

HAT SONUNDA SVC BULUNAN GÜÇ SİSTEMİNDE ÇATALLAŞMA ANALİZİ İLE DİNAMİK GERİLİM KARARLILIĞININ İNCELENMESİ

Kadir ABACI, Murat YILDIZ, Mehmet Ali YALÇIN ve Yılmaz UYAROĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Sakarya Üniversitesi, Esentepe Kampüsü, Sakarya
kabaci@engineer.com, myildiz@sakarya.edu.tr, yalcin@sakarya.edu.tr, uyaroglu@sakarya.edu.tr

ÖZET

Güç sistemleri gerilim kararlılığı çalışmalarında çatallaşma analizi oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Çatallaşma noktasının belirlenmesi ile sistemin yüklenebilirlik sınırları tespit edilerek, planlama ve kontrol çalışmalarında kullanılmaktadır. Bu çalışmada kararlı bir denge noktasından uzaklaşan bir güç sisteminin çatallaşma analizi ile dinamik gerilim kararlılığı analizi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Güç Sistemi, Çatallaşma Noktası, Gerilim kararlılığı, SVC

INSPECTION OF DYNAMIC VOLTAGE STABILITY OF POWER SYSTEMS USING SVC AT LINE ENDS VIA BIFURCATION ANALYSIS

ABSTRACT

Bifurcation analysis is often used in power system voltage stability studies. Loadability limits of system are determined by determination of bifurcation point and then it is used in planning and control studies. In this study, dynamic voltage stability analysis of a power system that deviates from a stable equilibrium point has been realized by bifurcation analysis.

Keyword: Power system, bifurcation point, Voltage Stability, SVC

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 sebep olmaktadır. Üstelik ekonomik ve çevresel baskılar güç sistemlerinin kararlılık limitlerine daha çok yakın çalışmalarına sebep olmaktadır. Böylece güç sistemlerinin dinamik değerlendirilmesi hızla önem kazanmaktadır.

Bir güç sisteminin dinamik davranışı bir parametre değişimiyle değiştirildiği zaman güç sistemlerinde çatallaşmalar doğmaktadır [2].

Çatallaşma teorisi güç sistemlerindeki açılabilir kararlılık ve gerilim kararlılığı gibi değişik sorunların analizinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir [3]. Çatallaşma olaylarını sürekli hal ve süresiz hal çatallaşma olayları olarak sınıflandırmak çok yararlıdır. Süresiz çatallaşma

olayları durumunda sistem nominal değerinden sonsuz bir değere ulaşmaktadır.

Bir parametre kritik bir değere geçerken bir çift denge noktasının ortadan kaybolması olan, eyer noktası çatallaşması doğrusal olmayan dinamik olaylarda temel bir çatallaşmadır, hem de çatallaşmanın ya da bir süreksizliliğin en basit örneğidir. Çatallaşmaların diğer örnekleri, alt kritik değer Hopf çatallaşması ve alt kritik değer Pitchfork çatallaşması gibi alt kritik değer formunda gözükten bütün çatallaşmalardır [4]. Eyer noktası çatallaşması durumunda, kararlı denge durumuna meyilin kesilmesi süreksiz bir çatallaşmayı gösterir.

λ 'nın negatif değerleri için sistem daima bir kararlı ve bir kararsız olmak üzere iki denge noktasına sahiptir. λ eğer sıfıra ulaşırsa sistem kritik tek noktaya sahip olur. λ 'nın pozitif değerlerinde ise sistemin herhangi bir denge noktası yoktur. Denge noktalarının sayılarındaki bu değişimler çatallaşma olarak adlandırılmaktadır[5].

Bu çalışmada, bir eyer noktası çatallaşmasında kararlılığının gözden kaybolduğu zaman, kararlı halin ortadan kalktığı tanımlanacak ve çatallaşma olayından sonra sistem dinamiklerinin basit bir gerilim çökmesi modeli sunulacaktır. Kararlılığın geliştirilmesi amacıyla hat sonunda SVC (static VAR compensator) 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 değişimlere çatallaşma, değişimin görüldüğü parametre değerlerine de çatallaşma noktaları denir [6].

Çatallaşma noktası aşağıdaki denklemle bulunabilir.

$$f(x, \lambda) = x \quad (2.1)$$

Burada x durum değişkeni ve λ sistemi bir denge noktasından diğer bir noktaya taşıyan bir sistem parametresidir [7].

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 [6]. Bir sistemde çatallaşma şartları $f_x(x_0, \lambda_0)$ bir tek basit özdeğere sahip olmak üzere aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\begin{aligned} D_x f_0^T w = D_x f_0 v = 0 \\ w^T \frac{df}{d\lambda} \Big|_0 \neq 0 \\ w^T [D_x^2 f_0 v] \Big|_0 \neq 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Burada D_x jakobiyen matrisi, v sağ öz vektörü, w sol öz vektörü göstermektedir [8]. 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'in determinantı sıfırdır. Bu noktada seçilen parametre değeri çatallaşma değerini almıştır. Böylece eyer-düğüm çatallaşması için gerekli şartlar aşağıdaki gibi olur.

$$f(x_0, \lambda_0) = 0, \det J(f(x_0, \lambda_0)) = 0 \quad (2.3)$$

ENÇ güç sistemlerinde gerilim çökmesi problemleriyle ilişkilendirilerek sistemin dinamik kararsızlığı için temel bir fikir verir [9], [10], [11].

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 barolarındaki gerilim genliklerinde, giderek artış gösteren bir azalma ile karakterize edilmektedir. Gerilim çökmesi mekanizmaları, iyi tanımlanamamakta ve sistem dinamikleri iyi anlaşılmamaktadır.

Bazı kararlı denge noktalarının yollarının kesilmesi ile oluşan herhangi bir çatallaşma için eş anlamlı olarak, çatallaşma ve süresiz 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 parametrelili 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

Güç sistemleri gittikçe daha karmaşık hale gelmesi ve daha fazla yüklenmesi nedeniyle, Gerilim çökmesi olayı gittikçe daha ciddi problem olmaya devam etmektedir. Güç kesilmesiyle ilgili olarak gerilim çökmesi mevcut güç sistemlerinde de meydana gelmektedir.

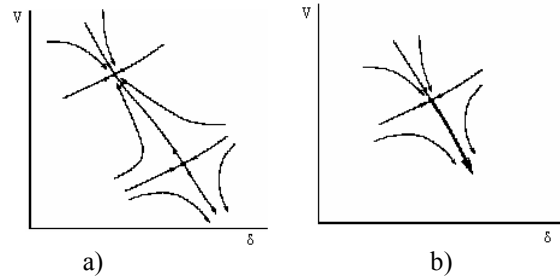
Gerilim çökmesi konusunda ilk önemli konu modelleme, ikincisi ise analitik metotların geliştirilmesidir. Geleneksel güç sistemi kararlılık analizleri rotor ve frekans osilasyonları problemleri ile ilgilidir. Bu yüzden generatör geriliminin kontrolünün modellenmesi ve yük dinamikleri basitleştirilebilir.

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

2.Bölüm'de çatallaşma analizi hakkında kısaca bilgi verilerek Denklem (2.3)'e göre sistemin eyer noktasının (ENÇ) nasıl bulunacağı açıklanmıştır. 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.

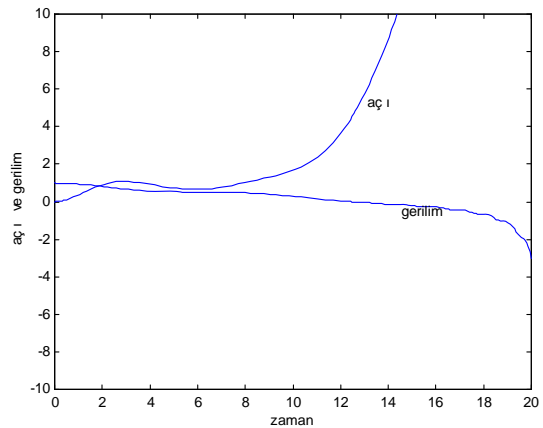
Farklı yüklenme noktalarında gerilimin büyüklüğü V ve açısı δ arasındaki V- δ grafikleri sistemin durum uzayını göstermesi açısından son derece faydalıdır. Bu grafikler üzerinde sistem dinamikleri açıkça görülebilmektedir. Şekil 1.a'da okların birleşme noktasına doğru yönelmekte olduğu görülmektedir. 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.



Şekil 1. Yüklenme miktarına bağlı olarak durum uzaylarının gösterimi a) çatallaşma öncesi b) çatallaşma anında

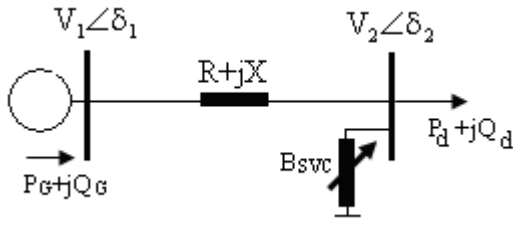
Şekil 2.'de yavaş bir şekilde yüklenen bir sistemde zamanla gerilim ve açı değişimi görülmektedir. Çatallaşma noktasından itibaren gerilim ve açının izlediği yörünge çökme mekanizmasının anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Çatallaşmadan önce statik eşitlikler statik gerilim kararlılığını analiz edebilir.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



Şekil 2 Gerilim çökmesi esnasında gerilim ve açının zamanla değişimi

3. BASİT BİR GÜÇ SİSTEMİNDE ÇATALLAŞMA ANALİZİ

Hat sonunda SVC olan iki baralı basit bir güç sistemi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil .3 Hat sonunda SVC olan basit bir güç sistemi

Bu sistem için temel generator modeli dinamik bağıntıları kullanılarak generator modeli, yük için ve gerilime bağımlı dinamik eşitlikler aşağıdaki gibi verilebilir [12].

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

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

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

Burada sırasıyla M ve D_G generator eylemsizlik ve sönmüleme, τ ise yüke ait gerilim zaman sabitleridir. Denklem (2.1)'e göre sistemin durum değişkenleri vektörü $\dot{x} = [w; \delta, V_2, P_d]$ olarak üç boyutlu haldedir.

3.1 SVC uygulaması

Yük barası gerilimini V₂=1.0 p.u değerine yükseltmek amacıyla hattın sonuna 0.2935 p.u değerinde bir SVC tesis edilerek analizler gerçekleştirilecektir. SVC temel dinamik modeli aşağıdaki gibidir.[13].

$$\dot{B}_{ref} = \frac{1}{T_R}[-B_{ref} + K_R(V_{ref} - V_2)] \quad (3.4)$$

$$\dot{B}_{SVC} = \frac{1}{T_B}(-B_{SVC} + B_{ref}) \quad (3.5)$$

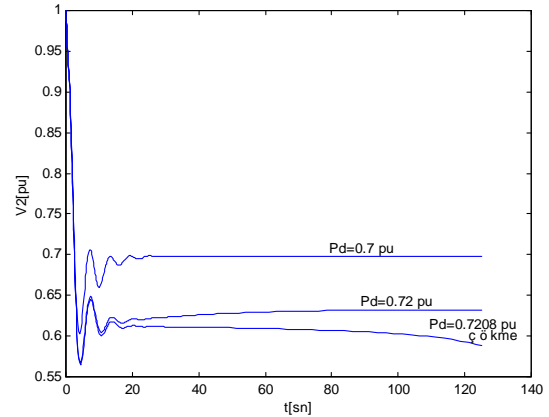
burada T_R ve K_R sırasıyla gerilim regülatörüne ait zaman ve kazanç sabitleri T_B ve B_{ref} sırasıyla SVC'ye ait zaman sabiti ile referans suseptans değeridir. Bu durumda sisteme ait güç akışı eşitlikleri $\dot{A} = a_1 + ja_2$, $\dot{B} = b_1 + jb_2$, $\dot{C} = c_1 + jc_2$, $\dot{D} = d_1 + jd_2$ olmak üzere;

$$P_G = V_1 V_2 (c_1 \cos \delta + c_2 \sin \delta) + \frac{V_1^2 (d_1 b_1 + d_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} - \frac{V_1 V_2}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) + (d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] \quad \dots(3.6)$$

$$Q_L = \frac{V_1 V_2 (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - V_2^2 (a_1 b_2 - a_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} + V_2^2 B_{svc} \quad \dots(3.7)$$

Sabit güç faktörü altında ($k = \tan \Phi$) Sürekli halde yük talebi (P_d) reaktif talep gücüyle orantılı olacak şekilde Q_d=k.P_d olarak alınmıştır. Hattın parametrik değerleri X=0.5 p.u Generator barasından üretilen güç ve Yük barasından talep edilen güç sırasıyla P_G + jQ_G ve P_d + jQ_d şeklindedir Kararlılık analizini basitleştirmek için tüm simülasyonlar boyunca hattın direnci ihmal edilmiş (R=0), ve mekanik güç talep güce eşit alınmıştır. P_m=P_d. Yük barasından 0.6 +j0.2 p.u değerinde yük çekildiği farz edilmiştir. SVC'ye ait zaman sabiti T_B=10s dir. Generatöre ait zaman sabitleri p.u olarak M =1, D_G, =0.1, τ =2s; kalacak şekilde, generator gerilimi (V₁) V₁ = V₁₀ = 1 gibi sabit bir değerde tutulmaya çalışılır.

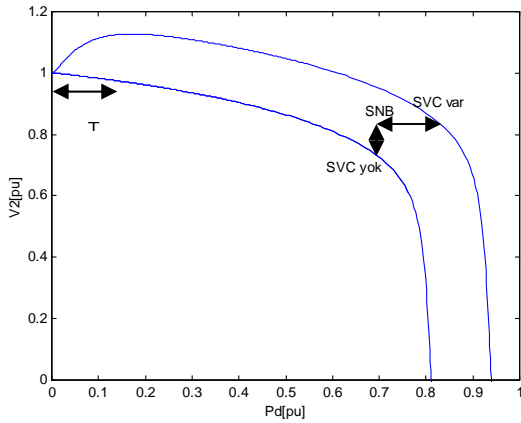
Sisteme SVC'nin eklenmesiyle Denklem (2.1)'e göre sistemin durum değişkenleri vektörünün boyutu artacak ve $\dot{x} = [w; \delta, V_2, B_{SVC}, P_d]$ olmak üzere 4 boyutlu diferansiyel denklem seti haline gelecektir. Çatallaşma teorisine göre yapılan analizler sonucu SVC'siz sistemin çatallaşma parametresi ($\lambda=1.2011$) bulunmuştur. Buna göre sistemin maksimum yüklenme değeri P_d^{max} = 0.7207 p.u aynı zamanda sistemin çatallaşma noktasıdır. Buna göre sistemin durum değişkenleri vektörünün limit noktalarına ait değerler $\dot{x}^* = [0.0; 0.6245, 0.6163, 0.7207]$ olarak bulunmuştur. Benzer şekilde SVC'li sistem içinde çatallaşma parametresi ($\lambda_{SVC}=1.3712$) bulunmuştur. Buna göre sistemin maksimum yüklenme değeri P_d^{SVCmax} = 0.82272 p.u aynı zamanda sistemin çatallaşma noktasıdır.



Şekil .4 Kritik yüklenme seviyesi civarında üç farklı çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimi

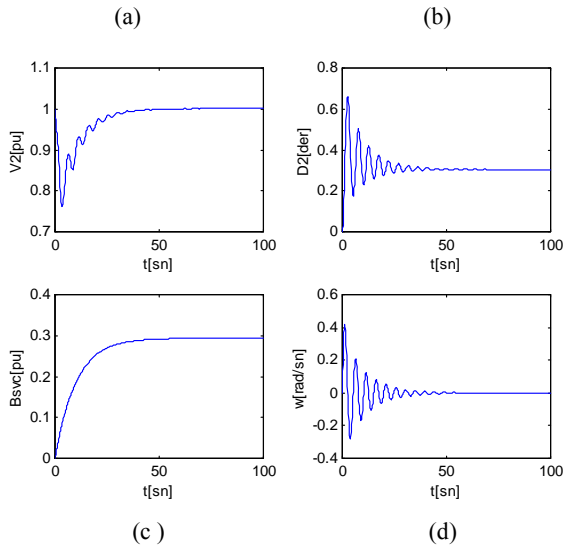
Bu değerler yardımıyla sistemin sürekli halde kararlılık analizlerini gerçekleştirmek mümkündür. Burada SVC'siz ve SVC'li olmak üzere iki durum incelenecektir. İlk durum için sistemi çökmeye götüren yüklenme noktası üç çalışma noktası belirleyelim. Bunlardan ilk ikisi sistemin sürekli halde $\lambda=1.167$ yük artımı ile yani P_d¹ = 0.70 p.u

değerinde ve $\lambda=1.2$ ile yani $P_d^2 = 0.72$ p.u değerinde yüklendiğini varsayalım. Bu durumda $P_d^1 < P_d^2 < P_d^{\max}$ olduğundan sistem kararlı bir davranış gösterecektir. Üçüncü çalışma noktası olarak bu kez $\lambda=1.201$ yük artımı ile yani $P_d^3 = 0.7208$ p.u değerinde yüklendiğini varsayalım. Bu durumda $P_d^3 > P_d^{\max}$ olduğundan sistem kararsız bir davranış gösterecektir. Bu durumları izlemek amacıyla Şekil 4 çizdirilmiştir. Her üç çalışma noktası için gerilimin zamanla değişimi görülmektedir.



Şekil 5 Her iki durum için sistemin P-V eğrileri

Şekil 5'de her iki durum için yük barasına ait P-V eğrisi çizdirilmiştir. SVC'nin gerilim kararlılığında iyileştirici etkisi bu şekilden açıkça görülmektedir. Bu grafikte SVC'nin dinamik analizi gerçekleştirildiğinden gerilimin başlangıçtan belli bir süre sonra artması SVC'nin kullanılan dinamik modelindeki zaman sabitinin

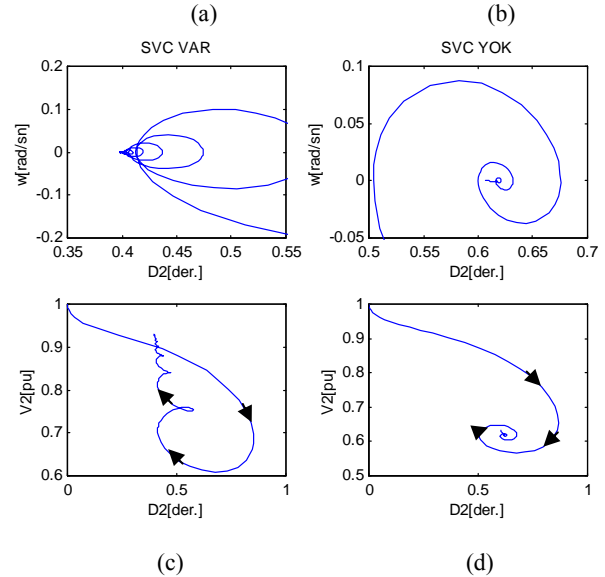


Şekil 6. 0.6 +j0.2 p.u yük kararlı kalan sistemin zamanla a) gerilim (V_2) b) açı (δ_2) c) SVC suseptansı (B_{SVC}) d) generatörün açılal frekansı (w) değişimleri

geciktirici etkisindedir. Dolayısıyla analiz gerçekleştirilirken bu değere dikkat edilmelidir. Şekil 6.c'de SVC'nin suseptans değerinin değişimi bu süreyle ilgilidir. Şekil 6' da yük barasına ait gerilim ve açının normal çalışma şartlarında değişimleri görülebilir. SVC V_2 gerilimini 1.0 p.u değerine getirmektedir. (Şekil 6.a) Sistemin bu çalışma şartlarında kararlı bir davranış gösterdiği açıkça görülmektedir. Nitekim yük açısı bir denge noktasına çekilmekte (Şekil 6.b) aynı zamanda generatörün açılal hızı da sürekli halde senkronizma da kalmaktadır (Şekil 6.d).

3.2. Güç sisteminin durum uzayında davranışı

Gerilim kararlılığı mekanizmasının incelenmesi amacıyla sistemin $P_d^2 = 0.72$ p.u ile sürekli yüklendiğini varsayalım. Bu durum SVC desteği olmayan güç sistemi için kritik değerdir. Sistem çatallaşma noktasına yakın çalışmakta, hat kayıpları artmakta ve reaktif güç desteği alamamaktadır. Bu durum sistemi önce kaosa sürükleyecek gerilim çökmesi tetiklenecektir. Bu durumu faz uzayında görmek için Şekil 7.d çizdirilmiştir. Dikkat edilirse gerilim yüksek bir değerden aşağıya inmekte ve denge noktasından hızla uzaklaşmaya başlanmıştır. Aynı durum açı oku içinde söylenebilir. Bu çalışma noktası SVC 'li sistem için kritik yüklenme seviyesinden düşük olduğundan $P_d^2 < P_d^{SVC \max}$ sistemin bir denge noktasına doğru ilerlediği açı ve gerilim oklarından anlaşılmaktadır (Şekil 7.c).



Şekil 7. $P_d=0.72$ p.u yük değerinde her iki durum için sistemin faz portreleri zamanla a) SVC'li (w)-(δ_2) b) SVC'siz (w)-(δ_2) c) SVC'li (V_2)-(δ_2) d) SVC'siz (V_2)-(δ_2)

4. SONUÇLAR

Eyer-düğüm noktası çatallaşması güç sistemlerine uygulanarak sistemin kararlılık sınırlarının belirlenmesinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada 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 7). Ayrıca hat sonuna eklenen bir SVC ile sistemin kararlılık sınırlarının genişlediği gözlenmiş ve kullanılan dinamik modelde SVC'ye ait zaman sabitinin (T_B) belirlenmesinin analiz sonuçlarında etkisi olduğu gösterilmiştir. Yapılacak analizlerde bu süreye dikkat edilmesi gerekmektedir. Güç sistemlerindeki bu analizler ve simülasyonlar için MathWorks Matlab 7.0 yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

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. Y. Uyaroglu, M.A. Yalcin, "Elektrik Güç sistemlerinde Salınım Dinamiklerinin Kaotik Olaylarının incelenmesi", Elektrik – Elektronik – Bilgisayar Mühendisliği sempozyumu, Sayfa 60-64, Bursa 2002
3. S. Ayasun, "Tekil Noktaların Güç sistemlerin Dinamiğine olan Etkileri", Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, Sayfa 28-31,
4. H.D. Chiang, C.W. Liu, P.P. Varaiya, F.F. Wu, M.G. Lauby, "Chaos in a Simple Power System", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 8, No. 4, pp. 1407-1417, November 1993
5. I. Dobson, H.Gşavitsch, C.C. Liu, Y. Tamura, K. Vu, "Voltage Collapse in Power Systems" IEEE Circuits and Devices Magazine, Vol. 8, No. 3, pp. 40-45, May 1992
6. S.H. Strogatz, "Nonlinear Dynamics and Chaos", Westwiew press,2000
7. A.C.Z. de Souza, "New Techniques to Efficiently Determine Proximity to Static Voltage Collapse", Doctor thesis, Univercity of Waterloo, Ontario, 1996
8. Z.T. Faur, "Effects of FACTS devices on Static Voltage Collapse Phenomena", Master's thesis, University of Waterloo, Ontario, 1996
9. V. Ajarapu, 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
10. I. Dobson, H.D. Chiang, "Towards a theory of voltage collapse in electric power systems", Syst. Control Lett, Vol.13, pp.253-262, 1989
11. "Voltage stability assesment: Concepts, practices and tools", IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publicatio, Product No. SP101PSS, Final document, August 2002
12. IEEE Special Stability Controls Working Group, "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
13. H.G. Kwatny, A.K. Pasrija, L.Y. Bahar, "Static bifurcation in electric power Networks:loss of steady-state stability and voltage collapse", IEEE Trans. Circuit Systems, Vol.33, pp.981-991, February, 1986