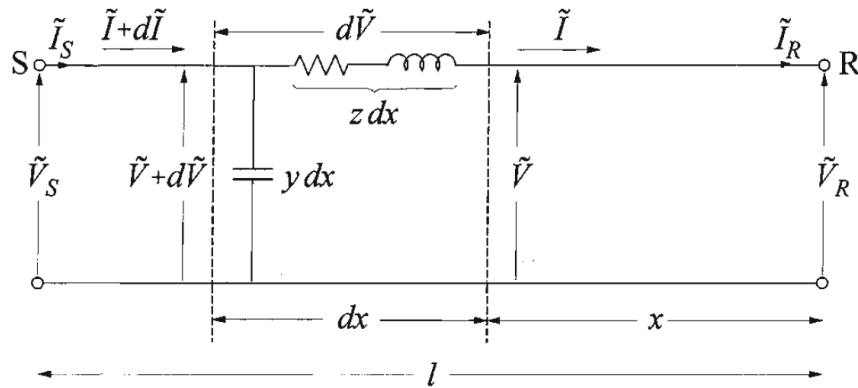
Elde edilir. Burada, hem kaçak reaktansın , hem de transformatörün sargı dirençlerinin sarım sayısının karesi ile doğru orantılı olduğu varsayılmıştır. Bu kabul genel olarak kaçak reaktans için geçerli iken, direnç için geçerli değildir[22,2].

Nominal sarım sayısının primer ve sekonder taraflar için baz ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir;

$$\frac{n_{p0}}{n_{s0}} = \frac{V_{pbaz}}{V_{sbaz}} \quad \text{ve} \quad V_{pbaz} = Z_{pbaz} i_{pbaz}, \quad V_{sbaz} = Z_{sbaz} i_{sbaz} \quad (C.56)$$

C.3. İletim Hattının Modellenmesi

Elektrik enerjisi üretim istasyonlarından tüketicilere havai iletim hatları ve kablolar vasıtasıyla taşınır. Havai hatlar uzak mesafelerde ve engel olmayan yerleşim yerlerinde taşıma için kullanılırken, havai hatların engellendiği yerlerde elektrik enerjisi transferi yeraltı /sualtı iletim ve dağıtım kablolarıyla yapılmaktadır.



Şekil C.6. Bir İletim Hattının Dağıtık Parametreleri ve Akım ve Gerilim İlişkisi Gösterimi

Şekil C.6'da tek fazlı bir iletim hattı için akım ve gerilim ilişkileri dağıtık parametreler üzerinden yapılmaktadır. Burada;

$z = R + j\omega L$ = seri empedans p.u degeri uzunluk/faz

$y = G + j\omega C$ = sönt admitans p.u degeri uzunluk/faz

l = iletim hattı uzunluğu' nu temsil eder.

Gerilim ve akımlar fazör gösterimli sinusoidal zamanla değişen büyüklüklerdir.

V_R ve I_R hatsonu akım ve gerilim değerlerini göstermek üzere,

$$\tilde{V} = \frac{\tilde{V}_R + Z_c \tilde{I}_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{\tilde{V}_R - Z_c \tilde{I}_R}{2} e^{-\gamma x} \quad (\text{C.57})$$

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{V}_R / Z_c + \tilde{I}_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{\tilde{V}_R / Z_c - \tilde{I}_R}{2} e^{-\gamma x} \quad (\text{C.58})$$

Yazılabilir, Burada $Z_c = \sqrt{z/y}$ ve $\gamma = \sqrt{yz} = \alpha + j\beta$ 'dir.

Burada Z_c karakteristik empedans olup γ propagasyon sabitidir.

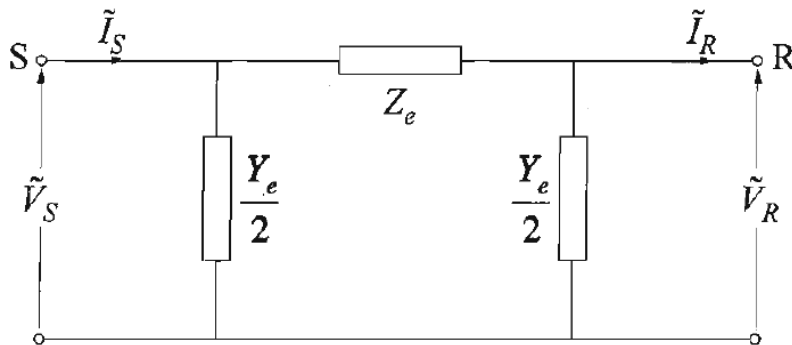
(C.57) ve (C.58) denklemleri yalın bir iletim hattının tam ifadesidir. Ancak, iletim hattının diğer bileşenlerle de bağlantısı olduğu düşünüldüğünde, hattın eşdeğer devresinin kullanılması oldukça kullanışlı olacaktır. (C.57) denklemindeki $x=l$ yapılırsa,

$$\begin{aligned} \tilde{V}_S &= \tilde{V}_R \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} + Z_c \tilde{I}_R \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} \\ &= \tilde{V}_R \cosh(\gamma l) + Z_c \tilde{I}_R \sinh(\gamma l) \end{aligned} \quad (\text{C.59})$$

Benzer bir şekilde (C.58) denklemindeki $x=l$ yapılırsa,

$$\tilde{I}_S = \tilde{I}_R \cosh(\gamma l) + \frac{\tilde{V}_R}{Z_c} \sinh(\gamma l) \quad (\text{C.60})$$

elde edilir.



Şekil C.7. Bir İletim Hattının π Eşdeğer Devresi Gösterimi

Yukarıda eşdeğer modeli verilen bir iletim hattının hatbaşı gerilimi,

$$\begin{aligned}\tilde{V}_S &= Z_e \left(\tilde{I}_R + \frac{Y_e}{2} \tilde{V}_R \right) + \tilde{V}_R \\ &= \left(1 + \frac{Z_e Y_e}{2} \right) \tilde{V}_R + Z_e \tilde{I}_R\end{aligned}\quad (C.61)$$

Buradan (C.59) ve (C.61) denklemleri birlikte düzenlenirse;

$$Z_e = Z_c \sinh(\gamma l) \quad (C.62)$$

$$\left(1 + \frac{Z_e Y_e}{2} \right) = \cosh(\gamma l) \quad (C.63)$$

Dolayısıyla

$$\frac{Y_e}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (C.64)$$

Yazılabilir.

Burada eğer $\gamma l \ll 1$ olursa, Z_e ve Y_e aşağıdaki gibi daha basit bir hale indirgenebilir.

$$\begin{aligned}Z_e &= Z_c \sinh(\gamma l) & \frac{Y_e}{2} &= \frac{1}{Z_c} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \\ &\approx Z_c (\gamma l) & &\approx \frac{1}{Z_c} \left(\frac{\gamma l}{2}\right) \\ &\approx z l = Z & &\approx \left(\frac{\gamma l}{2}\right) = \frac{Y}{2}\end{aligned}\quad (C.65)$$

Z_e ve Y_e sırasıyla hattın toplam seri ve şönt empedanslarını temsil etmektedir[6].

C.4. Elektrik Yüklerinin Modellenmesi

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 (generic dynamic load modelling) 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].

C.4.1. Gerilime Bağlı Yüklerin Modellenmesi (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 [12].

C.4.1.1. Üstel Yük Modeli

Yaygın bir şekilde kullanılır ve üstel yük olarak bilinir.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{z_p} \quad (C.66)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{z_q} \quad (C.67)$$

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 iterasyonununun ıraksadığı) ulaşıncaya kadar devam edilerek P-V eğrilerinin elde edilmiştir. Bu durumda aşağıdaki gibi bir ifade yazılabilir.

$$P_i = P_0(1 + \lambda) \quad (C.68)$$

$$Q_i = Q_0(1 + \lambda) \quad (C.69)$$

Burada P_0 ve Q_0 başlangıç anındaki güçlerdir. P_i ve Q_i i.barada λ ile belirlenen aktif ve reaktif güçlerdir [37].

C.4.2. Gerilim/Frekansa Bağlı Yüklerin Modellenmesi (Statik Yük Modelleri)

Gerilim kararlılığı analizinde yükün frekansa olan bağımlılığı ihmal edilse de, gerilim/frekansa bağlı yükler, gerilime bağlı statik yüklerin $(1 + \alpha_f (f - f_0))$ katsayısıyla çarpımıyla temsil edilir. Burada α_f , frekans duyarlılığını gösterip, f frekans, f_0 nominal frekansı temsil etmektedir. Buradan gerilim/frekansa bağlı yükler aşağıdaki forma yazılabilir;

$$P_L = P_0 V^{\alpha_s} (1 + \alpha_f (f - f_0)) \quad (C.70)$$

$$Q_L = Q_0 V^{\beta_s} (1 + \alpha_f (f - f_0)) \quad (C.71)$$

Burada β ve α mesken, ticari ve endüstriyel yük durumlarını gösteren çarpanlardır.

Tablo-C.1. β_s ve α_s Yük Temsil Katsayıları

	α_s	β_s	α_f	β_f	Durum
Mesken	1.20	C.70	0.70	-C.30	Yaz
	1.70	C.60	1.0	-1.70	Kış
Ticari	0.50	C.50	1.20	-1.60	Yaz
	0.60	C.50	1.50	-1.10	Kış
Endüstriyel	0.10	0.60	C.60	1.60	Yaz/Kış

C.4.3. Dinamik Yüklerin Modellenmesi

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 dinamik senkron makina denklemlerine ilave olarak aşağıda verilen aktif ve reaktif güçlere ait dinamik yük modeli kullanılmıştır [32].

$$\begin{aligned}\dot{\delta} &= \frac{1}{D_L} (P_L - P_0 - P_V \left(\frac{V}{V_0}\right)^{z_p}) \\ \dot{V} &= \frac{1}{\tau} (Q_L - Q_0 - Q_V \left(\frac{V}{V_0}\right)^{z_q})\end{aligned}\tag{C.72}$$

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 değerleri. 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[28].

C.4.3.1. 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.

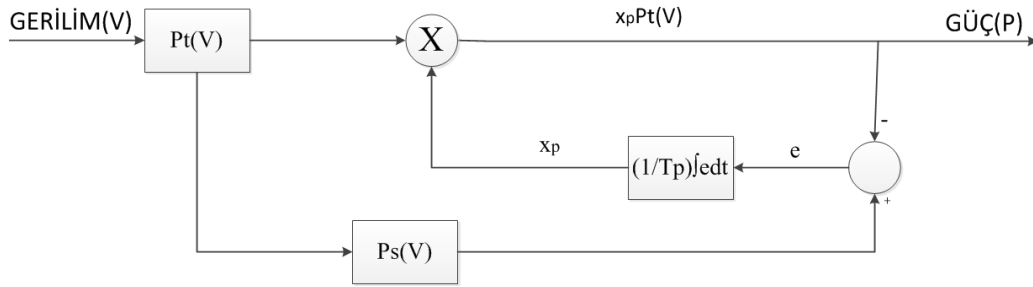
$$T_{G_i} \dot{G}_i = P_0 - G_i V_i^2\tag{C.73}$$

$$T_{B_i} \dot{B}_i = Q_0 - B_i V_i^2\tag{C.74}$$

burada sırasıyla T_{G_i} ve T_{B_i} 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.

C.4.3.2. Generic Dinamik Yük Modeli

Gerilimdeki adım değişimine karşı yük cevabını verecek generic dinamik yük modeli Şekil C.8’de önerilmiştir.



Şekil C.8. Generic Bir Dinamik Yük Modeli

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

$$P_t = V^{\alpha_t} \quad \text{veya} \quad P_t = c_2 V^2 + c_1 V + c_0 \quad (C.75)$$

$$P_s = P_0 V^{\alpha_s} \quad \text{veya} \quad P_s = P_0 (d_2 V^2 + d_1 V + d_0) \quad (C.76)$$

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

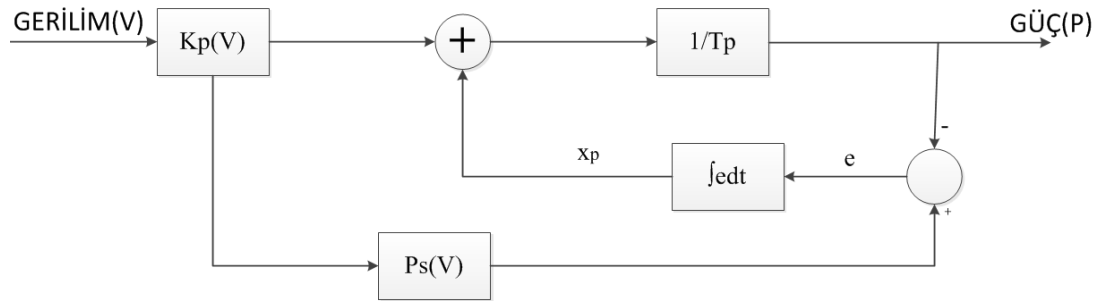
$$T_p \frac{dx}{dt} = P_s(V) - P_d, \quad P_d = xP_i(V)$$

$$T_q \frac{dy}{dt} = Q_s(V) - Q_d, \quad Q_d = yP_i(V) \quad (C.77)$$

$$P_i(V) = V^{\alpha_i}, \quad P_s(V) = P_0 V^{\alpha_s}; \quad Q_i(V) = Q_0 V^{\beta_i}, \quad Q_s(V) = Q_0 V^{\beta_s}$$

C.4.3.3. Linear Olmayan Dinamik Yük Modeli

Gerilimdeki adım değişimine karşı yük cevabını verecek lineer olmayan dinamik yük modeli Şekil C.9'da önerilmiştir.



Şekil C.9. Linear Olmayan Bir Dinamik Yük Modeli

Yük modelinin durum denklemi

$$\dot{x}_p = P_s(V) - P \quad (C.78)$$

ifadesiyle verilmiş olup, burada,

$$P = \frac{1}{T_p} (x_p + K_p(V)) \text{ dir.}$$

$K_p(V)$ dinamik yük fonksiyonunun ifadesi aşağıdaki gibidir,

$$K_p(V) = \frac{1}{2} k_p V^2 \quad (C.79)$$

Generic ve lineer olmayan yük modelleri, kademe değiştirici ve ısıtıcı yükleri dinamiklerinin incelenmesinde esas alınır.

C.4.4. Kompozit Dinamik-Statik Yüklerin Modellenmesi

Generic ve lineer olmayan yük modellerinde gerilimin açısı etkisi ihmal edilmiştir. Kompozit dinamik-statik yük modellerinde bu gerilim açısı ifadesi de yük içerisinde dahil edilmiştir. Bu modelin denklemleri aşağıdaki gibidir;

$$P = P_s - P_v + P_f + P_\theta \quad (C.80)$$

$$P_s = P_0 V^{\alpha_p} f^{\beta_p} \quad (C.81)$$

$$P_v = H_v(s) P_0 g_v(V) \quad (C.82)$$

$$P_f = H_f(s) P_0 g_f(f) \quad (C.83)$$

$$P_\theta = H_\theta \Delta \theta \quad (C.84)$$

Burada, P,V,f sırasıyla p.u cinsinden aktif güç, gerilim ve frekans'ı göstermektedir.

P_0 - Nominal gerilim ve frekansta ki sürekli hal aktif gücü

$\alpha_p \beta_p$ - aktif gücün statik üstel katsayısı

$H_i(s)$ - transfer fonksiyonu

g_v, g_f - cebirsel fonksiyonu

temsil etmektedir.

Transfer fonksiyonları aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

$$H_v(s) = \frac{T_p s}{T_p s + 1}, \quad g_v = b_p V + c_p V^2$$

$$H_f(s) = \frac{T_f s}{T_f s + 1}, \quad g_f(f) = d_p f \quad \text{ve} \quad H_\theta(s) = \frac{\gamma}{s^2 + 2\zeta\omega_c + \omega_c^2}, \quad \zeta < 1$$

Burada, b_p, c_p, d_p transfer katsayıları

T_p, T_f - zaman sabitleri

ω_c - doğal salınım frekansı

ζ - sönümleme sabiti

γ - oransal sabit

olup, bu transfer fonksiyonları eşliğinde P_s ve P_v ifadeleri düzenlenirse

$$P = P_s + \frac{sT_p}{1 + sT_p} P_0 (b_p V + c_p V^2) \quad (C.85)$$

elde edilir. $x_p = P_s(V) - P$ eşitliği göz önünde bulundurularak

$$x_p = P_0(b_p + 2c_p V)VT_p - \frac{1}{T_p}x_p \quad (\text{C.86})$$

$$P = P_s + \frac{1}{T_p}x_p \quad (\text{C.87})$$

Durum denklemi ifadesi yazılabilir.

C.4.5. Dinamik Reaktif Yüklerin Modellenmesi

Şimdiye kadar incelenen dinamik yük modellerinde gerilim ve gerilim açısı değişimlerinin çıkış aktif gücü üzerine olan etkileri modellenmişti. Yükün reaktif güç bileşeninin de, aktif güçte olduğu gibi bir etki oluşturacağı varsayılmıştı. Dinamik reaktif yük modelinde, bu varsayım yerine doğrudan reaktif yük etkisi baz alınarak çıkış gücü reaktif güç üzerinden incelenmiştir. Burada kapasitörlerin anahtarlama süresi kadar bir gecikmeyle reaktif yükün etkisi modele yansıtılmıştır. Burada dinamik reaktif yükünü temsil eden

$$T_q \frac{dQ}{dt} + Q = Q_s(V) + T_q \frac{dQ_t(V)}{dt} \quad (\text{C.88})$$

ifadesi

Aşağıdaki durumları karşılar;

$$t > tc$$

$$Q_s(V) = Q_0 V(t - tc)^{\beta_s}$$

$$Q_t(V) = Q_0 V(t - tc)^{\beta_t}$$

Bu modelin çalışma yapısını incelemek için

$x_q(t) = Q(t) - Q_t(V(t - tc))$ ifadesi paralelinde yük modeli tekrar revize edilir;

$$T_q x_q(t) + x_q = Q_s(V) - Q_t(V) \quad (\text{C.89})$$

$$Q = x_q + Q_t(V) \quad (C.90)$$

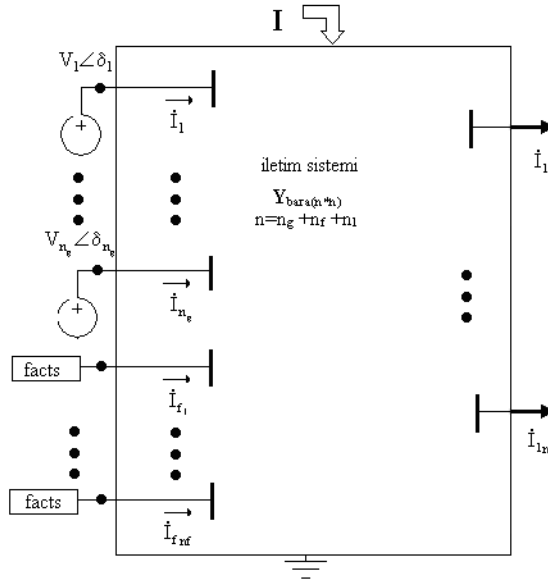
Nihai yük modeli olarak yazılır.

C.5. Şebekenin Modellenmesi

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

$$\bar{I} - \bar{Y}_{\text{bara}} \bar{V} = 0 \quad (C.91)$$

burada sırasıyla \bar{I} ve \bar{V} fazör olarak n boyutlu enjekte akım ve gerilim vektörü, \bar{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 \bar{Y}_{bara} tüm sistemin düğümleri arasındaki bağlantı matrisidir (Şekil C.10) [39]. Burada n, bara sayısı, n_g , generatör n_f facts cihazları ve n_l , yük baralarının sayısıdır.

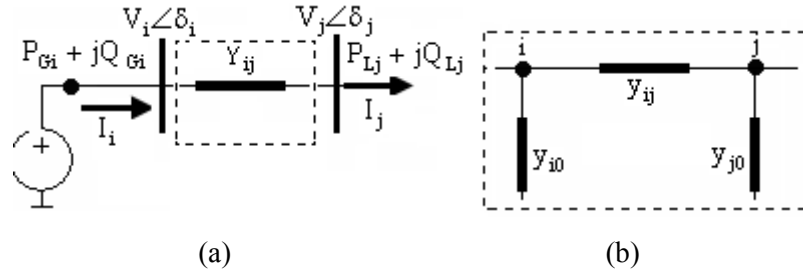


Şekil C.10. Güç Sisteminin Genelleştirilmiş Gösterimi

C.5.1. İki Kapılı Şebeke Modeli

Güç akışı eşitliklerini açıklamak için Şekil C.10(b)'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. Buna göre Y_{ij}

$=Y_{ji}$ yazılabilir ve bu iki kapılı devrenin (Şekil C.11(a)), pi eşdeğer devresi (C.11(b))'de görüldüğü gibidir.



Şekil C.11. (a) İndirgenmiş Sistem (b) İki Kapılı İndirgenmiş Sistemin π Eşdeğer Devresi

İndirgenmiş iki kapılı sistemin admitans matrisi aşağıdaki formda yazılabilir.

$$Y_{\text{bara_ind}} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{ij} + y_{i0} & -y_{ij} \\ -y_{ji} & y_{ji} + y_{j0} \end{bmatrix}. \quad (\text{C.92})$$

Şekil 3.4b'de gösterilen i ve j baraları arasında iki kapılı şebekenin denklem 3.14'te 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[6,93];

$$P_{gi} = V_i V_j (c_1 \cos \delta + c_2 \sin \delta) + \frac{V_i^2 (d_1 b_1 + d_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} - \frac{V_i V_j}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) + (d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] \quad (\text{C.93})$$

$$Q_{gi} = V_i V_j (c_1 \sin \delta - c_2 \cos \delta) + \frac{V_i^2 (d_1 b_2 - d_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} - \frac{V_i V_j}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) - (d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] \quad (\text{C.94})$$

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

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) - V_j^2 (a_1 b_1 + a_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (\text{C.95})$$

$$Q_{ij} = \frac{V_i V_j (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - V_j^2 (a_1 b_2 - a_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} \quad (\text{C.96})$$

ÖZGEÇMİŞ

Metin VARAN, 1981 de Bingöl' de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 1998 yılında İstanbul Mehmet Niyazi Altuğ Anadolu Lisesi, Matematik Bölümünden mezun oldu. 2003 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünü 2006 yılında bitirdi. İstanbul'da 2006-2009 yılları arasında çok sayıda toplu konut elektrifikasyon projeleri, fabrika otomasyon kurulumu ve elektrik tesisat projeleri ve yazılım projelerinde çalıştı. 2008 Aralık ayında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilimdalı'ndan Elektrik Yüksek Mühendisi ünvanı aldı. 2009 yılından bu yana Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Araştırma ve Uygulama Merkezinde Yazılım Geliştirme Uzmanı olarak üniversitenin otomasyon yazılım geliştirme projelerinde aktif olarak çalışmalarını sürdürmektedir.