

EFFECTS ON VOLTAGE STABILITY OF DETAILED AND SIMPLIFIED SVC MODELS

DETAYLI VE SADELEŞTİRİLMİŞ SVC MODELLERİNİN GERİLİM KARARLILIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

M. Kenan DÖŞOĞLU^a, Gökhan POYRAZ^b

^aDüzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye, E-posta: kenandosoglu@duzce.edu.tr

^bBilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye, E-posta: gokhan.poyraz@bilecik.edu.tr

Özet

Güç sistemlerinde gerilim kararsızlığının ana nedenlerinden birisi de çalışma koşulları altındaki reaktif güç limit değerleridir. Güç sistemlerinin sürekli ve geçici durum analizinde reaktif güç limit değerlerini iyileştirme ve kontrol etmede Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) elemanları kullanılmaktadır. FACTS elemanları içerisinde bara gerilim ve reaktif güç kontrolünü sağlamada Statik Var Kompanzator (SVC) kullanılmaktadır. Çok baralı güç sistemlerinin planlanması ve işletilmesindeki en önemli durumlarda kullanılacak olan elemanların ekonomik yapıda bulunması ve benzetim çalışmasındaki hızlı, doğru ve hassas ölçümlerin alınmasıdır. Bu yüzden SVC kullanımında sadeleştirilmiş model tercih edilebilir. Bu çalışmada, IEEE 14 baralının güç sisteminde detaylı ve sadeleştirilmiş SVC modellerinin kullanılması ile gerilim kararlılığı analizi incelenmiştir. Bu benzetim çalışmasında Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) kullanılmıştır. Sistemin gerilim-maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişki ve bara genlik profilleri detaylı ve sadeleştirilmiş SVC modelleri kullanılarak incelenmiştir. Detaylı SVC modelinde tetikleme açısı kontrolü kullanılırken, sadeleştirilmiş SVC modelinde süseptans kontrolü kullanılmıştır. Her iki SVC modelin de sistemin yüklenme parametre değerini arttırdığı görülmüştür. Maliyet ve benzetim çalışmasının performansı açısından güç sistemlerinde sadeleştirilmiş SVC modelinin kullanılmasının daha etkili olduğu görülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda detaylı ve sadeleştirilmiş SVC modellerinin gerilim kararlılığı analizinde iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışmada ile diğer FACTS cihazlarının ekonomik olması bakımından farklı güç sisteminde gerilim kararlılığı üzerinde oluşturabileceği durumların incelenmesine zemin hazırlamıştır.

Anahtar kelimeler: Gerilim Kararlılığı, Detaylı ve Sadeleştirilmiş SVC Modelleri, Gerilim-Maksimum Yüklenme Parametresi, Bara Gerilim Profilleri

Abstract

One of the main causes of voltage instability in power systems is reactive power limit values under operating conditions. In steady state and transient state analysis of power systems is used to improve and control the reactive power limit values Flexible AC Transmission System (FACTS) elements. Static Var Compensator (SVC) is used to provide bus voltage and reactive power control in FACTS elements. The most important situations in the planning and operation of multi-bus power systems are the economic structure of the elements to be used and rapid, accurate and precise measurements are taken in the simulation study. Therefore, it can be preferred when using a simplified SVC modeling. In this study, voltage stability analysis is investigated by using detailed and simplified SVC models in IEEE 14 bus power system. In this simulation study, Power Systems Analysis Toolbox (PSAT) was used. The relationship between the voltage-maximum loading parameter of the system and the bus magnitude profiles were examined using detailed and simplified SVC models. Trigger angle control is used in the detailed SVC model, whereas susceptance control is used in the simplified SVC model. It was observed that both SVC models increased the loading parameter value of the system. The use of the simplified SVC model in power systems has been found to be more effective in terms of cost and simulation performance. As a result of the study, it was seen that detailed and

simplified SVC models give good results in voltage stability analysis. In this study, it has been prepared to examine the situations that other FACTS devices can create on voltage stability in different power system in terms of economy.

Keywords: Voltage Stability, Detailed and Simplified SVC Models, Voltage-Maximum Loading Parameter, Bus Magnitude Profiles

1. Giriş

Son yıllarda güç sistemlerinde artan yük talepleri ve çalışma koşullarındaki değişimler sistemlerin güç transferi ve gerilim güvenirliliği konusunda endişeler ortaya çıkmaktadır. Bu endişelerin nedeni ise güç sistemlerinin gerilim çökmesi olayı ile karşı karşıya kalmasıdır [1]. Bu problemleri oluşmasını engellemek için güç elektroniği tabanlı Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) cihazları tercih edilmektedir. Sistemin güç kapasitesini arttırmada ve baraların gerilim kontrolünün sağlanmasında FACTS cihazlarından Statik Var Kompanzator (SVC) yaygın olarak kullanılmaktadır. SVC ile güç sistemlerinde meydana gelen arıza analizlerinde bara gerilim kontrolü sağlanmaktadır. Arıza esnasında düşen bara gerilimi SVC sayesinde belli bir değere kadar kompanze edilirken, arıza esnasında meydana gelen salınımlar kısa süre içerisinde sönümlenmiştir [2-3]. Dahası çok baralı güç sistemlerinde geçici durum esnasında bara gerilimi ve güç transferinin daha iyi sağlanmasında SVC tercih edilmektedir. Bunun için SVC'nin optimum yerleşim yerinin bulunması gerekmektedir. Optimum yerleşim sayesinde güç sistemleri SVC ile birlikte çalışması daha etkin ve verimli hale gelmiştir [4-5]. Diğer bir geçici durum olayı hatların devre dışı kalma olayıdır. Genelde hat kopmaları kesicilerin yanlış koordinasyon sonucu devreyi açmaları ile temsil edilmektedir. Hat kopmalarının neden olduğu olumsuz durumları en minimum düzeye indirmek için SVC tercih edilmektedir [6-7]. Güç sistemlerinin çalışma koşullarının iyileştirilmesi açısından yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının doğa şartlarına bağlı olarak güç sistemine devamlı olarak girip çıkmaktadır. Devreye girip çıkma esnasında büyük akımlar ve gerilimler meydana gelmektedir. Bu akım ve gerilimleri en minimum düzeye indirmede SVC etkili olmaktadır [8]. Gerilim kararlılığı açısından SVC kullanımı oldukça etkilidir. Bara gerilim profilini iyileştirmede ve sistemin gerilim-maksimum yüklenme parametre değerini arttırmada oldukça başarılı olduğu literatürde yapılan ilgili çalışmalarda görülmektedir [9-11]. Bu çalışmada, SVC'nin hem tasarım maliyetinin yüksek olması hem de benzetim çalışmasındaki hesaplama kolaylığı açısından sadeleştirilmiş modelin kullanılması ele alınmıştır. IEEE 14 baralı sistemde SVC'nin kullanılmadığı durum, detaylı SVC'nin kullanıldığı durum ve sadeleştirilmiş SVC'nin kullanıldığı durumların karşılaştırmaları yapılmış ve elde edilen sonuçlar detaylıca yorumlanmıştır. Sadeleştirilmiş SVC modelinin SVC'nin kullanılmadığı duruma göre iyi, detaylı SVC modeline göre ise çok yakın sonuçlar verdiği bu çalışmada görülmüştür [11].

2. Gerilim Kararlılığı

Gerilim kararlılığı reaktif güç değişimine bağlı olarak değer almaktadır. Reaktif gücün sağlanması ile yük barasının çalışma koşulları iyileştirilmiş olur. Eğer reaktif güç desteği belirlenen sınırların altında kaldığında ve gerilim düşümü başladığında sistem çökmeye gider. Bunun engellemek için reaktif güç bağlı olarak gerilim dengelemesi statik gerilim kararlılığı için önemli bir durum oluşturmaktadır. Sistemin gerilim- maksimum yüklenme parametresi ile baranın aktif güç ve reaktif güç değeri arasındaki ilişki denklem 1 ve denklem 2'de gösterilmiştir.

$$P_L = P_{L0}(I + \lambda) \quad (1)$$

$$Q_L = Q_{L0}(I + \lambda) \quad (2)$$

Burada, P_L ve Q_L yükün aktif güç ve reaktif güç değeri, P_{L0} ve Q_{L0} yükün başlangıç aktif güç ve reaktif güç değerleri, λ maksimum yüklenme parametre değeridir [12]. Sürekli yük akışında gerilim ve maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişkiden yararlanılmaktadır. Sürekli yük akışı analizinde destekleme olmaksızın belirli problemlere karşı çözüme gitmede çok başarılıdır. Dahası sistem eşitliklerindeki tekil çözüme gitme durumunun oluşturacağı olumsuz durumlara karşı gerilim kendini yenileyecek şekilde değiştirmektedir. Sürekli güç akış yöntemi, teğet vektörün hesaplanmasıyla gerçekleştirilen bir tahminci adımdan ve düzeltici adımdan oluşur.

Tahminci adım sürekli güç akışı işleminde, tahminci adım ilişkisinde i adımı ve $(y^{(i)}, \mu^{(i)})$ çözümü ve ψ homotopi haritası için ilişkilendirme ifadesi denklem 3'de gösterilmiştir.

$$\psi(y^{(i)}, (\mu^{(i)}), \mu^{(i)}) = 0 \longrightarrow \left. \frac{d\psi}{d\mu} \right|_i = 0 = \psi_y \left. \frac{dy}{d\mu} \right|_i + \psi_\mu \left. \right|_i \quad (3)$$

Denklem 3'de elde edilen sonuçta, $(y^{(i)}, \mu^{(i)})$ çözümü için tanjant (teğet) vektörü ve kısalma adımlarının tanımlaması denklem 4 ve denklem 6 arasında gösterilmiştir.

$$\tau^{(i)} = \left. \frac{dy}{d\mu} \right|_i \approx \frac{\Delta y^{(i)}}{\Delta \mu^{(i)}} \quad (4)$$

$$\tau^{(i)} = -\psi_y^{-1} \left. \psi_\mu \right|_i \quad (5)$$

$$\Delta y^{(i)} = \tau^{(i)} \Delta \mu^{(i)} \quad (6)$$

$\|\tau^{(i)}\|_2$ adımı arttığında büyük adımları engellemek için denklem 4 ile denklem 6 arasında görünen $\Delta \mu^{(i)}$ ve $\Delta y^{(i)}$ 'nin adım artışını tespit etmek için bir adım boyutlandırıcı k ifadesinin seçilmesi gerekmektedir. Adım boyutlandırıcıyı temsil eden k adım boyut büyüklüğünün işareti, μ 'nün değerine bağlı olarak elde edilir. Eğriyi elde etmek için üst kısım $k > 0$ ve alt kısım ise $k < 0$ olması gerekmektedir. Jacobian matrisin alacağı işaretinin determinanı eğer düğüm çatallaşmasından önce ve sonra veya kritik limite bağlı çatallaşma noktasının değişiminden dolayı akım noktasının eğrisinin üst ve alt kısmında olduğunu bulmak basitleşir. Tanjant tahmincisi, vektör dışındaki tahminci adımların uygulanabileceğini gözlemlemeye değer bir tahmincidir. Sekant tahmincisi, iki çözüm $(y^{(i-1)}, \mu^{(i-1)})$ ve $(y^{(i)}, \mu^{(i)})$ bilindiği zaman, denklem 7'deki tanjant $\tau^{(i)}$ ifadesine yakın bir çözüm elde edilmiş olur.

$$\tau^{(i)} = - \left. \frac{dy}{d\mu} \right|_i \approx y^{(i)} - y^{(i-1)} \quad (7)$$

En yaygın olarak kullanılan düzeltici adım n_y+1 değişkenlerinde bir n_y+1 denklem kümesi olan durumdur. Bunun çözümü ψ ve ρ 'nun çatallanma durumundadır. Çatallanma noktasında tekil olmayan bir yeri doğru olarak elde etmek için ekstra bir denklem kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu denklem dikey kesişmeden oluşmaktadır. Dikey kesişme ifadesi denklem 8'de gösterilmiştir.

$$\rho(y, \mu) = \begin{bmatrix} \Delta y^{(i)T} \\ \Delta \mu^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y - (y^{(i)} + \Delta y^{(i)}) \\ \mu - (\mu^{(i)} + \Delta \mu^{(i)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y^{(i)T} \\ \Delta \mu^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y - y_0^{(i)} \\ \mu - \mu_0^{(i)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Denklem 8'de, ρ ifadesi yerel parametre belirleme için, ya μ parametresi yada y_k değişkenine atanmış bir değer olması gerekir. M parametresi yada y_k değişkenin belirlenmiş olması durumunda oluşan yeni durum ifadeleri denklemi 9 ve denklem 10'da gösterilmiştir.

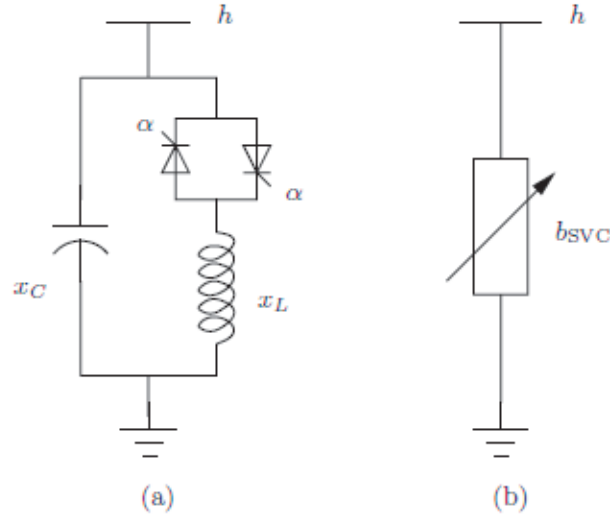
$$\rho(y, \mu) = \mu - \mu^{(i)} - \Delta \mu^{(i)} = \mu - \mu_0^{(i)} \quad (9)$$

$$\rho(y, \mu) = y_k - y_k^i - \Delta y_k^{(i)} = y_k - y_k^0 \quad (10)$$

Tahminci adım ve düzeltici adım yakınsama durumlarına göre gerilim kararlılığı analizinde maksimum yüklenme parametre değeri elde edilmesi bu şekilde kolaylaştırılmış olmaktadır [13].

3. Detaylı ve Sadeleştirilmiş SVC modelleri

Statik Var Kompansatör (SVC) değişken bir paralel kapasitördür. Baraya paralel olarak bağlanırlar. Bağlı oldukları barada reaktif güce bağlı olarak gerilim kontrolünü sağlarlar. SVC tetikleme açısı modeli ve eşdeğer süseptans modeli olarak ikiye ayrılmaktadır. Genelde tetikleme açısı modeli detaylı model olarak isimlendirilirken, eşdeğer süseptans modeli ise sadeleştirilmiş model olarak isimlendirilmektedir. Şekil 1'de SVC'nin detaylı ve sadeleştirilmiş modeli gösterilmiştir.



Şekil 1. (a) SVC detaylı model, (b) SVC sadeleştirilmiş model

Tetikleme açısı α , tristörün açılma periyodunu kontrol eder ve dolayısıyla SVC'nin eşdeğer reaktansını değiştirmektedir. Dengeli, temel bir frekans işlemi olduğu varsayıldığında, SVC'nin eşdeğer devresi, tetikleme açısının bir işlevi olmaktadır. SVC'nin süseptansındaki tetikleme açısı ifadesi denklem 11'de gösterilmiştir.

$$b_{SVC}(\alpha) = \frac{2\alpha - \sin 2\alpha - \pi \left(2 - \frac{x_L}{x_C} \right)}{\pi x_L} \quad (11)$$

Burada, α tetikleme açısı, x_L SVC endüktif reaktansı, x_C SVC kapasitif reaktansıdır. SVC'nin tetikleme açısı modelinde kontrol edilen değişken tetikleme açısı olmaktadır. Baraya paralel bağlanan SVC'nin bara gerilimini kontrol etmesi isteniyorsa tetikleme açısının değişmesi gerekmektedir. Bu şekilde SVC'nin tetikleme açısı modelinde kontrolü sağlanmış olur. SVC'nin detaylı modelinde ölçülen gerilimin türevi, tetikleme açısı türevi ve SVC reaktif güç ifadesi denklem 12 ile denklem 14 arasında gösterilmiştir.

$$\dot{v}_M = \frac{K_M v_h - v_M}{T_M} \quad (12)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{\left[-K_D \alpha + K \frac{T_1}{T_2 T_M} (v_M - K_M v_h) + K (v^{ref} - v_M) \right]}{T_2} \quad (13)$$

$$q_h = \frac{2\alpha - \sin 2\alpha - \pi \left(2 - \frac{x_L}{x_C} \right)}{\pi x_L} v_h^2 \quad (14)$$

Burada, v_M ölçülen gerilimin çıkışı, v_h ölçülen gerilim, T_M ölçüm zaman gecikmesi, K_D integral sapması, K düzenleyici kazancı, T_1 geçici düzenleyici zaman sabiti, T_2 düzenleyici zaman sabiti, v^{ref} referans gerilim, q_h SVC reaktif gücüdür.

Sadeleştirilmiş SVC modelde tristör tetikleme açısının haricinde direk olarak baranın süseptans değerini değiştirerek kontrolü sağlanmış olmaktadır. Bu modelde kontrol değişkeni süseptans olmaktadır. SVC sadeleştirilmiş modelin süseptans türevli ifadesi ve reaktif güç ifadesi denklem 15 ve denklem 16'da gösterilmiştir.

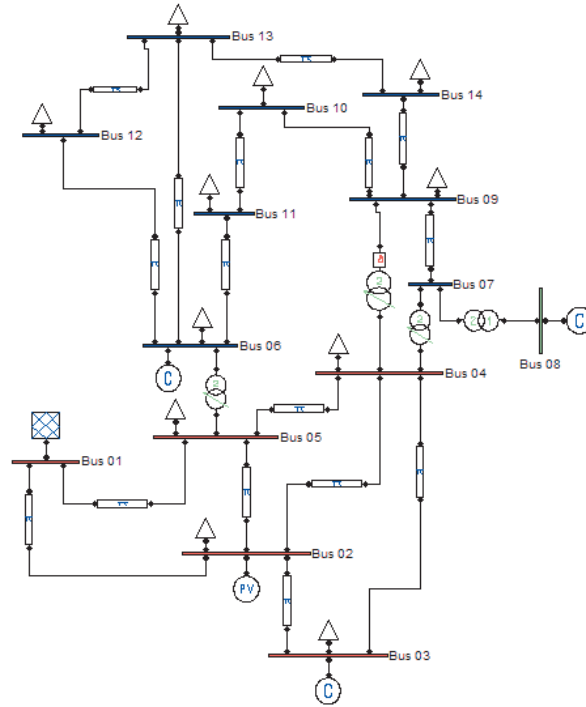
$$\dot{b}_{SVC} = \frac{[K_r (v^{ref} - v_h) - b_{SVC}]}{T_r} \quad (15)$$

$$q = b_{SVC} v_h^2 \quad (16)$$

Burada, K_r SVC sadeleştirilmiş modelin düzenleyici kazancı, b_{SVC} SVC sadeleştirilmiş modelin süseptansı, T_r düzenleyici zaman sabitidir [13].

4. Benzetim Çalışması

Yapılan çalışmada, IEEE 14 baralı güç sisteminde analiz edilmiştir. Bu analizde Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) kullanılmıştır [14]. 14 baralı güç sisteminin devre modeli Şekil 2'de gösterilmiştir.



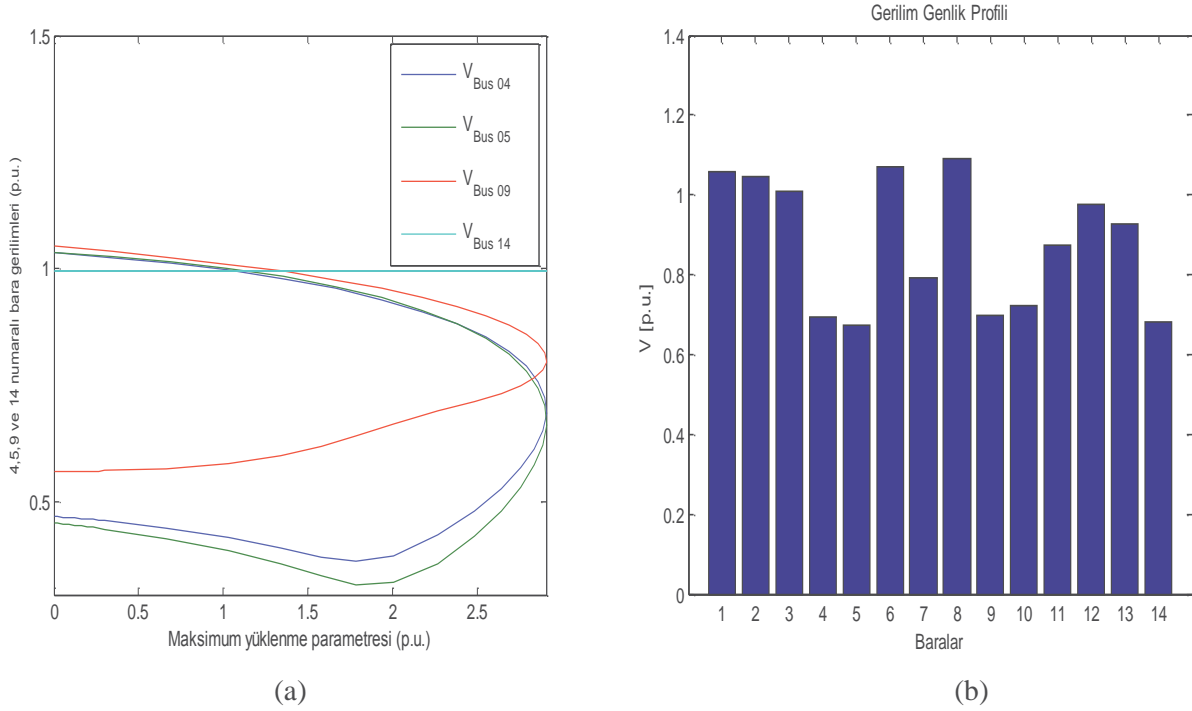
Şekil 2. 14 Baralı güç sistem modeli

IEEE 14 baralı güç sisteminde 1 numaralı bara salınım barası olarak kullanılırken, 2, 3, 6 ve 8 numaralı baralar generatör barası olarak kullanılmıştır. Diğer geri kalan 9 bara ise yük barası olarak kullanılmıştır. IEEE 14 baralı sistemin 5-6, 4-8 ve 4-9 iletim hatlarında gerilimi düşüren transformatörler kullanılmıştır. 5-6 ve 4-9 numaralı iletim hatları arasındaki transformatörlerde kademe değiştirme ve faz kaydırma işlemleri yapılmaktadır. Sistemin sürekli yük akışı yaklaşımı ile 3 farklı durum incelenmiştir. Birinci durumda SVC'nin kullanılmadığı durumdaki gerilim-maksimum yüklenme parametre ilişkisi ve bara genlik profilleri incelenmiştir. İkinci analizde 14 numaralı baraya 100 MVA gücünde detaylı SVC modeli bağlanmıştır. Detaylı SVC modeli ile sistemin yüklenme durumu ve bara gerilim profil değişimleri ele alınmıştır. Üçüncü analizde de 14 baralı baraya 100 MVA gücünde sadeleştirilmiş SVC modeli bağlanmıştır. Yapılan sürekli yük akışı analizi ile gerilim ile yüklenme arasındaki ilişki ve bara gerilim genlik değerleri incelenmiştir.

5. Benzetim Çalışması Sonuçları

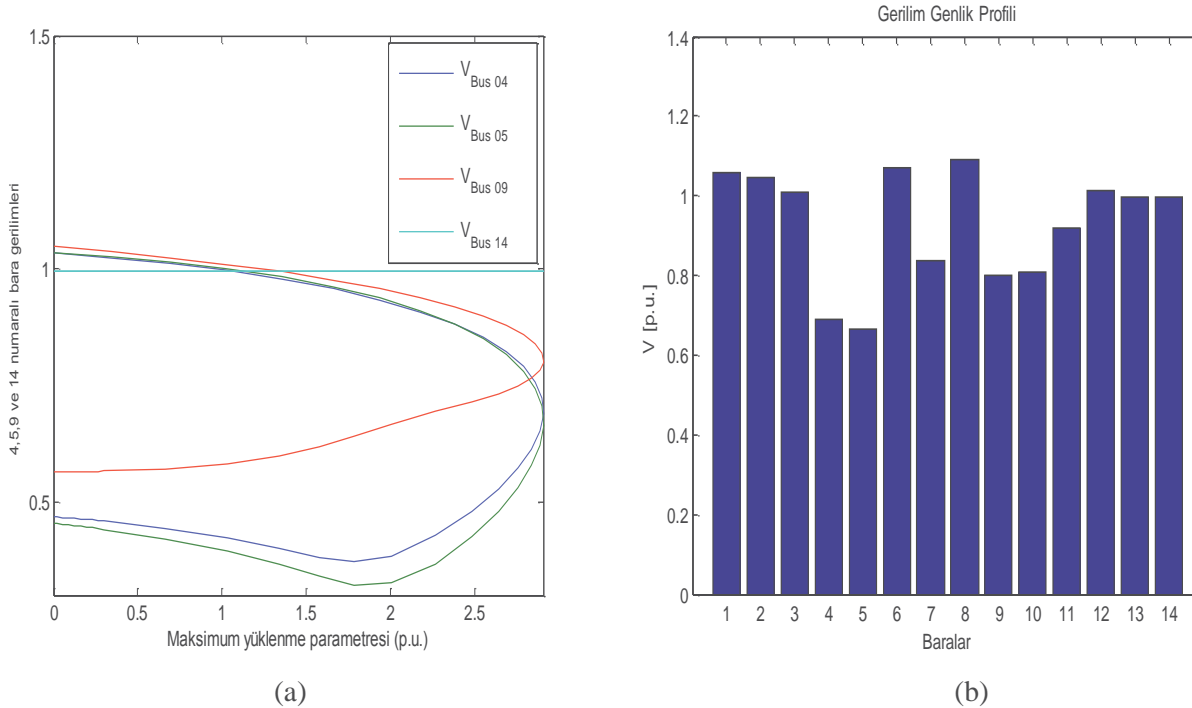
IEEE 14 baralı sistemde ilk analiz aşamasında SVC modelleri kullanılmadan sürekli yük akışı yapılmıştır. Sürekli yük akışı sonucunda 4, 5, 9 ve 14 numaralı yük baralarının gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri 2.8286

olarak bulunmuştur. SVC'nin kullanılmadığı durumdaki 4, 5, 9 ve 14 numaralı yük baralarının gerilim-maksimum yüklenme parametre ilişkisi Şekil 3a'da verilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 3b'de gösterilmiştir.



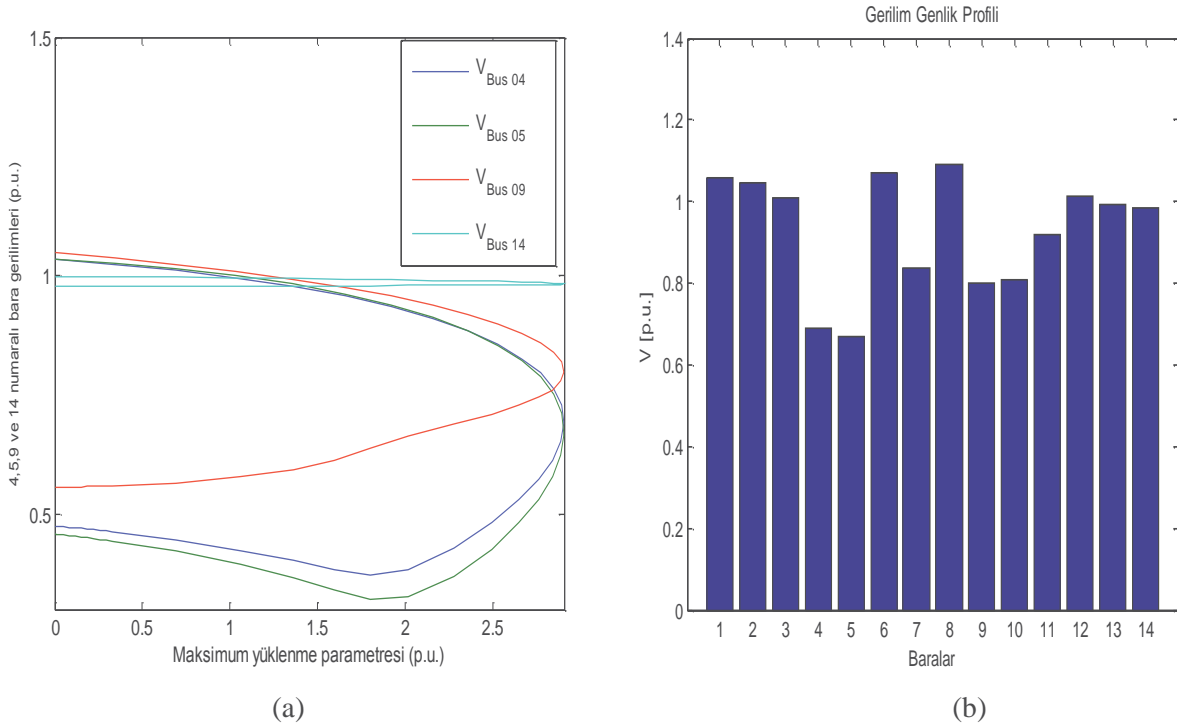
Şekil 3. a) Normal çalışmada bara 4,5,7,9 ve 10'nun gerilim-yüklenme parametre ilişkisi (maksimum yüklenme parametresi=2.8286), b) SVC yok iken Normal tüm baraların gerilim profilleri (maksimum yüklenme parametresi=2.8286)

İkinci yapılan analizde 100 MVA gücündeki detaylı SVC modelinin IEEE 14 baralı güç sisteminde 14 numaralı baraya bağlanmıştır. IEEE 14 baralı güç sisteminde yapılan sürekli yük akışı analizi sonucunda sistemin maksimum yüklenme parametre değeri 2.9078 olarak elde edilmiştir. 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki ilişki Şekil 4a'da gösterilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 4b'de gösterilmiştir.



Şekil 4. a) Detaylı SVC modeli ile bara 4,5,7,9 ve 10'nun gerilim-yüklenme parametre ilişkisi (maksimum yüklenme parametresi=2.9078), b) Detaylı SVC modeli ile tüm baraların gerilim profilleri (maksimum yüklenme parametresi=2.9078)

Üçüncü analizde IEEE 14 baralı güç sisteminde 100 MVA gücündeki detaylı SVC modeli 14 numaralı baradan çıkarılarak yerine 100 MVA gücünde sadeleştirilmiş SVC modeli kullanılmıştır. Sürekli yük akışı yapılarak sistemin maksimum yüklenme parametre değeri belirlenmiştir. Bu değer 2.9084 olarak elde edilmiştir. 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişki Şekil 5a'da verilirken, tüm baraların gerilim genlik profili Şekil 5b'de verilmiştir.



Şekil 5. a) Sadeleştirilmiş SVC modeli ile bara 4,5,7,9 ve 10'nun gerilim-yüklenme parametre ilişkisi (maksimum yüklenme parametresi=2.9084), b) Sadeleştirilmiş SVC modeli ile tüm baraların gerilim profilleri (maksimum yüklenme parametresi=2.9084)

5. Sonuç

Yapılan bu çalışmada IEEE 14 baralı güç sisteminde FACTS cihazlarından farklı SVC modellerinin sistemin yüklenme parametresi ve bara genlik profilleri üzerindeki etkileri üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Detaylı SVC modelinde tetikleme açısı kontrolü ile sağlanırken, sadeleştirilmiş SVC modelinde süseptans kontrolü sağlanmıştır. SVC olarak detaylı ve sadeleştirilmiş modeller kullanılmıştır. Her iki SVC modelin de sistemin yüklenme parametre değerini arttırdığı görülmüştür. 14 numaralı baranın gerilim genlik değeri ise SVC modelleri ile yükselmiştir. Maliyet açısından güç sistemlerinde detaylı SVC modelinin kullanılmasının daha etkili olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ile diğer FACTS cihazlarının ekonomik olması bakımından farklı güç sisteminde gerilim kararlılığı üzerinde oluşturabileceği durumların incelenmesine zemin hazırlamıştır.

Kaynaklar

[1] Kamarposhti, M. A. and Alinezhad, M., "Comparison of SVC and STATCOM in static voltage stability margin enhancement", World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering, 3(2): 297-302, (2010).

- [2] Cong, L., Wang, Y. and Hill, D. J., “Transient stability and voltage regulation enhancement via coordinated control of generator excitation and SVC”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 27(2): 121-130, (2005).
- [3] Cong, L., Wang, Y. and Hill, D. J., “Co-ordinated control design of generator excitation and SVC for transient stability and voltage regulation enhancement of multi-machine power systems”, *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC- Affiliated Journal*, 14(9- 10): 789-805, (2004).
- [4] Haque, M. H., “Best location of SVC to improve first swing stability limit of a power system”, *Electric power systems research*, 77(10): 1402-1409, (2007).
- [5] Thukaram, D. and Lomi, A., “Selection of static VAR compensator location and size for system voltage stability improvement”, *Electric Power Systems Research*, 54(2): 139-150, (2000).
- [6] Ghorbani, A., Khederzadeh, M., and Mozafari, B., “Impact of SVC on the protection of transmission lines”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 42(1): 702-709, (2012).
- [7] Singh, A. R. and Dambhare, S. S., “Adaptive distance protection of transmission line in presence of SVC”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 53: 78-84, (2013).
- [8] Molinas, M., Suul, J. A. and Undeland, T., “Low voltage ride through of wind farms with cage generators: STATCOM versus SVC”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(3): 1104-1117, (2008).
- [9] Kamarposhti, M. A., Alinezhad, M., Lesani, H. and Talebi, N., “Comparison of SVC, STATCOM, TCSC, and UPFC controllers for static voltage stability evaluated by continuation power flow method”, In 2008 IEEE Canada Electric Power Conference, Vancouver, BC, Canada, 1-8, (2008).
- [10] Musunuri, S. and Dehnavi, G., “Comparison of STATCOM, SVC, TCSC, and SSSC performance in steady state voltage stability improvement”, In North American Power Symposium 2010, Arlington, TX, USA, 1-7, (2010).
- [11] Sode-Yome, A. and Mithulananthan, N., “Comparison of shunt capacitor, SVC and STATCOM in static voltage stability margin enhancement”, *International Journal of Electrical Engineering Education*, 41(2): 158-171, (2004).
- [12] Kazemi, A. and Badrzadeh, B. “Modeling and simulation of SVC and TCSC to study their limits on maximum loadability point”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 26(8): 619-626, (2004).
- [13] Milano, F., *Power system modelling and scripting*, Springer Science and Business Media, New York, (2010).
- [14] Milano, F., “An open source power system analysis toolbox”, *IEEE Transactions on Power systems*, 20(3): 1199-1206, (2005).