KADEME DEĞİŞTİRİCİ TRANSFORMATÖRLERN ÇATALLAŞMA ANALİZİ İLE DİNAMİK GERİLİM KARARLILIĞI

Kadir ABACI[1] Ercan KÖSE[2] Mehmet Ali YALÇIN[3] Yılmaz UYAROĞLU[4]

Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü[1,2]
Mersin Üniversitesi, Tarsus Teknik Eğitim Fakültesi, Mersin

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Sakarya Üniversitesi, Esentepe Kampüsü, Sakarya

[1]e-posta kabaci@emersin.edu.tr [2]e-posta ekose@mersin.edu.tr [3]e-postayalcin@sakarya.edu.tr
[4]e-posta uyaroglu@sakarya.edu.tr

ÖZET

Son zamanlarda gerilim kararlılığı ve gerilim çökmesi olayı güç sistem analiz ve kontrolünde çok önemli bir konu olmaya başlamıştır. Bu problemin çözümü için statik ve dinamik yaklaşımlar yapılarak analizler gerçekleştirilmektedir. Güç sistemlerinin giderek kararlılık sınırlarına yakın noktalarda çalışmaya başlaması nedeniyle yapılacak analizlerde dinamik yaklaşımların yapılması zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Güç sistemlerinde yüklenebilirlik sınırlarının tespiti ve dinamik analizler çatallaşma teorisi ile ilişkilendirilmesi sonucuna bağlı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada çatallaşma teorisine dayanılarak kararlı bir denge noktasından uzaklaşan basit bir güç sisteminin çatallaşma analizi ile dinamik gerilim kararlılığı analizi gerçekleştirilmiş ve bulunan sonuçlar verilen teori detaylarıyla ilişkilendirilerek sistemin durum uzayında davranışı incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Gerilim kararlılığı,Kademe değiştirici transformatörler(KDT), Çatallaşma Analizi,

1.GİRİŞ

Sürekli yük artımı ile birlikte ekonomik ve çevresel baskılar güç sistemlerini kararlılık limitine yakın noktalarda çalışmaya zorladığından kararlılık sınırları azalmaya ve gerilim kararlılığı kritik bir konu olmaya başlamıştır [1]. Doğrusal olmayan büyük bir enterkonnekte güç sistemi, sürekli haldeki bir çalışma noktasından uzaklaştığı zaman çok karmaşık olaylar göstermektedir. Ekonomik ve çevre baskıları yeni iletim ve üretim kapasitesi artırımını sınırladığı için güç sistemleri gittikçe daha da çok yüklenmektedir. Bu aşırı çalışma koşulları altında, büyük elektrik işletmesinin devre dışı kalmasına neden olan gerilim çökmesi olarak da adlandırılan yeni bir kararsızlık problemiyle karşı karşıya kalınmaktadır.

Son zamanlarda çoğu büyük elektrik güç sistemlerinin devre dışı kalması sistemin hatalara vermiş olduğu dinamik cevap tarafından olmaktadır. Üstelik ekonomik ve çevresel baskılar güç sistemlerinin kararlılık limitlerine daha çok yakın çalışmalarına sebep olmaktadır. Böylece güç sistemlerinin dinamik değerlendirilmesi hızla önem kazanmaktadır. Doğrusal olmayan bölgelerde çalışmaya zorlanan güç sistemlerinin dinamik analizlerinin yapılabilmesinin önemi gitgide artmaktadır. Bu analizlerin yapılmasında çatallaşma teorisi oldukça yaygındır.

Çatallaşma teorisi güç sistemlerindeki açısal kararlılık ve gerilim kararlılığı gibi değişik sorunların analizinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir [2]. Bir güç sisteminin dinamik davranışı bir parametre değişimiyle değiştirildiği zaman güç sistemlerinde çatallaşmalar doğmaktadır [3].

Bir parametre kritik bir değere geçerken bir çift denge noktasının ortadan kaybolması olan, eyer noktası çatallaşması meydana gelir. Doğrusal olmayan dinamik olaylarda hem temel bir çatallaşmadır, hem de çatallaşmanın ya da bir süreksizliliğin en basit örneğidir [4]. Eyer noktası çatallaşması(ENÇ) durumunda, kararlı denge durumuna meyilin kesilmesi süreksiz bir çatallaşmayı gösterir.

Güç sistemlerinde ENÇ, gerilim çökmesi problemleriyle ilişkilendirilerek sistemin dinamik kararsızlığı için temel bir fikir verir. Gerilim kararsızlığına neden olan reaktif güç eksiğinin sisteme enjekte edilmesi ve yük barasındaki gerilimin istenilen değerlerde tutulmaya çalışılması için KDT'ler kullanılır.

Bu çalışmada, bir eyer noktası çatallaşmasında kararlılığının gözden kaybolduğu zaman, kararlı halin ortadan kalktığı tanımlanmış ve çatallaşma olayından sonra sistem dinamiklerinin basit bir gerilim çökmesi modeli sunulmuştur. Kararlılığın geliştirilmesi amacıyla hat sonunda KDT uygulaması yapılan basit bir güç sisteminde çatallaşma teorisine göre sistemin kararlılık sınırları belirlenerek durum uzayında davranışı gözlemlenmiştir.

2. ÇATALLAŞMA TEORİSİ

Çatallaşma terimi, dinamik sistemlerde meydana gelen sistem parametrelerindeki en ufak değişimlerin, faz uzaylarındaki yapısal değişimlerine karşılık gelir. Böyle bir değişimde meydana gelen parametre değeri, kritik parametre değeri olarak adlandırılır. Çatallaşma terimi ilk olarak bir grup diferansiyel denklem eşitliklerinin denge çözümlerinin bulunduğunu tanımlamak için kullanılmıştır.

Çatallaşma teorisi doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde anahtar rol oynamaktadır. Sistemdeki anlık değişiklikler, sistemi kararlı normal durumundan artarak uzaklaştırmakta, bu da elektrik güç sisteminde gerilim çökmesini ve kaos olaylarını beraberinde getirmektedir.

2.1 Çatallaşma Analizi

Bir çizgi üzerindeki vektör alanlarının dinamiği çok sınırlıdır; tüm çözümler ya bir dengeye oturur ya da $\pm\infty$ 'a gider. Dinamiğin bu basitliği yanında tek boyutlu sistemlerin ilginçliği parametrelere olan bağlılıktır. Akışın nitel özellikleri parametrelerdeki değişime bağlı olarak değişebilir. Yani sabit noktalar oluşturulabilir, yok edilebilir veya bu noktaların kararlılığı değişebilir. Dinamikteki bu değişmelere çatallaşma, değişimin görüldüğü parametre değerlerine de çatallaşma noktaları denir [5].

Çatallaşma noktası x durum değişkeni ve λ sistemi bir denge noktasından diğer bir noktaya taşıyan bir sistem parametresi olmak üzere aşağıdaki denklemle bulunabilir [6] .

$$f(x,\lambda)=\dot{x} \tag{2.1}$$

2.2 Eyer-Noktası çatallaşması

Bu çatallaşma en temel çatallaşmadır. Eyer-noktası çatallaşması (ENÇ) sabit noktaların yaratılması veya yok edilmesini sağlayan temel mekanizmadır. Bir parametre değiştirilmedikçe iki sabit nokta birbirine doğru hareket eder, çarpışır ve birbirini yok eder [5]. Bir eyer-düğüm çatallaşmasında genellikle biri kararsız bir diğeri kararlı olan noktalar eyer-düğüm noktasında birleşmeye başlarlar ve tam çatallaşma noktasında iki nokta kaybolur. Bu noktada Jakobiyen sıfır bir özdeğere sahiptir ve Jakobiyen'ın determinantı sıfırdır. Bu noktada seçilen parametre değeri çatallaşma değerini almıştır. Böylece eyer-düğüm çatallaşması için gerekli şartlar aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{gathered} f(x_0,\lambda_0)=0 \\ \det \mathbf{J}\,(f(x_0,\lambda_0))=0 \end{gathered} \tag{2.2}$$

ENÇ güç sistemlerinde gerilim çökmesi problemleriyle ilişkilendirilerek sistemin dinamik kararsızlığı için temel bir fikir verir [7], [8], [9].

2.3 Güç Sistemlerinde Çatallaşma Analizi

Güç sistemlerinde parametre değişimine bağlı olarak çok karmaşık dinamik olaylar gözlenebilmektedir. Bu olaylardan en yaygın olanı yük artışı meydana geldiğinde sistemin denge noktalarının çatallaşmasıdır.

2.3.1 Güç Sistemlerinde Çatallaşma Olayları

Son zamanlarda büyük güç sistemlerinde meydana gelen sistem çökmeleri, sistem baralarındaki gerilim genliklerinde, giderek artış gösteren bir azalma ile karakterize edilmektedir. Gerilim çökmesi mekanizmaları, iyi tanımlanamamakta ve sistem dinamikleri iyi anlaşılamamaktadır.

Bazı kararlı denge noktalarının yollarının kesilmesi ile oluşan herhangi bir çatallaşma için eş anlamlı olarak, çatallaşma ve süreksiz çatallaşma terimleri kullanılmaktadır.

Yıkıcı ve sürekli çatallaşmaların gözlemlerine dayanarak, yaklaşık olarak $\lambda=\lambda_c$'de, üst kritik değerli çatallaşmaları, alt kritik değerli çatallaşmadan daha fazla olma olasılığı beklenebilir.

Sonuçlar genellikle herhangi bir tek parametreli dinamik sisteme uygulanmaktadır. Daha sonra bu sonuçlar güç sistemlerinde, gerilim çökmesi için bir model önermede kullanılır. Bu model, gerilim çökmesi dinamikleri için, açık bir mekanizma sağlamaktadır.

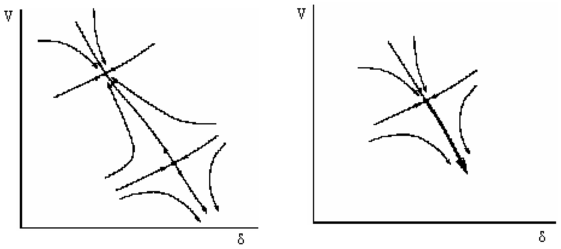
2.3.2. Kararlılık ve gerilim çökmesi

Geleneksel güç sistemi kararlılık analizleri rotor ve frekans osilasyonları problemleri ile ilgilidir. Bu yüzden generatör geriliminin kontrolünün modellenmesi ve yük dinamikleri basitleştirilebilir.

Güç sistemleri gittikçe daha karmaşık hale gelmesi ve daha fazla yüklenmesi nedeniyle, Gerilim çökmesi olayı gittikçe daha ciddi problem olmaya devam etmektedir. Basit olarak gerilim çökmesi sürekli haldeki durumunu kaybetmesi ve sistem parametrelerinin yavaşça değişim göstermesi ile açıklanabilir. Gerilim çökmesinin tam bir analizi için önemli dinamik mekanizmaları ele almalıyız.Gerilim çökmesi konusunda ilk önemli konu modelleme, ikincisi ise analitik metotların geliştirilmesidir.

2.Bölüm'de çatallaşma analizi hakkında kısaca bilgi verilerek Denklem (2.2)'e göre sistemin eyer noktasının (ENÇ) nasıl bulunacağı açıklanmıştı. P-V eğrileri üzerinde kritik noktaya kadar olan yüklenmelerde iki adet denge çözümleri mevcut olup kritik noktada sadece bir tek değere ulaşılmaktadır. Bu değer sistemin eyer noktası olarak bilinen kritik güç değeridir. Eğer yük daha da artacak olursa kararsız bölgeye girileceğinden çözümün olmayacağı aşikârdır.

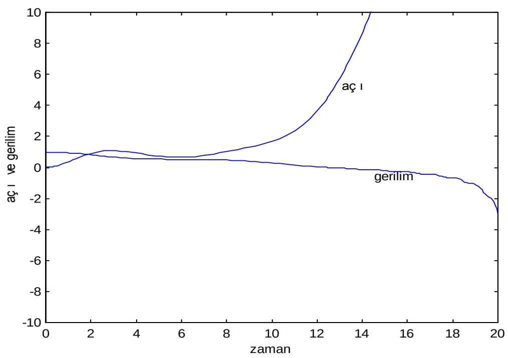
Farklı yüklenme noktalarında gerilimin büyüklüğü V ve açısı δ arasındaki V- δ grafikleri sistemin durum uzayını göstermesi açısından son derece faydalıdır. Bu grafikler üzerinde sistem dinamikleri açıkça görülebilmektedir. Şekil 1.a'da okların birleşme noktasına doğru yönelmekte olduğu görülmektedir. Bu nokta bir denge noktasıdır ve burada yüksek değerdeki gerilimden başlayan okların denge durumuna yöneldikleri söylenebilir. Bu durumda sistemin kararlı çalışma bölgesinde olduğu ve P-V eğrisinin üst kısmındaki yörüngeyi izlediği söylenebilir. Şekil 1.b'de ise bunun tam tersi bir durum söz konusudur. Yani oklar burada denge noktasından hızla uzaklaşarak gerilimin hızla azalmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla gerilimin kararsız çalışma bölgesinde kaldığı yani P-V eğrisinin alt kısmındaki yörüngeyi izlediği sistemin çatallaşma noktası değerinde olduğu ve okların denge noktasından uzaklaşarak sistemi kararsızlığı götürdüğü söylenebilir. Bu durumda açı (*δ*) artmakta gerilim ise (*V*) hızla azalmaktadır. Bu dinamik hareket gerilim çökmesi mekanizmasını açıklamaktadır.



a) b)

Şekil 1. Yüklenme miktarına bağlı olarak durum uzaylarının gösterimi a) Çatallaşma Öncesi b) Çatallaşma Anında [8]

Şekil 2.'de yavaş bir şekilde yüklenen bir sistemde zamanla gerilim ve açı değişimi görülmektedir. Çatallaşma noktasından itibaren gerilim ve açının izlediği yörünge çökme mekanizmasının anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Çatallaşmadan önce statik eşitlikler statik gerilim kararlılığını analiz edebilir. Ancak, çatallaşma noktasında bu eşitlikler yeterli olamaz. Bu nedenle dinamik modellere ihtiyaç duyulmaktadır.



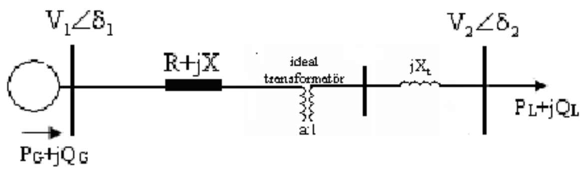
Şekil 2 Gerilim çökmesi esnasında gerilim ve açının zamanla değişimi

3. KADEME DEĞİŞTİRİCİ TRANSFORMATÖRLER

Kademe değiştirici transformatörler kademe ayarını değiştirerek bara gerilimini istenilen değerde tutup reaktif güç akışını düzenlemek için kullanılan gerilim kontrol cihazlarıdır.

3.1. KDT uygulaması

Şekil 3'de hattın sonuna KDT eklenen iki baralı basit bir sistem gösterilmiştir.



Şekil 3. İki baralı hat sonunda KDT olan basit güç sistemi

Bu sistem için temel generator modeli dinamik bağıntıları kullanılarak generator modeli, yük için ve gerilime bağımlı dinamik eşitlikler aşağıdaki gibi verilebilir [7].

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

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

$$\dot{V}_2 = \frac{1}{\tau}(Q_L - Q_D) \qquad (3.3)$$

Burada sırasıyla M ve D_G generator eylemsizlik ve sönümleme , τ ise yüke ait gerilim zaman sabitleridir. Denklem (2.1)'e göre sistemin durum değişkenleri vektörü $\dot{x} = [w; \delta, V_2, P_d]$ şeklindedir. KDT'nin Denklem (3.4)'te verilen sürekli hal modeli eklenince sistemin durum değişkenleri vektörü $\dot{x} = [w; \delta, V_2, P_d, a]$ şeklini alır.

$$T_c\,\dot{a} = -V_2 + V_2^0 \qquad a^{max} \le a \le a^{min} \qquad (3.4)$$

KDT'nin bu modeli $a(t)$ 'nin sürekli bir şekilde değişimine dayanır. $a(t)$ a_{min} ile a_{max} arasındaki tüm gerçek değerleri alabilir. Genellikle sürekli kademe değiştirici modelde ayarlanan band sınırlarının etkisi ihmal edilir. Bu nedenle diferansiyel eşitlik aşağıdaki gibi [10] yazılabilir.

Denklem (3.4) kullanıldığı zaman kademe değiştiricinin bir integral karakteristik kontrollu olarak modellendiğine dikkat edilmelidir. Sürekli kademe değiştirici modeli ayrık kademe değiştirici modellerinden daha az doğrudur, fakat faydalı bir yaklaşımdır. Özellikle analitik çözümlemeler için elverişlidir. Ayrıca orta ve uzun süreli gerilim çökmeleri problemlerinde daha çok etkili olan KDT'lerin yavaş dinamikleri nedeniyle modelde kullanılan T_C süresinin seçimi önemlidir. Hat sonuna KDT ilave edilmesi durumunda Şekil 3'de verilen sistem için güç akışı eşitlikleri de aşağıdaki gibi olur.

$$P_G = \frac{B_L\xi X + \zeta^2}{a^2 X_t\zeta + X} a V_1 V_2 \sin\delta \qquad (3.5)$$

$$P_L = \frac{1}{a^2 X_t\zeta + X} a V_1 V_2 \sin\delta \qquad (3.6)$$

$$Q_L = \frac{a V_1 V_2 \cos\delta - V_2^2 a^2 \zeta}{a^2 X_t\zeta + X} \qquad (3.7)$$

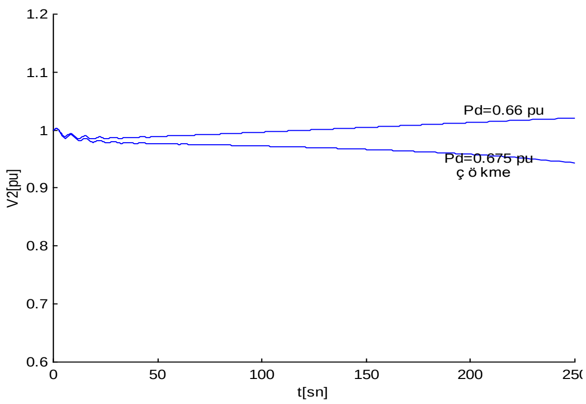
Burada B_L hattın toplam şönt kapasitesini göstermektedir ve simulasyon boyunca ihmal edilmiştir (B_L =0). Ayrıca hattın reaktansı X=0.5 p.u, $\xi = \zeta = 1$ olmak üzere hattın sabit parametrik değerleridir. Sabit güç faktörü altında (k =tanΦ) Sürekli halde yük talebi (P_d) reaktif talep gücüyle orantılı olacak şekilde Q_d=k.P_d olarak alınmıştır. Generatör barasından üretilen ve yük barasından talep edilen güç sırasıyla P_G + jQ_G ve P_d + jQ_d şeklindedir. Kararlılık analizini basitleştirmek için tüm simulasyonlar boyunca hattın direnci ihmal edilmiş

(R=0), ve mekanik güç talep güce eşit alınmıştır P_m=P_d. Yük barasından 0.6 +j0.2 p.u değerinde yük çekildiği farz edilmiştir. KDT'nin kaçak reaktansı X_t=0.1 p.u olarak alınmıştır. KDT'ye ait zaman sabiti T_C=120s dir.

3.2.1. Çatallaşma analizi

Şekil 3'de verilen güç sisteminin durum değişkenleri vektörü $\dot{x}=[w;\delta;V_2;P_d;a]$ şeklini alacaktır. Çatallaşma Teorisine göre yapılan analizler sonucu sistemin çatallanma parametresi (λ_{KDT}=1.12) bulunmuştur. Buna göre sistemin maksimum yüklenme değeri $P_d^{KDT\max} =$ 0.672 p.u aynı zamanda sistemin çatallaşma noktasıdır. Burada yük barasındaki gerilimin KDT kademe oranının değişimiyle 1.0 pu değerine getirilmesi amaçlanmıştır. Bu durumda sistemin durum değişkenleri vektörünün limit noktalarına ait değerler $\dot{x} = [0.0;0.6573;1,0;0.672;0.588]$ olarak bulunmuştur. Bu değerler yardımıyla sistemin sürekli halde kararlılık analizlerini gerçekleştirmek mümkündür.

Yapılan çalışmanın bir başka bölümünde sistemi çökmeye götüren yüklenme noktası civarında yüklendiğini farzederek iki çalışma noktası belirleyelim. Bunlardan ilki sürekli halde λ^1 =1.11 yük artımı ile yani $P_d^1 = 0.66$ p.u değerinde ve λ^2=1.125 ile yani $P_d^2 = 0.675\,p.u$ değerinde yüklendiğini varsayalım. Bu durumda $P_d^1 < P_d^{KDT\max} < P_d^2$ olduğundan sistemin kararlı ve kararsız bir davranış göstereceği aşikardır. Simulasyon sonuçları da bekleneni göstermiştir. Her iki çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimini izlemek amacıyla Şekil 4 çizdirilmiştir .

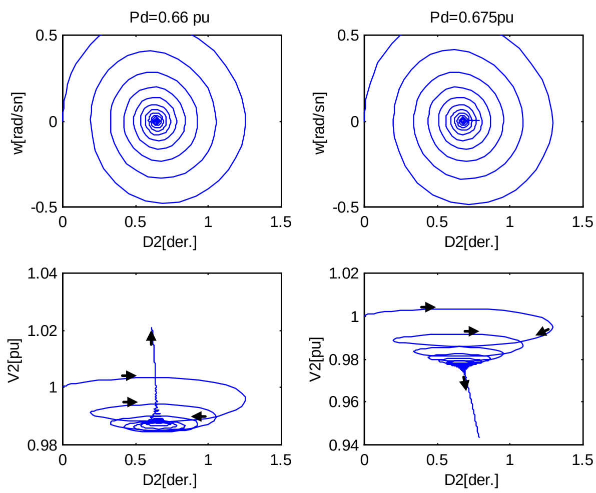


Şekil 4. Kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı ça noktası için gerilim -zaman değişimi

3.2.2. Güç sisteminin durum uzayında davranışı

Faz uzayında daha önce belirlenen her iki çalışma noktası için sistemin davranışlarını incelemek amacıyla Şekil 5'de çizdirilmiştir. Şekil 5c'de sistemin yüklenme değeri $P_d^1 < P_d^{KDT\max}$ olduğundan sistemin bir denge noktasına doğru ilerlediği açı ve gerilim oklarından anlaşılmaktadır. gibi sistemin yüklenme değeri $P_d^2 > P_d^{KDT\max}$ olduğunda bu durum, sistemi önce kaosa sürükleyecek ve ardından gerilim çökmesi tetiklenecektir (Bkz. Şekil 5d). Dikkat edilirse gerilim yüksek bir değerden aşağıya inmekte ve denge noktasından hızla uzaklaşmaya başlanmıştır. Aynı durum açı oku içinde söylenebilir.

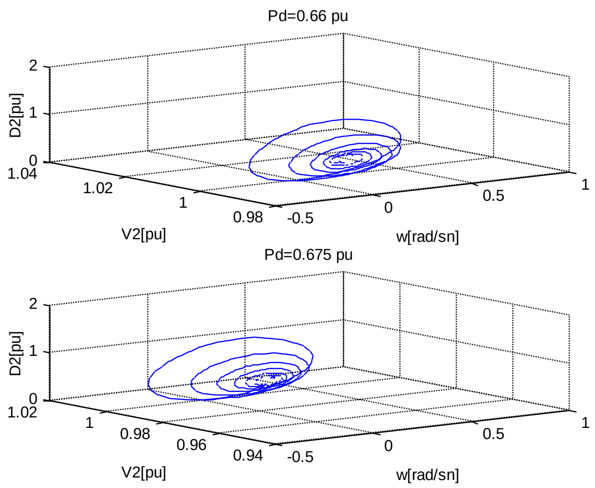
a) b)



c) d)

Şekil 5. KDT'li sistem için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri a) (w)-(δ_2) b) (w)-(δ_2) c) (V_2) -(δ_2) d) (V_2) -(δ_2)

Şekil 6'da sistemin ağır yüklenme şartları altında faz uzayında davranışını göstermektedir. Sistemin bu çalışma şartları için 3 boyutlu durum uzayındaki yörüngelerin davranışı bu şekilde görülmektedir. Burada da kararlı ve kararsız durumlar gözükmektedir.



Şekil 6. (z=0) için kritik yüklenme seviyesi civarında iki farklı çalışma noktası için faz portreleri (üstte kararlı, altta kararsızlık görülmekte)

4. SONUÇLAR

Güç sistemlerinin giderek daha da karmaşık hale gelmesi nedeniyle gerilim kararlılığı analizlerinde statik yaklaşımlar yetersiz kalmakta bu nedenle dinamik analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Güç sisteminin dinamik modeli oluşturularak elde edilen diferansiyel cebirsel denklem sisteminin analizi yapılmış ve Eyer-düğüm noktası çatallaşması ile güç sisteminin kararlılık sınırları belirlenmiştir. Ayrıca çatallaşma teorisine dayanılarak basit bir güç sisteminin dinamik gerilim kararlılığı analizi gerçekleştirilmiş ve bulunan sonuçlar verilen teori detaylarıyla ilişkilendirilerek sistemin durum uzayında davranışı açıklanmıştır (Bkz. Şekil 5 ve 6) Ayrıca hat sonuna eklenen bir KDT ile sistemin kararlılık sınırları bulunmuştur. Sistemin kararsız noktalardaki davranışı çatallaşma analizi ile durum uzayında incelenmiştir.

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] Saffet Ayasun, "Tekil Noktaların Güç sistemlerin Dinamiğine olan Etkileri", Elektrik-Elektronik– Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi ,Sayfa 28-31,

[3] Yılmaz Uyaroğlu, Mehmet A. Yalçın, "Elektrik Güç sistemlerinde Salınım Dinamiklerinin Kaotik Olaylarının İncelenmesi", Elektrik-Elektronik– Bilgisayar- Mühendisliği sempozyumu, Sayfa 60-64,Bursa 2002

[4] Steven.H.Strogatz, "Nonlineer Dynamics and Chaos", Westwiew press,2000

[5] V.Ajjarapu, B.Lee, "Bifurcations theory and its application to nonlinear dynamical phenomena in an electrical power system", IEEE Trans. on Power Systems,Vol.17,No.1,pp.424-431,1992

[6] I.Dobson, Hsiao-Dong Chiang , "Towards a theory of voltage collapse in electric power systems", Syst. Control Lett, ,Vol.13,,pp.253-262,1989

[7] IEEE Special Stabi,lty Controls Working Grouph, "Static Var compensator models for power flow and dynamic performance simulation", IEEE Trans. on Power Systems,Vol.9,No.1,pp.229-239,February,1994

[8] "Voltage stability assesment:Concepts,practices and tools",IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publicatio,Product No.SP101PSS,Final document, August 2002

[9] Zeno T.Faur, "Effects of FACTS devices on Static Voltage Collapse Phenomena" , Master's Thesis, university of Waterloo, Ontario, 1996

[10] Cutsem T. V. , Vournas, Electric Power Systems. *Kluwer Academic Publishers*, 1998.