

SVC'nin farklı çalışma koşullarındaki gerilim kararlılığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi

M. Kenan Döşoğlu^{1*} (ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8804-7070>), Enes Kaymaz¹ (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4774-0773>), Gökhan Poyraz² (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3511-330X>)

¹Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce, Türkiye

²Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Bilecik, Türkiye

*Sorumlu yazar e-mail: kenandosoglu@duzce.edu.tr

Özet

Güç sistemlerinde bara geriliminin reaktif güce bağlı olarak kontrol edilmesi gerilim kararlılığı açısından çok önemli bir konudur. Bu kontrol için Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) cihazlarından Statik Var Kompansatör (SVC) tercih edilmektedir. Bu çalışmada, IEEE 14 baralı güç sisteminde SVC modelinin farklı çalışma koşullarındaki etkileri incelenmiştir. Farklı çalışma koşulları için değişik değerlerdeki indüktif ve kapasitif değerlerdeki gerilim-maksimum yüklenme değerleri arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Dahası farklı çalışma koşullarındaki gerilim genlik profil değişimleri de analiz edilmiştir. Bu benzetim çalışması Güç Sistemleri Analizi Programında (PSAT) gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda SVC modelinin indüktif ve kapasitif çalışma durumlarında gerilim kararlılığı üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Gerilim kararlılığı, SVC modeli, gerilim-maksimum yüklenme değeri, bara gerilim profilleri

Investigation of effects on voltage stability in different working conditions of SVC

Abstract

Control of the bus voltage depending on reactive power in power systems is an important issue in terms of voltage stability. For this control, Static Var Compensator (SVC), which is one of the Flexible AC Transmission System (FACTS) devices is preferred. In this study, the effects of SVC model in different operating conditions in IEEE 14 bus power system were investigated. The relationships between the voltage-maximum loading values at different values of inductive and capacitive values for different operating conditions were evaluated. Besides, voltage amplitude profile changes in different operating conditions were also analyzed. This simulation study was carried out in Power Systems Analysis Program (PSAT). As a result of the study, it was seen that SVC model has an effect on voltage stability in inductive and capacitive operating states.

Keywords: Voltage stability, SVC model, voltage-maximum loading values, bus voltage profiles

GİRİŞ

Son yıllarda, meydana gelen teknolojik gelişmelerle birlikte talep edilen güçteki artışlar iletim hatlarının aşırı yüklenmesine, yükün dengesiz biçimde paylaşılmasına ve güç sistemlerinin çalışma koşullarında değişimlere neden olmaktadır (Çiftçi, 2015). Bir güç sisteminde kararlılık, genel olarak rotor açısı kararlılığı, ve gerilim kararlılığı olarak sınıflandırılmaktadır (Kundur ve ark.,2004). Rotor açısı kararlılığı, bir güç sistemindeki birbirine bağlı senkron makinelerin bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra elektromanyetik ve mekanik tork arasında dengenin sağlanmasıyla senkronizasyonda kalma yeteneği olarak tanımlanabilir. Gerilim kararlılığı ise, bir güç sisteminin yük artışı, hatların devre dışı kalması, kısa devre vb. bozucu bir etkiye maruz kaldıktan sonra gerilimin her barada istenen seviyede tutulabilmesidir (Güleryüz, 2011). Gerilim kararlılığı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişki olarak da ifade edilebilmektedir (Döşoğlu ve ark.,2019). Güç sistemlerinde gerilim kararsızlığının meydana gelmesinin en önemli sebebi ise, aşırı yüklü sistemlerde gerilim değerinin belirli bir değerde tutulabilmesi için sistemin ihtiyaç duyduğu reaktif gücün karşılanamamasıdır (Çiftçi, 2015).

Bara geriliminin reaktif güce bağlı olarak kontrol edilmesi gerilim kararlılığı açısından son derece önemli olup, günümüz teknolojisinde bu kontrol için Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) cihazlarından Statik Var Kompansatör (SVC) tercih edilmektedir. SVC sistemin güç kapasitesinin artırılması, baraların gerilim kontrolünün sağlanması, güç transferinin daha iyi sağlanabilmesi gibi çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır (Döşoğlu ve Poyraz, 2019). Bunun dışında, yapılan çeşitli çalışmalarda SVC kullanılarak arıza durumunda düşen bara geriliminin kompanze edilmesiyle meydana gelen salınımların sönümlenmesi (Cong ve ark.,2004), (Cong ve ark.,2005) ve hat kopmaları sonucunda meydana gelen olumsuz durumların minimum seviyeye indirilmesi amacıyla SVC tercih edilmiştir (Ghorbani ve ark.,2012), (Singh ve ark.,2013). Güç sisteminin gerilim profilini korumak, gerilim düşmesini en aza indirmek, gerilim kararlılık indeksi kullanarak güç kayıplarını azaltmak gibi amaçlarla, SVC'nin optimal yerleşimi sağlanarak güç sisteminin daha etkin ve verimli kullanımı sağlanmıştır (Haque,2007), (Thukuram ve Lomi, 2000), (Bhaladhare ve Bedekar, 2013), (Skaria ve ark.,2014).

Bu çalışmada, Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) kullanılarak, SVC modelinin farklı çalışma koşullarındaki etkileri IEEE 14 baralı sistemde incelenmiş ve farklı indüktif ve kapasitif değerlerdeki gerilim-maksimum yüklenme parametreleri arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, indüktif ve kapasitif çalışma durumları için baraların gerilim genlik profil değişimleri incelenmiştir.

MATERYAL VE METOD

Gerilim Kararlılığı

Gerilim kararlılığı arıza veya bozucu bir etki sonrası tüm bara gerilimlerinin belirli limitlerde sabit tutulması olarak ifade edilebilir. Gerilim düşmesi veya talep edilen yük miktarındaki artış sistemde gerilim kararsızlığına yol açan önemli faktörler olmasına rağmen, başlıca sebep reaktif güç talebinin karşılanamamasıdır. Reaktif güç desteğinin belirlenen sınırlar altında kalması durumunda baralarda gerilim düşümü başlar ve sistem çökmeye gidebilir. Dahası reaktif güç gereksiniminin karşılanamaması aktif ve reaktif güç akışında gerilim dengesizliğine neden olmaktadır (Kundur ve ark.,1994). Reaktif güce bağlı gerilim dengelemesi gerilim kararlılığı açısından öneme sahiptir. Bunun için gerilim-maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişki incelenmektedir. Sistemin gerilim-maksimum yüklenme parametresi ile baranın aktif-reaktif güç değeri arasındaki ilişki Denklem (1) ve Denklem (2)'de yer aldığı gibidir.

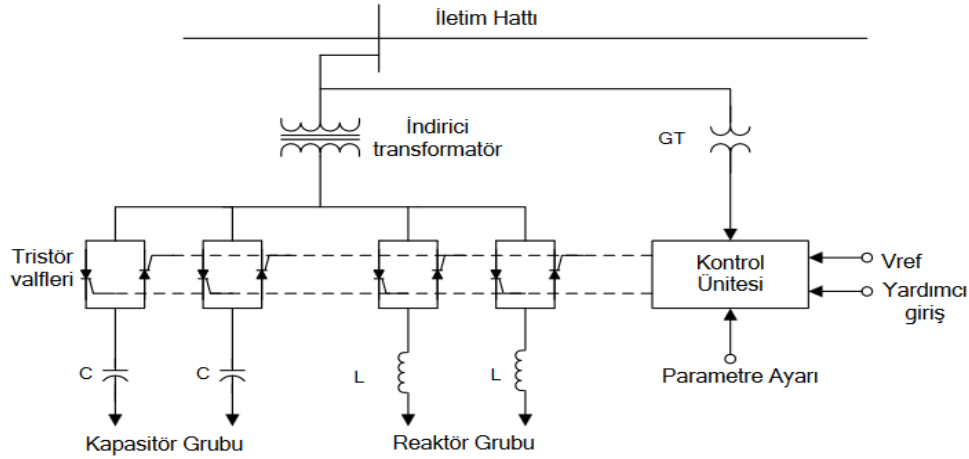
$$P_L = P_{L0}(1 + \lambda) \quad (1)$$

$$Q_L = Q_{L0}(1 + \lambda) \quad (2)$$

Bu denklemlerde, P_L ve Q_L ifadeleri yükün aktif ve reaktif güç değerleri iken, P_{L0} ve Q_{L0} ifadeleri yükün başlangıç aktif ve reaktif güç değerlerini gösterir. λ ise maksimum yüklenme parametresi olarak ifade edilmektedir. Sürekli yük akışı, bir güç sisteminin farklı yük ve üretim koşullarındaki gerilim değişimlerini ve maksimum kapasitesini analiz etmek için kullanılır ve bu koşullardaki sürekli durum davranışlarını incelemektedir (Chiang ve ark.,1995). Sürekli yük akışında gerilim ve maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişkiden yararlanılmaktadır ve analizinde güç akış denklemlerine λ yük parametresi eklenir. Denklemlerin çözümünde ilk olarak geleneksel güç akışından başlangıç temel değerleri bulunur. Bunun sonrasında, farklı yük parametresine teğet bir tahminci uygulanır ve tahmin edilen çözüme, düzeltici adım hesaplamaları uygulanır. Bu işlemler kritik noktaya kadar devam eder (Döşoğlu ve Kılıç,2019).

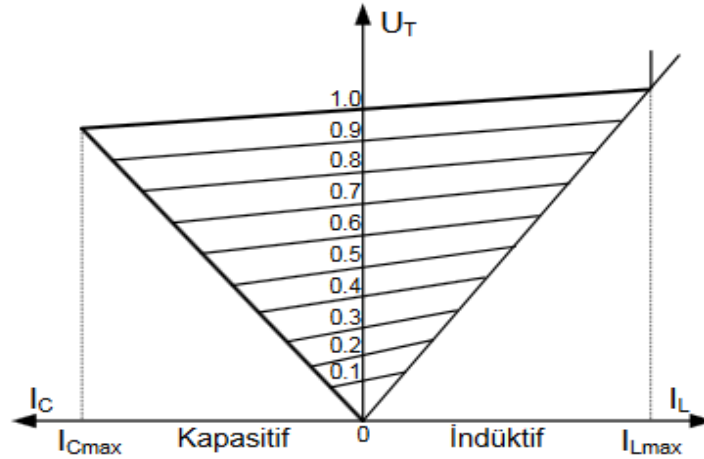
Statik Var Kompansatör (SVC)

Statik VAR Kompansatörleri (SVC), genellikle yüksek hızlı tristör anahtarlama / kontrollü reaktif cihazların kullanımıyla dinamik gerilim kontrolü için mükemmel bir hızlı kontrol edilebilir reaktif şönt kompanzasyon kaynağı sağlar. Bir SVC tipik olarak, bağlantı (coupling) transformatörü, tristör valfleri, reaktörler ve kapasitörler (genellikle harmonik filtreleme için ayarlanır) olmak üzere dört ana bileşenden oluşur: SVC'ler, bara gerilimi üzerinde daha hızlı kontrole sahip olan ve mekanik anahtarlama geleneksel cihazlara kıyasla daha gelişmiş teknolojiye dayalı kontrolörler gerektiren geleneksel tristörlerden oluşur. SVC'ler reaktif güç üretebilen veya absorbe edebilen şönt bağlantılı cihazlardır. Kapasitif veya indüktif akımın kontrollü bir çıkışına sahip olarak, bağlantı barasında gerilim kararlılığını koruyabilirler. Şekil 1'de SVC devre yapısı görülmektedir.



Şekil 1. SVC devre yapısı

SVC Tristör Kontrollü Reaktör (TCR), ve Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC)'den oluşmaktadır. TCR, endüktif akımı sürekli olarak artırmak veya azaltmak için tetikleme açısı kontrolünü kullanır. TSR'de sisteme bağlı olan reaktör grupları kademeli olarak açılır ve kapanır, böylece sürekli tetikleme açısı kontrolü sağlanmamış olur. SVC'ler genellikle yük baralarına bağlandıklarından dolayı yüksek gerilim değerlerine sahiptirler. (Chiang ve ark.,1995), (Ioannides ve Tegopoulos, 1990). Bu yüzden SVC genişletilmiş gerilim seviyesi kapasitesi için seri ya da paralel bağlı daha fazla tristör valfli modüler bir tasarıma sahiptir. Genel olarak, SVC'lerle kullanılan iki tristörlü valf kontrollü / anahtarlama tristör kontrollü reaktör (TCR) ve tristör anahtarlama kapasitördür (TSC). TSC kademeli olarak sisteme cevap sağlamakta ve TCR'nin pürüzsüz veya sürekli değişken bir süseptans kontrolünün gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. SVC gerilim düzenleme modu ve Var kontrol modu olmak üzere iki farklı durumda çalışabilir. SVC gerilim düzenleme modunda çalıştırıldığında, Şekil 2'de yer alan V-I karakteristiğini uygular. B olarak ifade edilen SVC süseptansı, kapasitör grupları (BC_{max}) ve reaktör gruplarının (BL_{max}) toplam reaktif gücü tarafından uygulanan maksimum ve minimum süseptans değerleri içinde kaldığı sürece gerilim ve referans gerilimi (V_{ref}) ayarlanır. Bununla birlikte, genellikle maksimum reaktif güç çıkışında % 1 ile % 4 arasında gerilim düşümünde kullanılır. SVC V-I karakteristiği Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. SVC'nin V-I karakteristiği

SVC'nin V-I karakteristiği ve çalışma bölgesi denklem (3) ile denklem (5) arasında gösterilmiştir.

$$V = V_{ref} \times X_s \times I \quad (3)$$

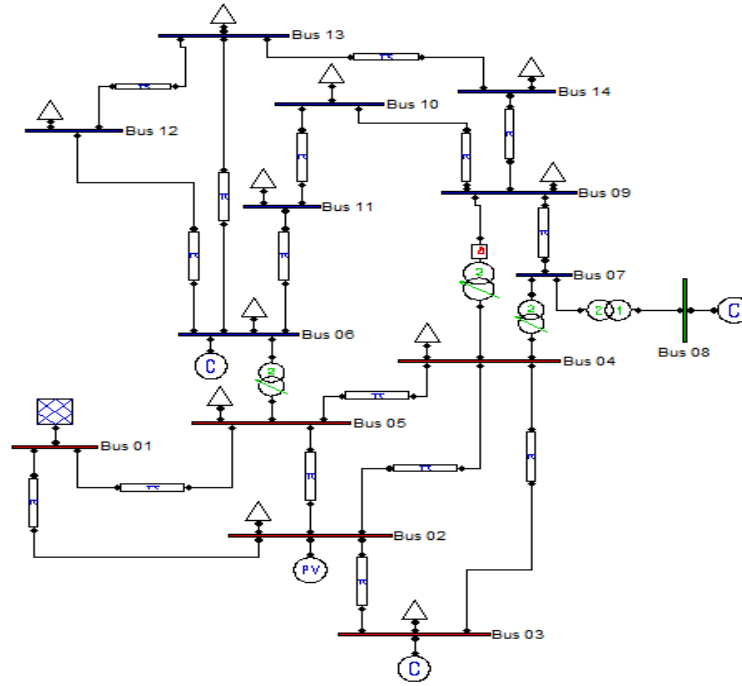
$$V = I / BC_{max} \quad (4)$$

$$V = I / BL_{\max} \quad (5)$$

SVC'nin regülasyon aralığında olması durumunda ($-B_{\max} < B < BL_{\max}$) denklem (3) kullanılmaktadır. SVC'nin tamamen kapasitif olması durumunda ($B = B_{C_{\max}}$) denklem (4) kullanılırken, SVC'nin tamamen endüktif olması durumunda ($B = BL_{\max}$) denklem (5) kullanılmaktadır. Burada V pozitif sıralı gerilimdir. (p.u.) I reaktif akımdır. X_s , eğim veya düşüm reaktansdır. $B_{C_{\max}}$ tüm TSC'ler kullanımda iken TSR veya TCR olmadan maksimum kapasitif süseptans ifadesidir. BL_{\max} tüm TSR'lerin kullanımda iken veya TCR'lerin tam iletimde olduğu durumda TSC'nin bulunmadığı maksimum endüktif süseptanstır. P_{base} ise, üç fazlı temel güçtür. I değerinin 0'dan büyük olması endüktif akımı belirtmektedir.

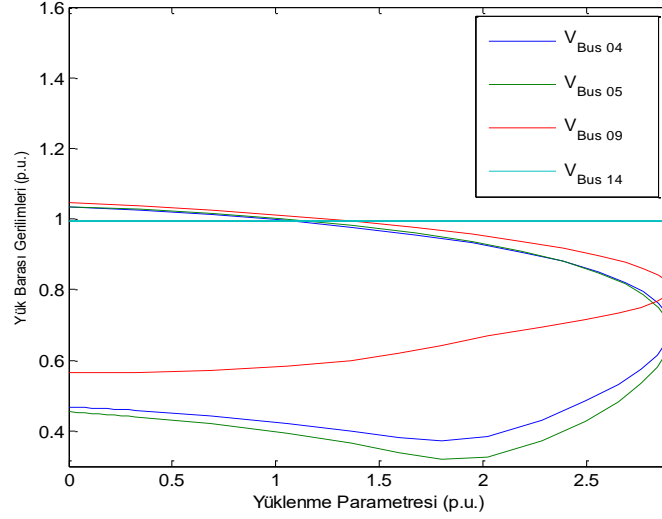
BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) (Milano, 2005) kullanılarak, Şekil 3'te yer alan IEEE 14 baralı güç sisteminde analiz gerçekleştirilmiş ve sürekli yük akışının ele alındığı SVC'de çeşitli endüktif ve kapasitif değerlerdeki gerilim-maksimum yüklenme parametreleri arasındaki ilişkiler üç farklı analiz gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir. Ayrıca, farklı çalışma koşullarındaki gerilim genlik profil değişimleri de ele alınmıştır. Bu sistemde, salınım barası olarak 1 numaralı bara, generatör barası olarak 2,3,6 ve 8 numaralı baralar ve yük barası olarak ise kalan diğer baralar belirlenmiştir. Sistemde, 5-6, 4-8 ve 4-9 numaralı iletim hatlarında gerilim düşürücü transformatörler mevcuttur. Bunun dışında, 5-6 ve 4-9 numaralı iletim hatlarında ise kademe değiştirme ve faz kaydırma işlemleri yapılmaktadır. Sistemde SVC yok iken yapılan sürekli yük akışı sonucunda maksimum yüklenme parametre değeri 2.82 p.u. olarak elde edilmiştir.

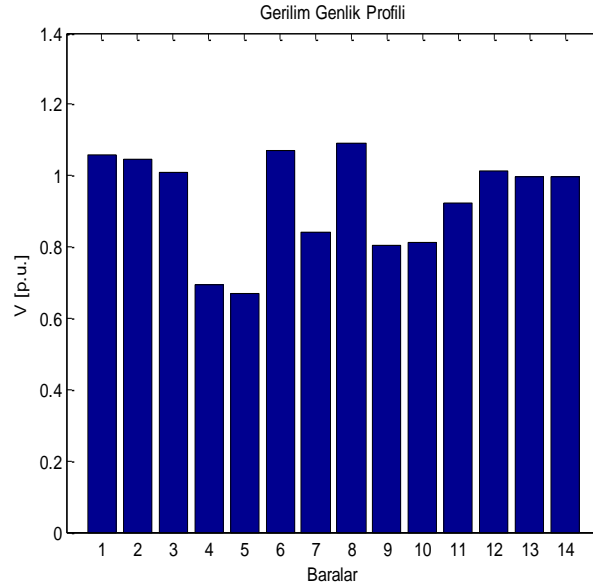


Şekil 3. IEEE 14 Baralı güç sistemi modeli.

İlk analizde, IEEE 14 baralı güç sisteminde 100 MVA gücündeki SVC'nin endüktif 0.02 p.u ve kapasitif 1 p.u değerleri için 2.9081 p.u değerinde maksimum yüklenme parametresi elde edilmiştir. SVC endüktif ve kapasitif çalışma değerlerindeki gerilim-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi Şekil 4'te verilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. İlk analiz için gerilim-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi (maksimum yüklenme parametresi=2.9081).



Şekil 5. İlk analiz için baraların gerilim genlik profili (maksimum yüklenme parametresi=2.9081).

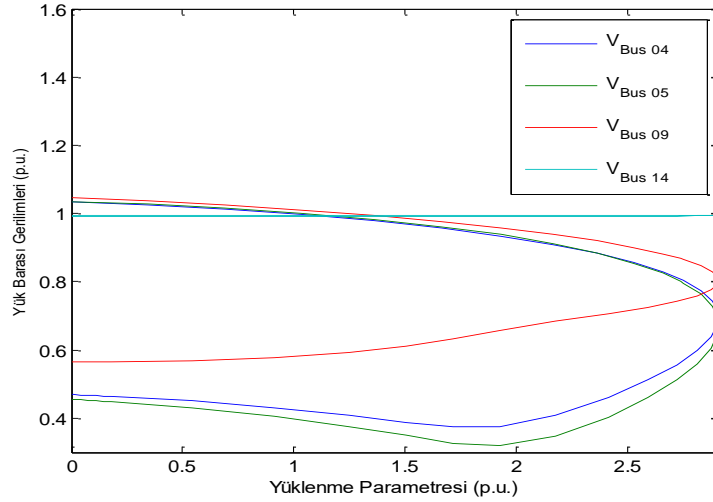
İkinci analizde IEEE 14 baralı güç sisteminde 100 MVA gücünde olan SVC'nin, kapasitif değeri 1 p.u'de sabit tutulmuş ve 5 farklı endüktif değer için elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sabit kapasitif ve farklı endüktif değerler için yüklenme parametresi.

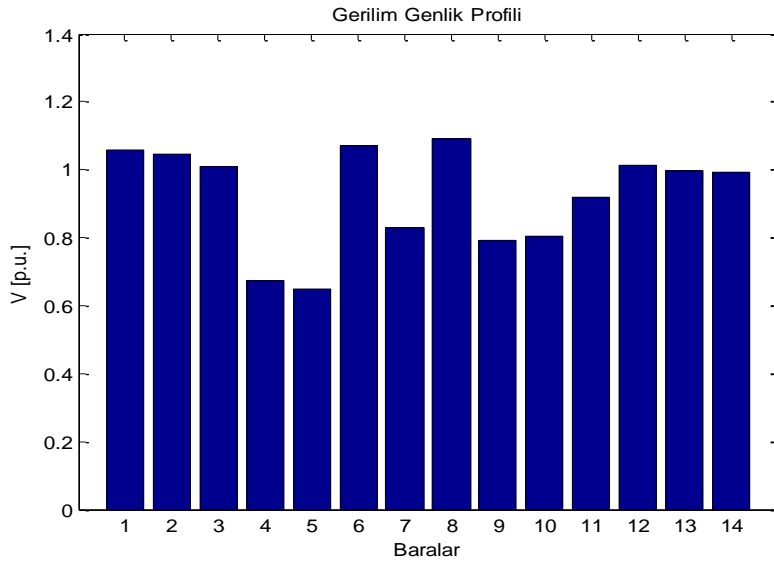
SVC endüktif değer	SVC kapasitif değer	Yüklenme parametresi
0.01	1	2.9082
0.05	1	2.9084
0.1	1	2.9079
0.5	1	2.9084
1	1	2.9059

Tablo 1'den görüleceği üzere SVC'nin kapasitif değeri sabit tutularak endüktif değeri arttırıldıkça, bazı durumlarda maksimum yüklenme parametre değerinin azaldığı, diğer durumlarda ise maksimum yüklenme parametre değerlerinin arttığı görülmektedir. Tablodaki durum için maksimum yüklenme parametre değerinin

en yüksek olduğu durum SVC endüktif değerinin 0.5 ve 0.05 olduğu SVC kapasitif değerinin 1 p.u olduğu durum olurken, maksimum yüklenme parametre değerinin en küçük olduğu durum hem SVC endüktif değerinin hem de SVC kapasitif değerinin 1 p.u. olduğu durum olmuştur. Benzetim çalışmasında ikinci analiz sonuçlarında SVC endüktif değerinin 1 p.u ve SVC kapasitif değerinin 1 p.u. olduğu durum incelenmiştir. Birinci ve ikinci analizlerde SVC'nin 14 baralı yük barasına bağlanması ile baraların gerilim genlik profil değerleri yükselmiştir. İkinci analizde sistemin gerilim-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi Şekil 6'da verilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7'de gösterilmiştir.

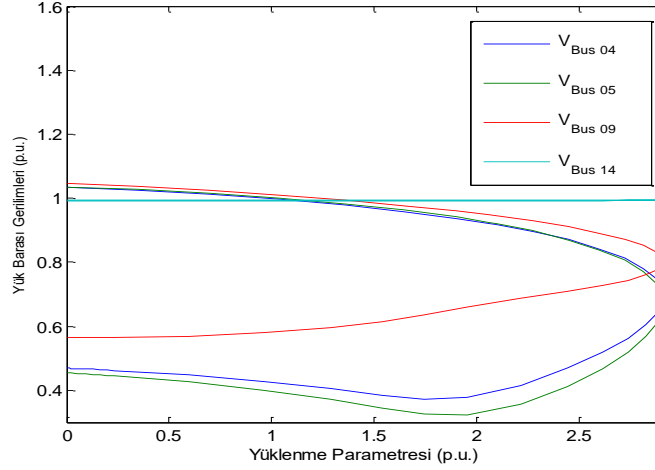


Şekil 6. İkinci analiz için gerilim-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi (maksimum yüklenme parametresi=2.9059).

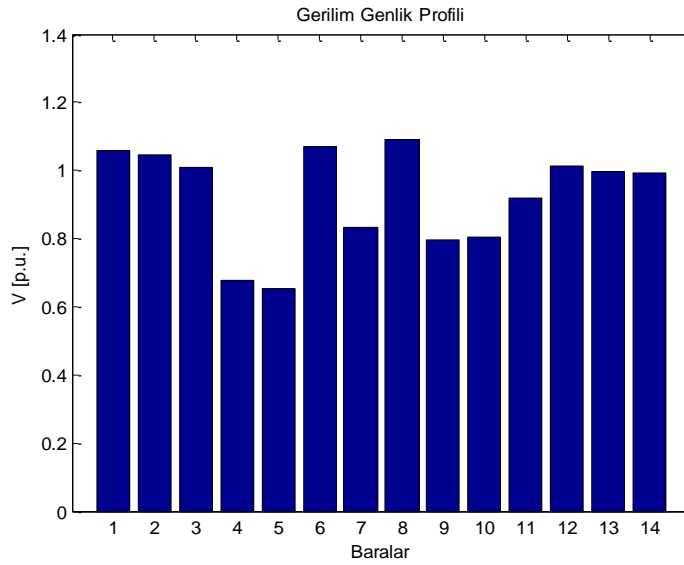


Şekil 7. İkinci analiz için baraların gerilim genlik profili (maksimum yüklenme parametresi=2.9059).

Üçüncü analizde ise IEEE 14 baralı güç sisteminde 100 MVA gücünde olan SVC'nin endüktif değerinin 1 p.u ve kapasitif değerinin 0.08 p.u olduğu durumda elde edilen maksimum yüklenme parametresi değeri 2.9057 p.u'dur. Elde edilen sonuca göre gerilim-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi Şekil 8'de verilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8. Üçüncü analiz için gerilim-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi (maksimum yüklenme parametresi=2.9057).



Şekil 9. Üçüncü analiz için baraların gerilim genlik profili (maksimum yüklenme parametresi=2.9057).

Üçüncü analiz yönteminde bu defa SVC endüktif değeri sabit tutulup, SVC kapasitif değerler farklı değerler almıştır. 5 farklı durum için elde edilen sonuçlar Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Sabit endüktif ve farklı kapasitif değerler için yüklenme parametresi.

SVC endüktif değer	SVC kapasitif değer	Yüklenme parametresi
1	0.15	2.908
1	0.3	2.908
1	0.5	2.9055
1	0.7	2.9084
1	1	2.9059

Tablo 2’de görüldüğü gibi SVC’nin endüktif değeri sabit tutularak kapasitif değerler arttırıldıkça, bazı durumlarda maksimum yüklenme parametre değerinin azaldığı, diğer durumlarda ise maksimum yüklenme parametre değerlerinin arttığı görülmektedir. Tablodaki durum için maksimum yüklenme parametre değerinin en yüksek olduğu durum SVC endüktif değerinin 1 p.u. olduğu durum, SVC kapasitif değerinin 0.7 p.u olduğu durum olurken, maksimum yüklenme parametre değerinin en küçük olduğu durum SVC endüktif değerinin 1 p.u. olduğu durumda, SVC kapasitif değerinin 0.5 p.u. olduğu durum olmuştur. Üçüncü analizde SVC’nin 14 baralı yük barasına bağlanmasına bağlı olarak baraların gerilim genlik profil değerleri yükselmiştir.

SONUÇ

Çok baralı güç sistemlerinde sistemin yüklenebilirliğini arttırmak için Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) elemanlarından SVC kullanılarak farklı endüktif ve kapasitif çalışma durumlarına göre optimum değerlerin bulunması bu çalışmada incelenmiştir. Öncelikli olarak SVC'nin IEEE 14 baralı sistemde en zayıf olan yük barasına bağlanması için yük akışı analizi gerçekleştirilmiştir. 14 numaralı yük barasında SVC bağlanması ile maksimum yüklenme parametre değerinin 2.82 p.u. değerinden 2.90 p.u. seviyelerine yükseldiği görülmüştür. Yapılan çalışmada SVC'nin hem endüktif ve hem de kapasitif değerlerde kullanılmasında sistemin maksimum yüklenme parametresi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Her iki çalışma modunun da sistem maksimum yüklenme parametre değerlerini değiştirdiği görülmüştür. Üç analiz sonucunda en iyi maksimum yüklenme parametre değerleri SVC endüktif değerinin 0.5 p.u., SVC kapasitif değerinin 1 p.u olduğu durum ve SVC endüktif değerinin 1 p.u., SVC kapasitif değerinin 0.7 p.u olduğu durumlar olarak belirlenmiştir. SVC'nin IEEE 14 baralı sistemde kullanılması ile endüktif ve kapasitif çalışma durumlarında baraların gerilim genlik profil değerlerini arttırdığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Bhaladhare SB, Bedekar PP 2013. Enhancement of voltage stability through optimal location of SVC'', International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, 2(2):671–677.
- Chiang HD, Flueck AJ, Shah KS and Balu N 1995. "CPFLOW: A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations," IEEE Transactions on Power Systems, 10(2):623-634.
- Çiftçi A 2015. Facts cihazları kullanılan elektrik güç sistemlerinde enerji fonksiyonu ile gerilim kararlılığı analizi. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi.
- Döşoğlu MK, Dursun M, Güvenç U 2019. Farklı noktalardaki hat kopmalarının gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 11(2): 70-80.
- Döşoğlu MK, Poyraz G 2019. Detaylı ve sadeleştirilmiş SVC modellerinin gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri. 2. Uluslararası Türk Dünyası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, 2 (2): 529-536.
- Döşoğlu MK, Kılıç TE 2019. Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Analizinin UPFC-EDS ile İncelenmesi. 3. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (INERS'19),327-332.
- Güleryüz M 2011. Facts cihazları ve rüzgar enerji santrallerinin gerilim kararlılığına etkilerinin incelenmesi. İstanbul :İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi.
- Haque MH 2007. Best location of SVC to improve first swing stability limit of a power system. Electric Power Systems Research, 77(10): 1402-1409.
- Ioannides MG, Tegopoulos JA 1990. Generalized optimization slip power recovery drives, IEEE Transactions on Energy Conversion, 5(1): 91-97.
- Kundur P, Paserba J, Ajarapu V, Anderson G, Bose A, Canizares C, Hatziargyriou N, Hill D, Stankovic A, Taylor C, Cutsem TV, Vittal V 2004. Definition and classification of power system stability. IEEE Transaction of Power System, 19(2): 1387–1401.
- Kundur P, Balu NJ, Lauby MG (1994). Power System Stability and Control, (7), New York: McGraw-Hill.
- Milano F 2005. An open source power system analysis toolbox. IEEE Transactions on Power systems, 20(3): 1199-1206.
- Skaria NA, Baby S, Anumodu DM 2014. Genetic algorithm based optimal location of SVC in power system for voltage stability enhancement. Emerging Research Areas: Magnetics Machines and Drives (AICERA/iCMMD) 2014 Annual International Conference on, 1-6.
- Thukaram D, Lomi A 2000. Selection of static VAR compensator location and size for system voltage stability improvement. Electric Power Systems Research, 54(2): 139-150.