

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KAOS

Yılmaz Uyaroğlu, M. Ali Yalçın

Özet - Gerilim çökmesi mekanizmasının nasıl gerçekleştiğini gösteren, mümkün olan en basit modeli elde etmek için, hassas modelleme kabulleri yapmak gereklidir. Bu çalışmada, yavaşça değişen kararlı bir denge noktasını izleyen bir güç sistemi kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Gerilim Çökmesi, Güç Sistemleri Dinamiği, Çatallaşma, Eyer Noktası

Abstract Several voltage collapses have had a period of slowly decreasing voltage followed by an accelerating collapse in voltage. In this paper we analyze this type of Voltage Collapse based on a Voltage Collapse Model. The essence of this model is that the system dynamics after bifurcation are captured by the center manifold trajectory and it is computable model that allows prediction of voltage collapse.

Keywords - Voltage Collapse, Power System's Dynamics, Bifurcation, Saddle Node

I. GİRİŞ

Ekonomik ve çevre baskıları nedeniyle büyük güç sistemlerinin birbirlerine bağlantılarının sürmesi, kararlılık sınırlarına daima en yakın çalışması gereken artan bir kompleks sisteme yol açmaktadır. Bu çalışma ortamı, güç sistemlerinin dinamik kararlılık değerlendirmeleri ile ilgili problemlerin artan önemine katkı sağlamaktadır[1,2,3]. Büyük ölçüde bu, sistem dinamiklerinin cevaplarıyla ilgili problemler tarafından sebep olması nedeniyledir. Kararsızlığın yeni tiplerinin, sistemin kararlılık limitlerine yaklaşması olarak ortaya çıktığına inanılmaktadır[5,6].

Sistem çok yüklü olduğu zaman meydana gelen sistem kararsızlığının bir tipide gerilim çökmesidir[4,7,8]. Bu olay yüklerdeki artış sebebiyle, sistemin çalışma noktasındaki yavaş bir değişim tarafından karakterize edilir, bu durumda hızlı ve ani bir değişim oluşuna kadar gerilim genlikleri kademeli olarak azalır[9,10].

Y. Uyaroğlu, M. Ali Yalçın Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Esentepe Kampüsü, 54040, SAKARYA, uyaroglu@sakarya.edu.tr, yalcin@sakarya.edu.tr

Bir x_0 denge noktasının kararsız uzayı $w^u(x_0)$, $t \rightarrow -\infty$ yada $t \rightarrow \infty$ olarak x_0 yaklaşan yörüngelerden oluşan durum uzayındaki uzaydır. Aynı zamanda pozitif yada negatif reel kısmımlı öz değerlere ilişkin öz vektörler tarafından kapsanan alt uzaya x_0 ' da teğettir.

Eğer x_0 hiperbolik ise, $w^u(x_0)$ 'ın boyutu x_0 'ın tipine eşittir. Hiperbolik olmayan bir denge noktası için, imajiner eksen üzerinde $\frac{df}{dx}(x_0)$ öz değerleri ile ilgili öz vektörler tarafından kapsanan alt uzaya teğet olanı $w^c(x_0)$ merkezi uzay olarak adlandırılan diğer ir uzay oluşur. Kararlı ve kararsız uzaylar tektir, fakat merkezi uzay tek olmayabilir.

λ 'nın yeteri kadar yavaş değiştiğini kabul edelim. Zamanla değişen λ ile sistem, sistemin dinamikleri hareketli iken λ sabitliğini koruyarak iyi bir şekilde yaklaşır. Örneğin; eğer $\dot{x} = X_\lambda(x)$ sistemi, kararlı bir x_0^λ denge noktasına sahip ve sistem durumu x başlangıçta x_0^λ 'nın yakınında ise, o zaman dinamikler λ olarak x , x_0^λ 'yı izleyecektir ve x_0^λ yavaşça değişecektir.

$\dot{x} = X_\lambda(x)$ sistemi Γ_1 sisteminin genel kümesi içindedir. Γ_1 her bir λ için $\dot{x} = X_\lambda(x)$ normunun sistemlerini oluşturur, bozulmamış bir eyer noktası denge durumu olmak için denge durumlarından biri için mümkün olanın dışında kalan her basit denge durumuna sahiptir.

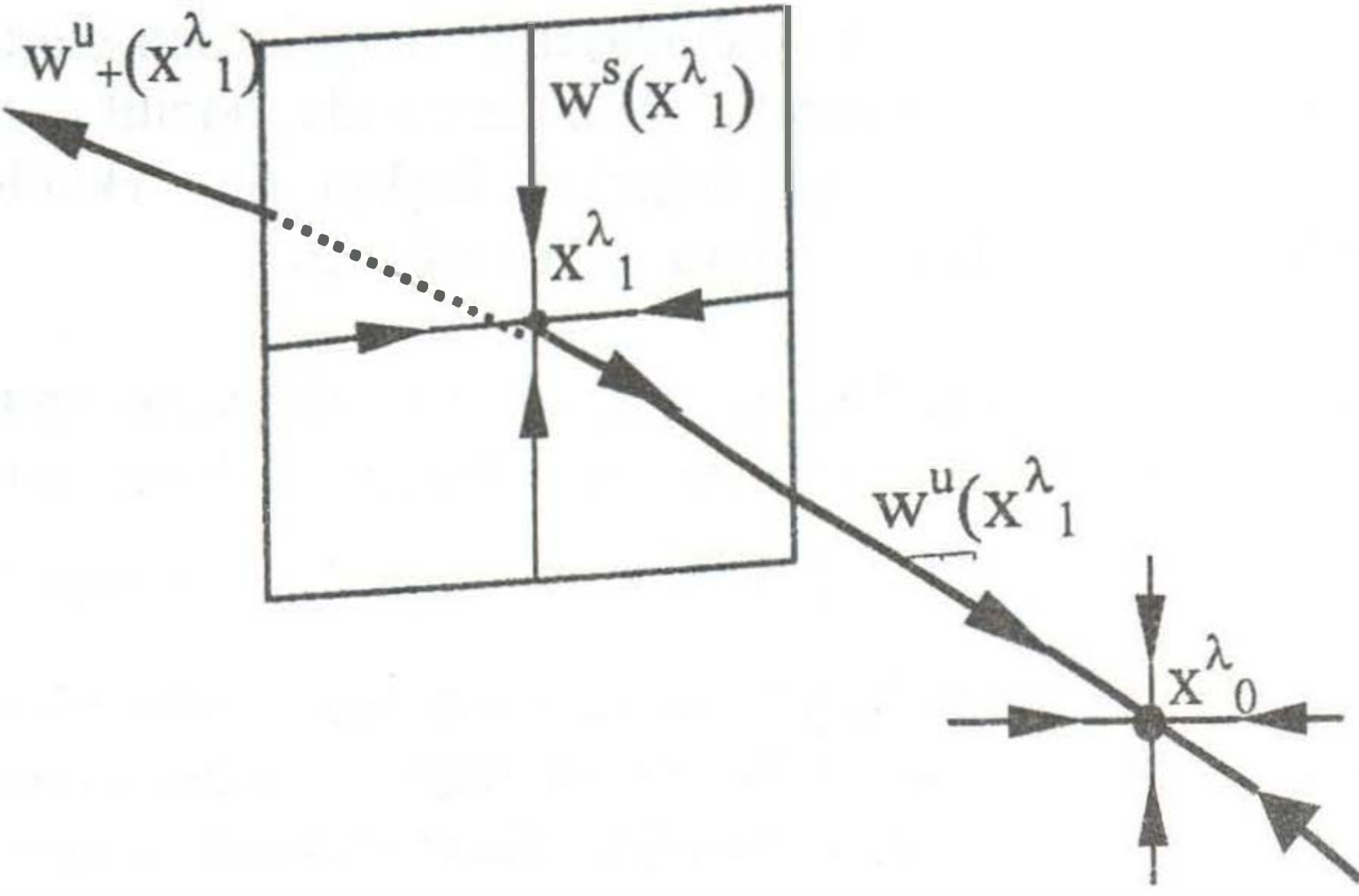
$\dot{x} = X_\lambda(x)$ sisteminin kararlı bir denge noktası x_0^λ 'nın tek yolu, bir eyer noktası çatallaşmasındaki x_1^λ birinci tip bir denge noktasıyla birleşerek gözden kaybolmasıdır. Çatallaşmadan hemen önce x_1^λ , x_0^λ 'ın kararlılık sınırları üzerindedir ve x_1^λ , x_0^λ 'a en yakın kararsız denge noktasıdır.

Kararlı bir denge noktasının kararlılığını kaybetmesinin iki tipik yolu vardır. Ya 1. durumda olduğu gibi gözden kaybolur ya da, devam eder, fakat bir Hopf çatallaşmasındaki bir limit döngü ile etkileşerek kararsız olur. Birçok güç sistemi modelleri, limit döngüleri kabul etmez ve bu sebeple Hopf çatallaşmalarını içermezler. Bir

x_0^λ denge noktası kararlı iken, kendisinin kararlılık bölgesinin içinde kalır. x_0^λ sadece kendi kararlılık sınırları içinde, x_1^λ denge noktasıyla çatallaşarak gözden kaybolabilir. $W^u(x_1^\lambda)$ aşağıdaki gibi ayrıştırılabilir.

$$W^u(x_1^\lambda) = W^u U(x_1^\lambda) U W_+^u$$

W_+^u x_0^λ 'nin kararlılık bölgesi dışında kalırken, W^u x_0^λ 'nin kararlılık bölgesi içinde kalır ve x_1^λ 'da, x_0^λ 'a katılır (Şekil 1).



Şekil 1. Çatallaşmadan hemen öncesi.

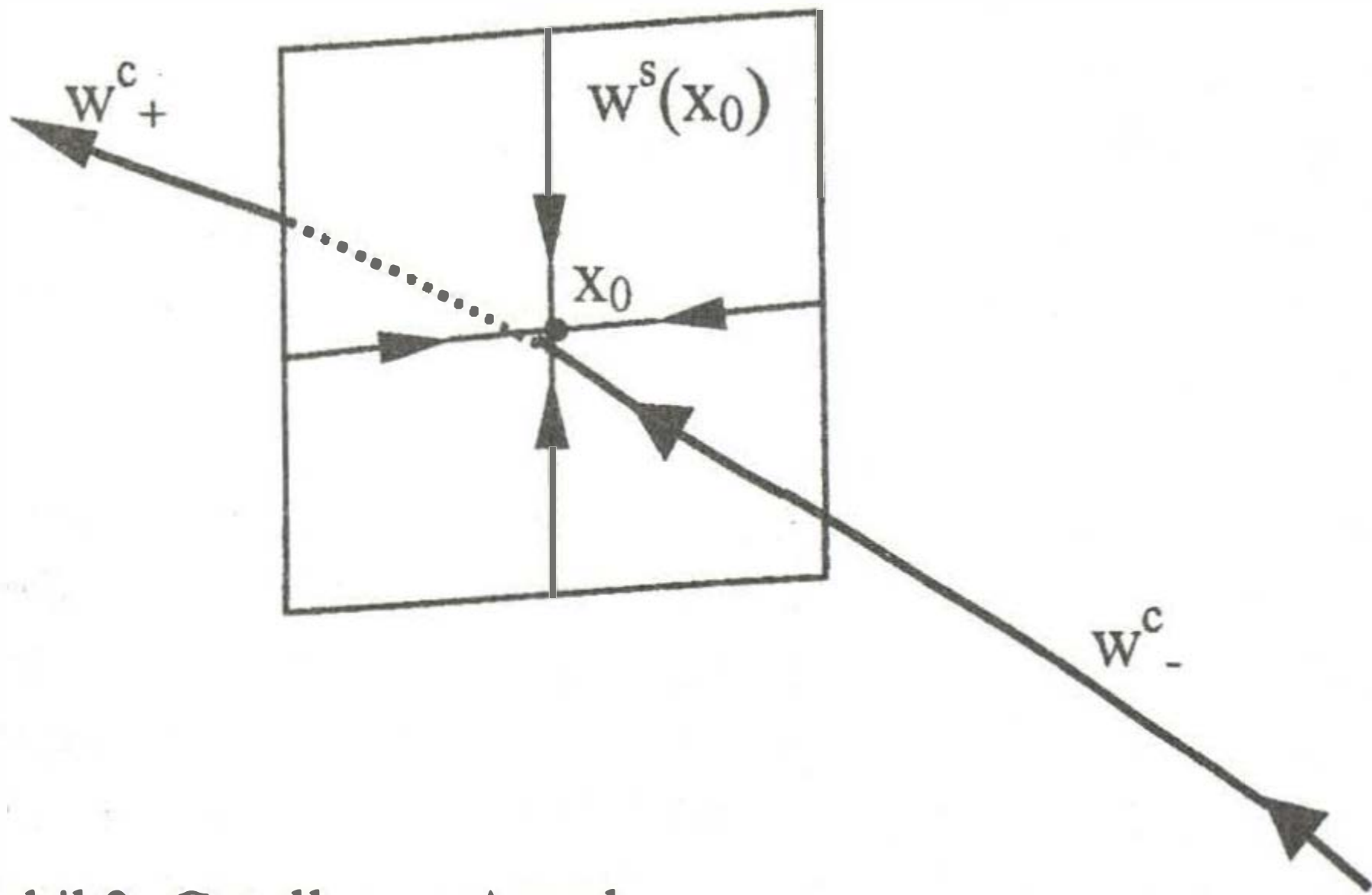
Çatallaşmada,

$$\lambda = \lambda^* \text{ ve } x_0^\lambda \text{ ve } x_1^\lambda, \\ x^* = x_0^{\lambda^*} = x_1^{\lambda^*}$$

denge noktası formuna birleşirler. X^* 'da jakobiyen, x_0^λ ve x_1^λ birleştikleri doğrultudaki bir w öz vektörü ile bir "sıfır" öz değere sahip olacaktır. X^* 'in jakobiyeninin diğer $n-1$ öz değeri negatif kalır. Bu yüzden x^* bir boyutlu W^c merkezi uzaya ve $n-1$ boyutlu, $W^s(x^*)$ kararlı uzaya sahiptir. W^c aşağıdaki gibi ayrıştırılabilir.

$$W^c = W^c U(x^*) U W_+^c$$

ve w , x^* 'da W^c 'ye teğettir. x^* 'da vektör alanı W^c boyunca, tek taraflı kararlılığa sahiptir; x^* W^c boyunca karardır ve W_+^c boyunca kararsızdır (Şekil 2).



Şekil 2. Çatallaşma Anında.

W_+^c tek bir sistem yörüngesidir. Çatallaşma meydana geldiği zaman W_+^u , W_+^c 'ye dönüşmektedir. Şimdi, çatallaşma yakınındaki dinamikleri basitleştirmek için daha ileri modelleme kabullerinin nasıl yapılacağı konusunu ele alalım. Kararlı denge noktası devam ediyorken; sistem durumu x 'in kararlı denge noktası, x_0^λ 'yı izlediğini vurgular. Başlangıç olarak x^* 'da ve λ çatallaşma değeri λ^* 'da sabit olduğu zaman $\dot{x} = X_\lambda(x)$ sisteminin dinamiklerinin x üzerinde nasıl davrandığını göz önüne almak gerekir. $W^s(x^*)$ kararlı uzayı, x^* 'dan uzaklaşan yörüngelerdeki W_+^c bölgesini, x^* 'a yaklaşan yörüngelerdeki W^c bölgesini, x^* etrafında ikiye böler.

Sistem durumu x , denge noktası x^* 'da kalmaz, çünkü x^* kararsızdır; W_+^c içeren bölgenin içindeki x 'in herhangi ufak bir bozulmada x 'in x^* 'dan uzaklaşması durumu oluşur. x^* 'dan uzaklaşan x gibi dinamikleri yakınlaştırmak ve basitleştirmek için, bozulma hakkında aşağıdaki kabulleri yapabiliriz [11,12].

$\dot{x} = X_\lambda(x)$ sisteminin eyer noktası çatallaşmasına sahip olduğunu ve sistem durum x 'in, x^* çatallaşma denge noktasında olduğunu farz edelim. Daha sonra x , x^* 'a çok yakın W_+^c üzerinde bir noktada bozucu sebebiyle, kararsız denge noktası x^* 'a geçer. Böylece çatallaşma esnasında x , W_+^c üzerinde bulunmak için çok az bozulur ve daha sonra sistem dinamikleri W_+^c boyunca x^* 'e hareket eder. X^* etrafındaki dinamikler, x^* 'da W_+^c boyunca lineerleştirilmiş dinamiklerin sıfır öz değeri tarafından bastırıldığı için W_+^c boyunca ilk hareket yavaş olur. Sistem durumunun x^* 'a daha fazla yakın olmadığı zaman, hareketin W_+^c boyunca hızlı olacağı beklenir.

Bozucunun, x^* 'in kararlı uzayının bir tarafı üzerinde W_+^c içeren bölgede, x^* dan x^* 'e hareket ettiğini farz edelim. W_+^c boyunca ilk hareketin yavaş ve x^* 'da lineerleştirmenin $(n-1)$ adet sıfır olmayan öz değerlerinin negatif olduğu için, bu bölgeden başlayan bütün yörüngeler W_+^c ye hızlı bir şekilde üstel olarak yaklaşır. Bu yüzden bozulmuş yörüngeler W_+^c üzerindeki eşit yörüngeler tarafından yerel olarak iyi bir şekilde yakınlaştırılmıştır.

W_+^c üzerindeki eşit yörüngeler tarafından bozulan yörüngelerin yaklaşmaları, bozucuları sınırlamaya eşdeğerdir. Diğer alternatif bozucu sonsuz küçük olduğu zaman neler olacağını düşünmek olabilir. Sistem durumu x , gerçekten W_+^c boyunca hareket ederdi, fakat x^* 'a sonsuz küçük yakın olarak başlayan W_+^c üzerindeki bir yörünge, W_+^c boyunca, sonlu bir uzaklığa hareketi sonsuz bir zaman almaktadır. Bu yüzden sonlu, küçük bozucuları ele almak tercih edilir. Bir eyer noktası çatallaşmasında tipik dinamikler "a" ve "b" pozitif sabitler olmak üzere;

$\dot{x} = ax^2$, $\dot{y} = -by$ denklemlerinin xy düzlemindeki dinamiklerini araştırarak elde edebilir. Bu durumda W_+^c pozitif x eksenidir.

$\dot{x} = X_\lambda(x)$ sistemini kararlı bir denge noktasının eyer noktası çatallaşmasında merkezi uzay tek boyutludur ve W_+^c merkezi uzayının kararsız kısmı tek bir sistem yörüngesidir. Çatallaşma sırasında, x_* denge noktası kararsızdır ve sistem durumu W_+^c boyunca hareket edecektir.

II. GÜÇ SİSTEMLERİNE UYGULANMASI

Sistem durumu x , bara açıları δ 'yı, bara açısal hızları w 'yi ve bara gerilimi genlikleri V 'yi içermektedir. Güç sistemi, $I=[\lambda_1, \lambda_2]$ aralığındaki değerlerle zamanın çok yavaş değişen bir fonksiyonu olan tek bir parametre λ 'ya

bağlı $\dot{x} = X_\lambda(x)$ formunda modellenmektedir. Burada λ parametresi tipik olarak bir reaktif güç talebi olmaktadır.

$\dot{x} = X_\lambda(x)$ güç sistem modeli, Γ_1 genel kümesi içindedir ve λ 'daki değişimler statik olarak modellenecek kadar yavaştır.

$\dot{x} = X_\lambda(x)$ sisteminin kararlı denge noktaları, sadece kendi kararlılık sınırları üzerinde birinci tip kararsız bir denge noktası ile eyer noktası çatallaşması tarafından gözden kaybolabilir ve böyle bir çatallaşmada, sistem durumu W_+^c yörüngesi boyunca hareket edecektir.

Çatallaşmanın dinamik sonuçları, durum uzayındaki W_+^c 'nin pozisyonu tarafından belirlenir. Örneğin W_+^c bir $x_2^{\lambda^*}$ kararlı denge noktasında x_* 'a katılabilir ve V gerilimleri W_+^c boyunca yaklaşık olarak sabit olabilir, fakat δ açısı W_+^c boyunca önemli boyutta değişebilir. Daha sonra çatallaşmanın sonucu $x_2^{\lambda^*}$ ulaşana kadar, kutup kaymasıdır. Sistem ardışıl olarak $x_2^{\lambda^*}$ 'ı izleyecektir.

$\dot{x} = X_\lambda(x)$ güç sistemi modelinin bir eyer noktası çatallaşmasına sahip olduğunu ve W_+^c 'nin W_+^c boyunca V 'nin bazı bileşenleri azalsın diye durum uzayında pozisyonlandırıldığını varsayalım. Bu durumda, x_* yakınında başlayan W_+^c boyunca durum vektörünün hareketi gerilim çökmesi için bir modeldir. W_+^c 'nin başlangıç yönü, x_* 'da jakobiyenin sıfır öz değerlerine ilişkin w öz vektörü boyuncadır. Bu durumda gerilim çökmesine ve kutup kaymasına neden olur.

Başlangıç geriliminin azalmasının yavaş olduğunu, W_+^c boyunca ilk hareketin yavaş olmasından dolayı açıklamaktadır. W_+^c boyunca sonraki hareketin, gerilimdeki hızlı bir azalış nedeniyle hızlı olacağı beklenmektedir. Bu çıkarımlar gözlenen gerilim çökmelerinin özellikleri ile yapısal olarak uymaktadır.

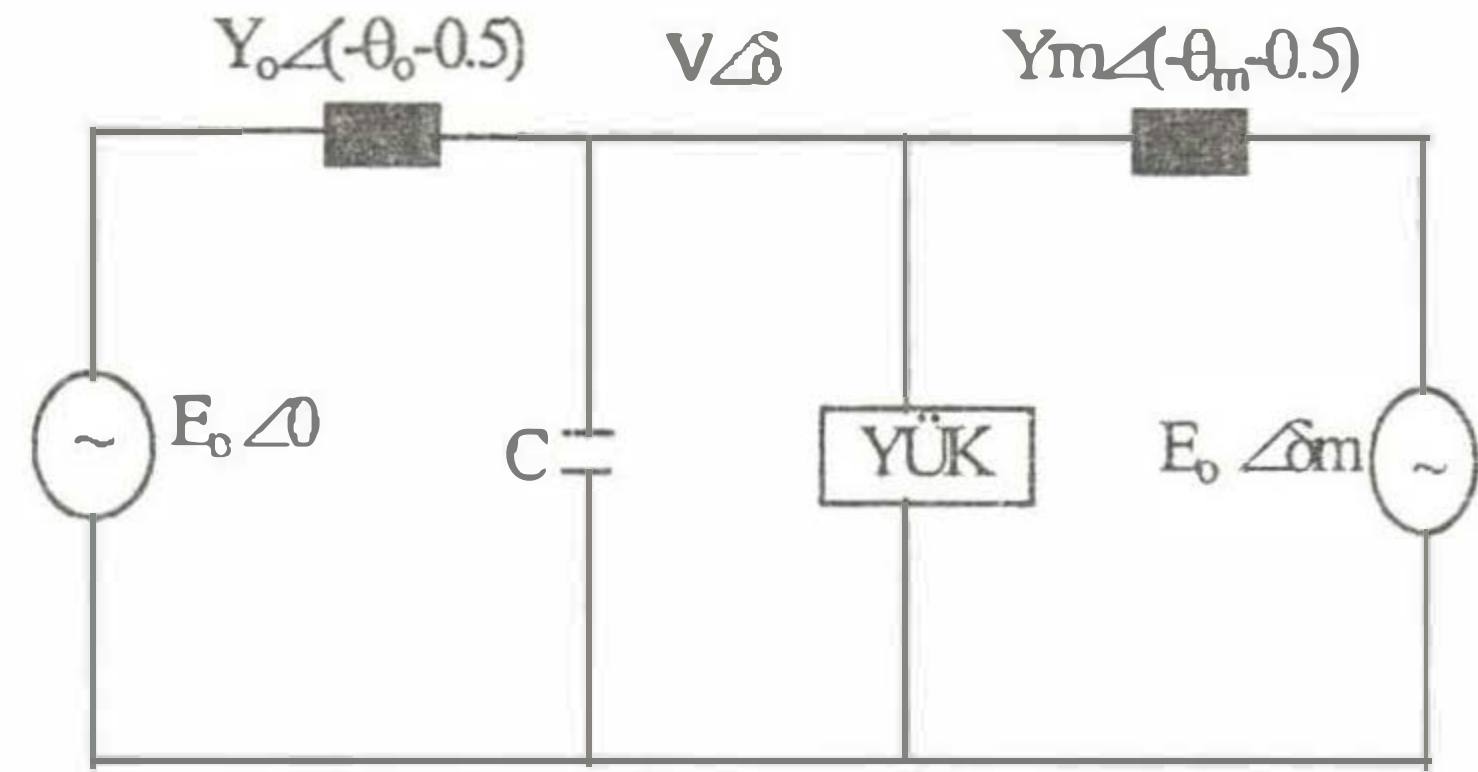
Bununla beraber diğer mekanizmalarda gözlemlenen yavaş başlangıç gerilim azalmasına katkıda bulunurlar. Bir eyer noktası çatallaşmasından önce sistemi ele alalım; sistem λ değişirken $x_0^{\lambda^*}$ 'ı izleyen sistem durumu

tarafından modellenenebilir. λ 'daki yavaş değişme yavaş olan $x_0^{\lambda^*}$ 'nın eşit hareketine neden olur.

Böylece gerilim genlikleri de çatallaşma anında olduğu kadar çatallaşmadan önce önemli miktarda yavaş olarak azalacaktır. Yük baralarındaki bir çatallaşma ile gerilim çökmesi arasındaki ilişki parametre değişimlerine çok yakından bağlıdır. Bir gerilim çökmesi ile ilgili bir çatallaşma olayında büyük bir oranda gerilim duyarlılığı bekleriz fakat, W_+^c boyunca müteakip hareket tarafından gerilim çökmesini açıklamayı tercih ederiz. Parametre değişimlerine karşı gerilim duyarlılığı hem kararlı hem de kararsız denge noktaları için tanımlanabilir. Fakat böyle bir duyarlılığın sadece kararlı denge noktalarında ortaya çıkacağı anlamı kabul edilemez. Çünkü kararsız bir denge noktasının yakınındaki herhangi bir çözüm o denge noktasını terkedecektir.

III. GÜÇ SİSTEM MODELİ

Gerilim çökmesi modelinin Şekil 1'deki gösterilen güç sistem modeline nasıl uygulanacağını göstermek için bu örnek önemlidir. Güç sistem modelinde, generatörlerden biri salınım barası diğeri ise sabit E_m gerilim genliğe ve salınım denklemi tarafından verilen açı dinamiklerine sahiptir.



Şekil 3. Basit bir güç sistemi.

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

Burada M , d_m ve p_m sırasıyla, generatör atalet momenti damping ve mekanik güçtür. Yük modeli, dinamik bir indüksiyon motoru ve paralel bağlı bir sabit p_Q yükünü

içermektedir. İndüksiyon motoru, δ frekansı ve V yük geriliminin terimlerinde motorun aktif ve reaktif p ve Q güçleriyle tanımlanabilir. PQ yükü ve motoru için birleştirilmiş model aşağıda çıkarılmıştır.

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

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

Burada P_0, Q_0 motorun P_1 ve Q_1 'de PQ yükünün sırasıyla aktif ve reaktif güçleridir. Yükün artan reaktif güç talebinde tekabül eden, Q_1 artışı sistem parametresi olarak seçilmiştir.

Yük gerilimi yaklaşık olarak 1.0 pu değerine çıkarmak için sabit bir C kapasitörü' de içermektedir. Kapasitör içeren devre yerine kapasitörlü devrenin Thevenin eşdeğerini elde ederek $E_0, Y_0,$ ve Q_0 yeniden düzenlenerek $E_0', Y_0',$ ve Q_0' elde edilir. Sistem tarafından yüklere enjekte edilen aktif ve reaktif güçler;

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

$$Q(\delta_m, \delta, V) = E_0' V Y_0' \cos(\delta + \theta_0') + E_m V Y_m \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) - (Y_0' \cos \theta_0' + Y_m \cos \theta_m) V^2 \quad (2.b)$$

Yukarıdaki eşitlikleri düzenleyip türevli terimleri eşitliklerin sol tarafına aldığımızda sistemin diferansiyel denklemlerini elde ederiz.

$$\dot{\delta}_m = w$$

$$M \dot{w} = -d_m w + P_m + E_m V Y_m \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin \theta_m$$

$$K_{qw} \dot{\delta}_m = -K_{qv2} V^2 - K_{qv} V + Q(\delta_m, \delta, V) - Q_0 - Q_1 \quad (3)$$

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

Böylece dinamik yük modeli (2) eşitliği, bu güç sistem modeli için (3) formundaki diferansiyel denklemleri çözer. Teori detayları kısmında gerekli olduğu gibi (3) denklemlerinin $S^1 \times R \times S^1 \times R$ durum uzayının, pozitif değişmez kompakt bir C alt kümesini elde ederiz.

Bu kompakt set aşağıdaki gibi olsun

$$S^1 \times [-W_1, W_1] \times S^1 \times [-V_1, V_1]$$

Burada, C pozitif değişmeyen bir kümesi olsun diye, C'nin sınırları üzerindeki vektör alanı noktaları yeteri kadar büyük seçilmiştir. Büyük w değeri için (3)

formunun 2. eşitliğinde $\dot{w} = -M^{-1} d_m w$ etkilidir. Aynı formun 4. eşitliğinde ise, büyük V değeri için

$$\dot{V} = (TK_{qw} K_{pv})^{-1} K_{pw} K_{qv2} V^2$$

terimi etkilidir.

Büyük w_1 ve V_1 için, vektör alanı $w = \pm w_1$ ve $v = \pm v_1$ hiper düzlemleri üzerinde olduğunu ve hiper düzlemlerin C'nin sınırlarının bölgesinde olduğunu gösterir. Bir eyer noktası çatallaşması $\delta_m, \delta, w, V, Q_1$ değişkenleri için, bu eşitliklerin sıfıra eşitlenen jakobiyenin determinantı ve sol tarafı sıfıra eşitlenen (3) denklemlerini çözerek bulunur.

Tablo 1. Yük parametre değerleri;

K_{pw}	=	0.4
K_{pv}	=	0.3
K_{qw}	=	-0.03
K_{qv}	=	-2.8
K_{qv2}	=	2.1
T	=	8.5
P_0	=	0.6
Q_0	=	1.3
P_1	=	0.0

Tablo 2. Şebeke ve Generatör değerleri;

Y_0	=	20.0
Q_0	=	-5.0
E_0	=	1.0
C	=	12
Y_0'	=	8.0
Q_0'	=	-12.0
E_0'	=	2.5
M	=	0.3
Y_m	=	5.0
θ_m	=	-5.0
E_m	=	1.0
P_m	=	1.0
D_m	=	0.05

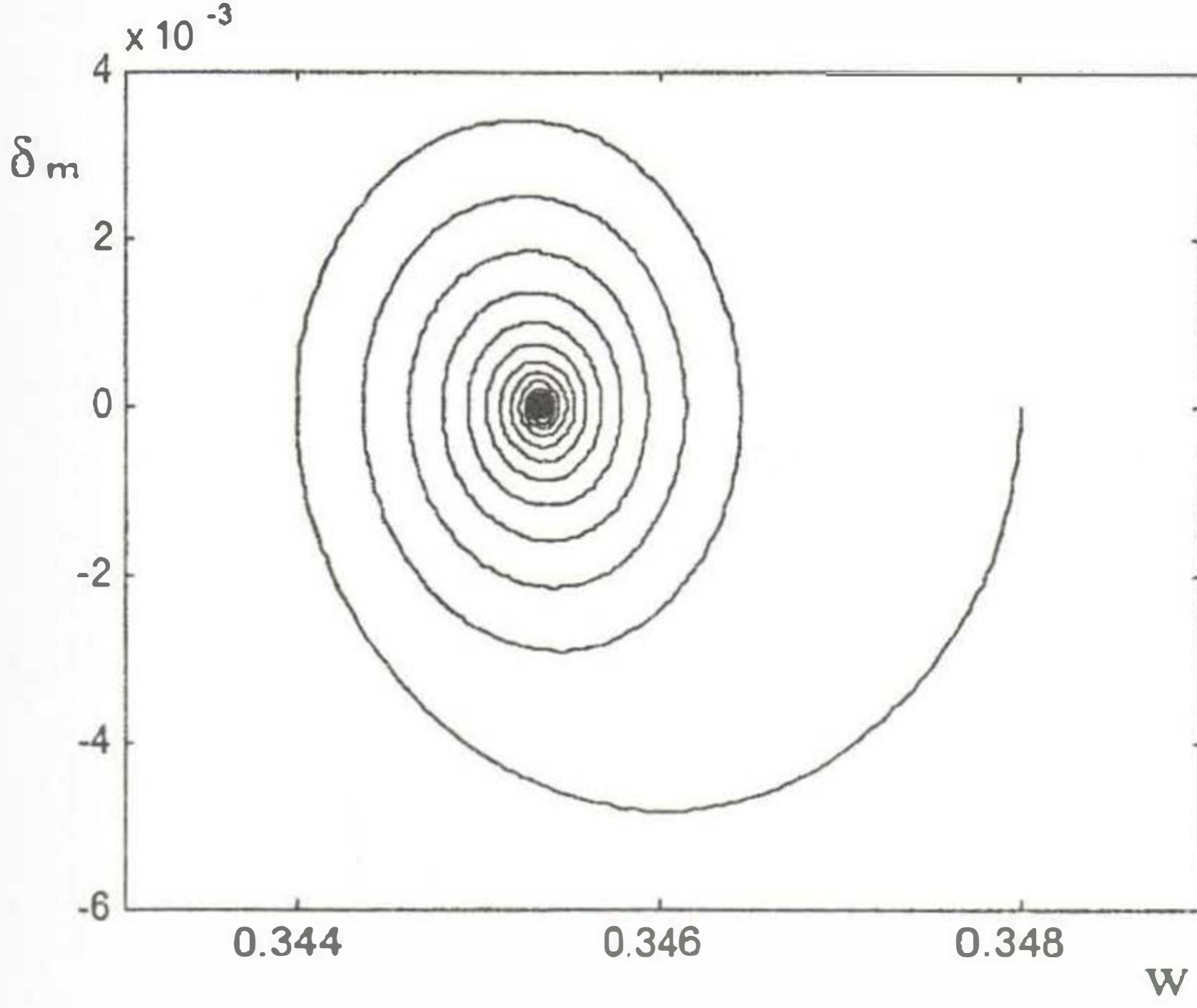
Derece olan bütün açılar hariç, bütün değerler birim değerdir. Parametreler 20° 'den küçük hat açıları ve 1 pu değerine yakın V gerilimi ile bir eyer noktası çatallaşması örneğini elde etmek için ayarlanmıştır.

Çatallaşma durumunda; $x_* = (\delta_m^*, w^*, \delta^*, V^*)$ ve parametre $Q_1^* = 11.41$ değerindedir. Buradaki bütün değerler, radyan olan açılar hariç, birim değerdir.

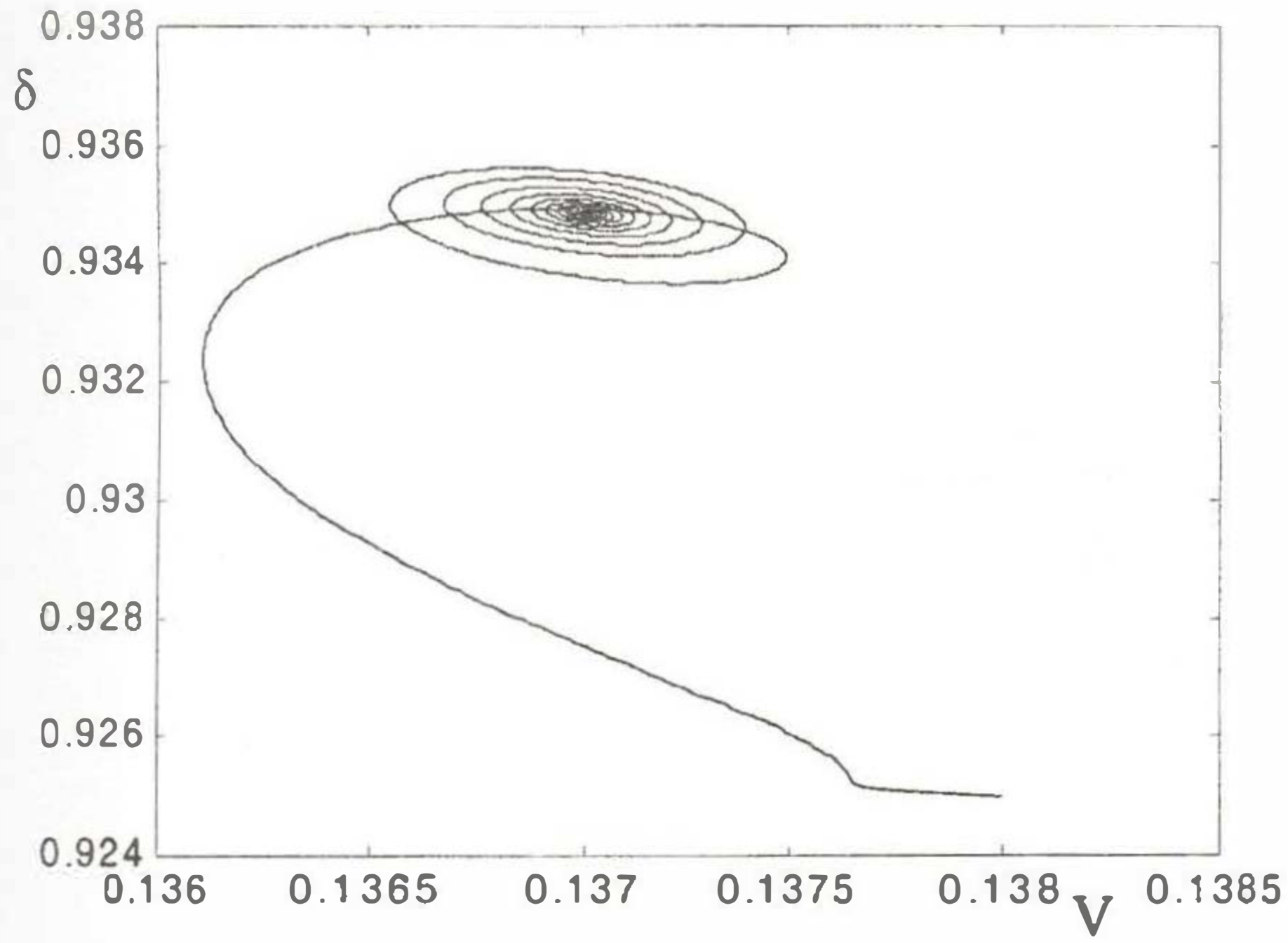
$$x_* = (0.348, 0.0, 0.138, 0.925)$$

W deki gerilimin göreceli olarak büyük negatif bileşeni, en azından başlangıçta, çatallaşmada gerilim azalsın diye W_+^c 'nin uygun olduğunu gösterir.

(3) formundaki denklemler, bu durumda W_+^c boyunca çökmenin karakterini belirlemek ve onaylamak için, w 'nin doğrultusunda x_* 'dan 0.01'e kadar yer değiştiren bir başlangıç şartından başlayarak sayısal olarak çözümler. İntegrasyon boyunca Q_1, Q_1^* 'da sabit tutulur.



Şekil 4. (0.348, 0.0, 0.138, 0.925) başlangıç şartları için 2 boyutlu kaos elde edilmesi.



Şekil 5. (0.348, 0.0, 0.138, 0.925) başlangıç şartları için 2 boyutlu kaos elde edilmesi.

IV. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bir Elektrik Güç Sistemi, yüklenme durumlarının bir aralığında kaotik bir sisteme dönüştüğü bilgisayar ortamında gözlemlenmiştir(Şekil 5,6). Sistem çok yüklü olduğunda oluşan sistem kararsızlığın bir tipide gerilim çökmesidir. Bu durum yüklerdeki artış sebebiyle sistemin çalışma noktasındaki yavaş bir değişim tarafından tanımlanabilir. Bu durumda hızlı ve ani bir değişim meydana gelene kadar gerilim genlikleri tedricen azalmaktadır. Gerilim çökmesi dinamiklerinin, geçici

olay kararsızlıkları için klasik olarak sorumlu olduğuna inanılan sadece generatör dinamikleri tarafından tanımlanamayacağı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- 1 Kapitaniak, T., "Chaos for Engineering", Springer-Verlag, 1998.(Book)
- 2 Canizares, C. A and Rosehart, W. D "Bifurcation analysis of induction motor loads for voltage collapse studies' Proc. NAPS M.I.T. Cambridge, Massachusetts, November 1996, pp 559-565
- 3 Kwatny, H.G, Pasrija, A. K and Bahar, L. Y "Static bifurcations in electric power networks: Loss of steady-state stability and voltage collapse" IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol 33, No 10, October 1986
- 4 Canizares, C. A, "Conditions for saddle-node bifurcations in ac/dc power systems" Int. J. of Electric Power & Energy Systems, Vol 17, No 1 February 1995, pp. 61-68
- 5 Canizares, C. A and Alvarado, F. L "Point of collapse and continuation methods for large ac/dc systems " IEEE Trans. Power Systems, Vol 8, No 1, February 1993, pp 1-8
- 6 IEEE, "Special Publication 90TH0358-2-PWR "Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience", 1990
- 7 Atabek, H., Uyaroğlu, Y., Yalçın, M.A., Köklükaya, E., "Enerji İletim Sistemlerinde Yük Artışlarının Gerilim Kararlılığına Etkileri", 8. Ulusal Kongre, Gaziantep, 1999
- 8 C.W. Taylor, Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, New York, 1993. (Book)
- 9 Chiang H, Dobson. I , Thomas, R., " On Voltage Collapse in Electric Power Systems", IEEE Power Systems, Vol. 5, No:2, May, 1990
- 10 Yalçın, M.A., "Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Yeni Bir Yaklaşımla İncelenmesi", Doktora Tezi, İTÜ, E-E Fakültesi, İstanbul, 1995
- 11 Ian Dobson, "Observation on the Geometry of Saddle Node Bifurcation and Voltage collapse in Electrical Power Systems", IEEE Circuits and Systems, Vol 39, No 3, March 1992
- 12 Canizares, C. A "On bifurcations, voltage collapse and load modeling" IEEE Trans. Power Systems, Vol 10. No 1, February 1995, pp. 512-522