

ZIP YÜK MODELİNDE MAKSİMUM YÜKLENME PARAMETRE DEĞERİNİN STATCOM VE SVC İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

M. Kenan DÖŞOĞLU^{1*}, Mahmut ÖZBAY¹, Mustafa DURSUN¹, Bayram KÜÇÜK¹, Gökhan POYRAZ²

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

kenandosoglu@duzce.edu.tr , mahmutozbay@duzce.edu.tr , mustafadursun@duzce.edu.tr,
bayramkucuk@duzce.edu.tr

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

gokhan.povraz@bilecik.edu.tr

* M. Kenan DÖŞOĞLU

Özet

Bu çalışmada 11 baralı güç sisteminde sabit empedans, akım ve aktif güç (ZIP) yük modelinin statik gerilim kararlılığında oluşturmuş olduğu etkiler incelenmiştir. Maksimum yüklenme analizi için güç sisteminde Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) elemanlarından Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) ve Statik Var Kompanzator (SVC) kullanılmıştır. ZIP yük modelinin farklı parametre değerindeki etkileri gerilim-maksimum yüklenme parametresi açısından yorumlanmıştır. Dahası farklı parametre değerlerinde STATCOM ve SVC ile 11 baralı güç sisteminin gerilim profilleri incelenmiştir. STATCOM'un kullanılması ile statik gerilim kararlılığında daha etkili olduğu ve maksimum yüklenme parametre değerinin arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: ZIP Yük Modeli, Maksimum Yüklenme Parametresi, STATCOM, SVC

1. Giriş

Güç sistemlerinin karmaşık yapısı ve tüketicilerdeki yük talebinin sürekli olarak değişmesinden dolayı kararlılık problemleri ortaya çıkmaktadır. Kararlılık problemlerinin en önemli olanlarından birisi gerilim kararlılığı sınıfında toplanmaktadır. Genel olarak gerilim kararlılığı bara gerilim profilini belli bir değer aralığında tutmaktır. Buna bağlı olarak aktif gücünde kontrol altına almaktır. Dinamik ve statik gerilim kararlılığı çalışmalarında literatürde incelenmektedir. Statik gerilim kararlılık problemlerinin ortaya çıkmasına neden olan en önemli etkenler hat kopması ve sistem devre dışı kalmasıdır. Hat kopması ve sistem devre dışı kalması durumlarında çok makinalı güç sistemlerinin bara gerilim-aktif güç arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Çeşitli durumlardan yük barasının çok etkilendiği görülmüştür [1-2]. Diğer bir dinamik gerilim kararlılığına etki eden faktör asenkron motorların devreye girip çıkmasıdır. Asenkron motorların belli zaman aralığında çalışması gerilim kararlılığı açısından önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır [3]. Dinamik gerilim kararlılığı analizinde kullanılan jakobiyen matrisin geliştirilmesi işleminde sık sık görülen durumlar arasındadır [4]. Statik gerilim kararlılığı genelde sürekli durum çalışma esnasında karşımıza çıkabilecek olayları genel olarak göstermektedir. Güç sisteminde hat uzunluğunun değişmesi, yük değerindeki değişimler, hat başı gerilim değişmesi, hat kayıp faktörü, kullanılan paralel hat sayısı, şönt-seri kompanzasyon değişim durumları statik gerilim kararlılığı sınıfında toplanmaktadır [5]. Dahası statik gerilim kararlılığı analizlerinde transformator kademe değiştirilmesi ve faz kaydırma oranları kullanılmıştır. Farklı kademe değiştirici ve faz kaydırma oranlarında bara gerilim ve maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişkiler incelenmiştir [6-7]. Bara geriliminin çalışma limitlerinin artırılması ve gerilim değerlerinin kararlı bölgede kalması için Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) elemanları yaygın olarak güç sistemlerinde kullanılmaktadır. FACTS cihazlarından, Statik Senkron Kompanzator (STATCOM), Statik Var Kompanzator (SVC), Statik Senkron Seri Kompanzator (SSSC), Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC) ve Birleşik Güç Akışı Kontrol (UPFC) sistemin yüklenme parametre değerini arttırmaktadır [8-10]. Buna bağlı olarak bara gerilim profilleri FACTS cihazları sayesinde iyileşmektedir.

Yapılan bu çalışmada, statik ve dinamik yük modellerinin haricinde kullanılan 2. Dereceden denkleme sahip olan sabit empedans, sabit akım ve sabit aktif güç (ZIP) yük modelinin gerilim-maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişki için FACTS cihazlarından STATCOM ve SVC kullanılmıştır. Bara gerilim profilleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Paralel olarak baraya bağlanan FACTS cihazlarının ZIP yük modelindeki parametre değişimleri üzerinde ne kadar etkisi olduğu bu çalışmada incelenmiştir.

2. Statik Gerilim Kararlılığı Ve Sürekli Yük Akışı

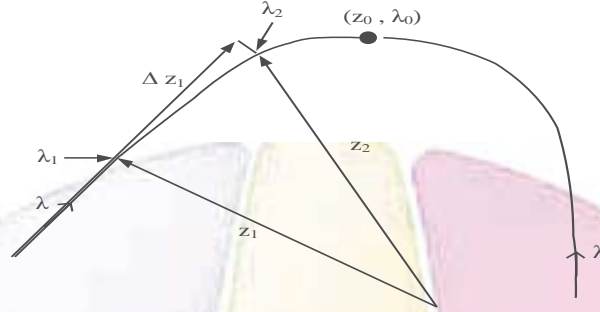
Statik gerilim kararlılığı reaktif güç değişimine bağlı olarak değer almaktadır. Reaktif gücün sağlanması ile yük barasının çalışma koşulları iyileştirilmiş olur. Eğer reaktif güç desteği belirlenen sınırların altında kaldığında ve gerilim düşümü başladığında sistem çökmeye gider. Bunun engellemek için 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.

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

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



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 ve yükün aktif güç ve reaktif güç değerleri, λ maksimum yüklenme parametre değeridir [11]. Sürekli yük akışında gerilim ve maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişkiden yararlanılmaktadır. Sürekli yük akışı analizinde belli sistem modellerinin desteklenmesi olmaksızın belirli zorluklara karşı çözümleme çok üstündür. Ayrıca sistem eşitliklerindeki tekil çözümleme durumunun oluşturacağı olumsuz durumlara karşı gerilim otomatik olarak değiştirme özelliğine sahiptir. Sürekli yük akışındaki strateji kullanımı Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1: Sürekli yük akış metodu

Burada, (z_1, λ_1) denge noktaları olarak bilinen durumdur, $\Delta\lambda_1$ sistem parametre değerinin değişmesi ve Δz_1 vektör çözümlemesinde kullanılmaktadır. İlk adımda tahmin etme işlemi yapılmaktadır. Başlangıç olarak $z_1 + \Delta z_1$, $\lambda_1 + \Delta\lambda_1$, değerleri üretilmektedir. Bu üretilen değerler sistem profilindeki $z_2 + \Delta z_2$ yeni denge noktalarını düzenlemek için kullanılır.

3. ZIP Yük Modeli

Statik yük karakteristiği gerilime bağlı olarak sabit empedans, sabit akım ve sabit aktif güç olarak sınıflandırılan yük modelidir. Sabit empedanslı yük için güç gerilime bağlı ikinci dereceden bir denklem olmaktadır. Sabit akımın doğrusal olmasında ve gücün sabit olmasında güç gerilim değişiminden tamamen bağımsız olmaktadır. ZIP model aktif ve reaktif güç eşitliklerini gösterecek olursak;

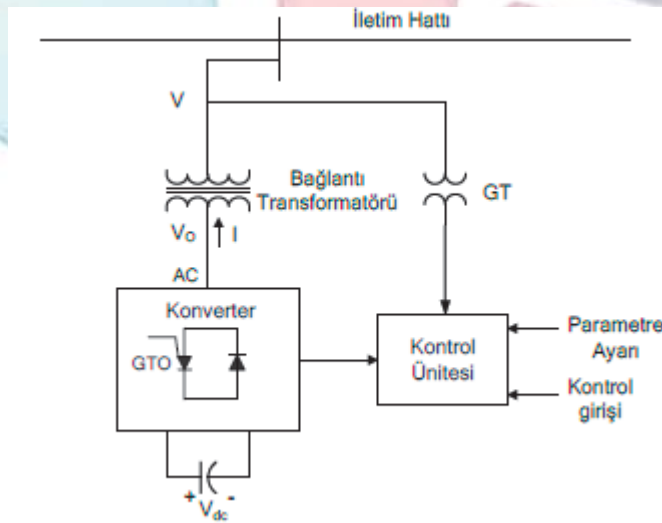
$$P = P_0 \left[p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \frac{V}{V_0} + p_3 \right] \quad (3)$$

$$Q = Q_0 \left[q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \frac{V}{V_0} + q_3 \right] \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada P_0 yükün aktif gücü, Q_0 reaktif gücü, V bara gerilimini, V_0 yük akışı sonucundaki bara gerilimini, p ve q değerleri aktif ve reaktif güç parametreleridir. ZIP yük modelde $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ ve $q_1 + q_2 + q_3 = 1$ olarak alınmaktadır [12].

4. STATCOM ve SVC

STATCOM devre modeli Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2: STATCOM devre modeli

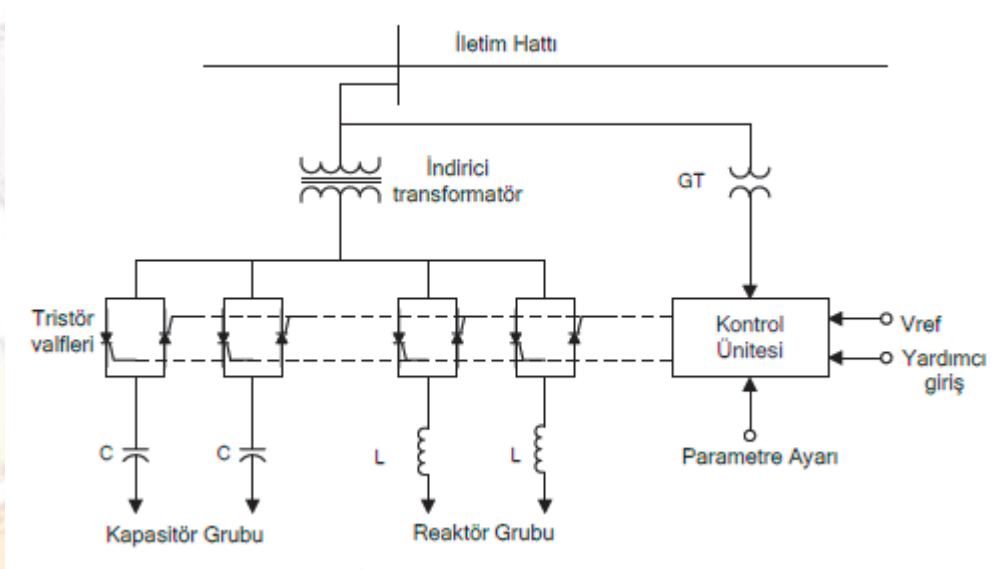
Güç elektroniği tabanlı kompanzasyon cihazlarından biri olarak bilinen STATCOM bağlantı transformatörü, gerilim kaynaklı konverter, kontrol ünitesi ve DC enerji depolama elemanından oluşmaktadır. İletim hattına paralel olarak bağlanan STATCOM bağlı olduğu barada reaktif güç alış-verişine bağlı gerilim düzenlemesi yapmaktadır. Bu işlem STATCOM'un temel işlemlerinden biridir. Diğer işlemlerinden biride faz açısı kontrolü yapmaktır. STATCOM gerilim kontrolü modülasyon indeksi ile sağlanırken, faz açısı kontrolünde gerilim kaynaklı konverter'in tristör tetikleme açıları ile sağlanır. STATCOM belli zaman aralıklarında hem endüktif hemde kapasitif akım sağlamaktadır. Konverterden hatta doğru akan akımın değeri denklem 5'de gösterilmiştir.

$$I_{ac} = \frac{V_0 - V_{ac}}{X} \quad (5)$$

Burada, V_0 inverter çıkış gerilimi, V_{ac} şebeke gerilimi, X bağlantı transformatörünün kaçak reaktansıdır. STATCOM reaktif güç eşitliği denklem 6'da gösterilmiştir.

$$Q = \frac{V_0^2 - V_0 V_{ac} \cos \alpha}{X} \quad (6)$$

SVC güç sistemlerinde baraya paralel bağlanarak reaktif güç alış-verişine bağlı olarak gerilim kontrolünü gerçekleştiren bir FACTS cihazıdır. Yapısı genel itibarı ile STATCOM'dan daha basittir. SVC devre modeli Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3: SVC devre modeli

SVC devre modelinde görüldüğü gibi, indirici transformatör, kapasitör grupları, reaktör grupları ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. SVC'nin empedans hesaplaması tristörlerin tetikleme açısına göre bulunmaktadır. Endüktif durumda sistemden reaktif güç çekilmekte, kapasitif durumda ise sisteme reaktif güç verilmektedir. Cihazın kapasitif veya endüktif çalışma durumunu endüktans belirler. Endüktansın değeri hesaplaması denklem 7'de gösterilmiştir.

$$X_v = X_l \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad (7)$$

SVC'nin eşdeğer reaktansı denklem 8'de gösterilmiştir.

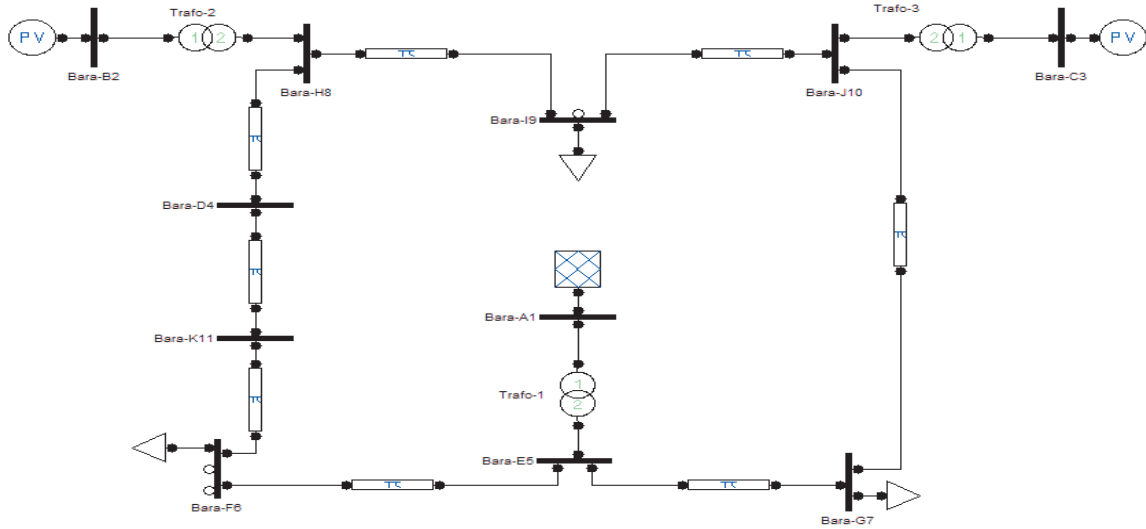
$$X_e = X_c \frac{\pi / r_x}{\sin 2\alpha - 2\alpha + \pi(2 - \frac{1}{r_x})} \quad (8)$$

Burada, $r_x = X_v / X_l$ tetikleme açılarının sınırları ile denetleyici limit değerlerini verir, X_c ise kapasitif reaktanstır. SVC'nin çıkış gücü denklem 9'de gösterilmiştir [13].

$$Q_c = \frac{V_{ac}^2}{X_v} - \frac{V_{ac}^2}{X_c} \quad (9)$$

5. Benzetim Modeli

11 numaralı güç sisteminin devre modeli Şekil'4 de gösterilmiştir.



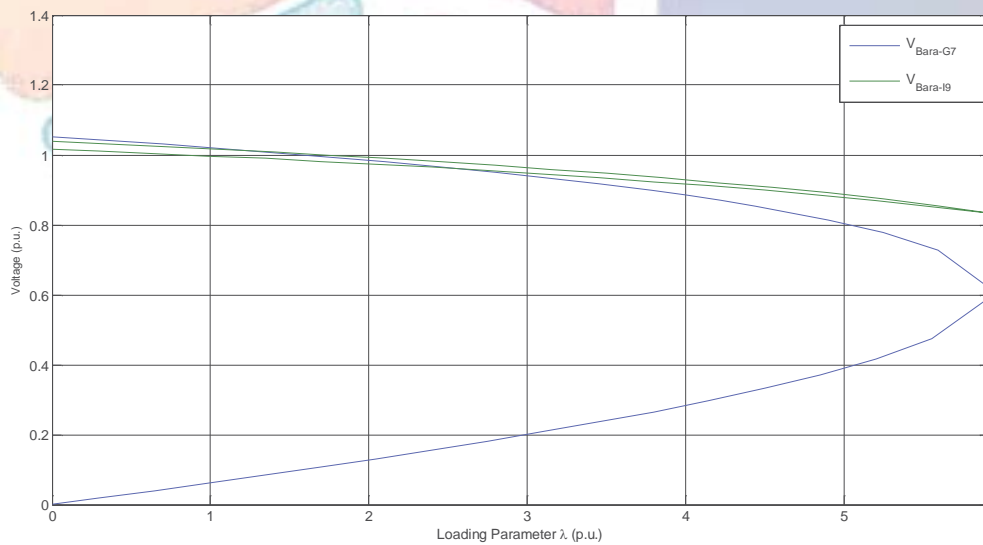
Şekil 4: 11 baralı güç sistemi

11 baralı test sistemi 1 adet salınım barası, 3 PV generatör barası, 3 transformatör, 7 hat ve 3 PQ yükünden oluşmaktadır. Sistemdeki toplam yük 315MW ve 115MVAR'dır. Normalde 9 baralı olan test sistemi orijinal test sistemi yapılacak incelemeye uygun olarak önce 10 ve sonra 11 baralı hale getirilmiştir. ZIP yük modeli bara F6'ya bağlanmıştır. Benzer şekilde STATCOM ve SVC'de aynı baraya bağlanmıştır. Öncelikle STATCOM'un bağlı olduğu durumda ZIP yük modelinde farklı değerlerde nelerin değiştiği görülmüştür. Daha sonraki aşamada SVC'nin bağlanması ile gerilim-maksimum yüklenme parametre arasındaki ilişkiler üzerinde durulmuştur [14-15].

6. Benzetim Modeli Sonuçları

11 baralı güç sisteminde bara F6'daki PQ yükü çıkarılarak yerine ZIP yük modeli bağlanmıştır. Bundan sonraki kısım 2 senaryodan oluşmaktadır. İlk senaryoda bara F6'ya ZIP yük model ile beraber 100 MVA gücünde STATCOM bağlanmıştır. Farklı ZIP yük model parametre değerindeki statik gerilim kararlılığı analizleri incelenmiştir. İkinci senaryoda STATCOM yerine 100 MVA'lık SVC kullanılması ile tekrarlanmıştır.

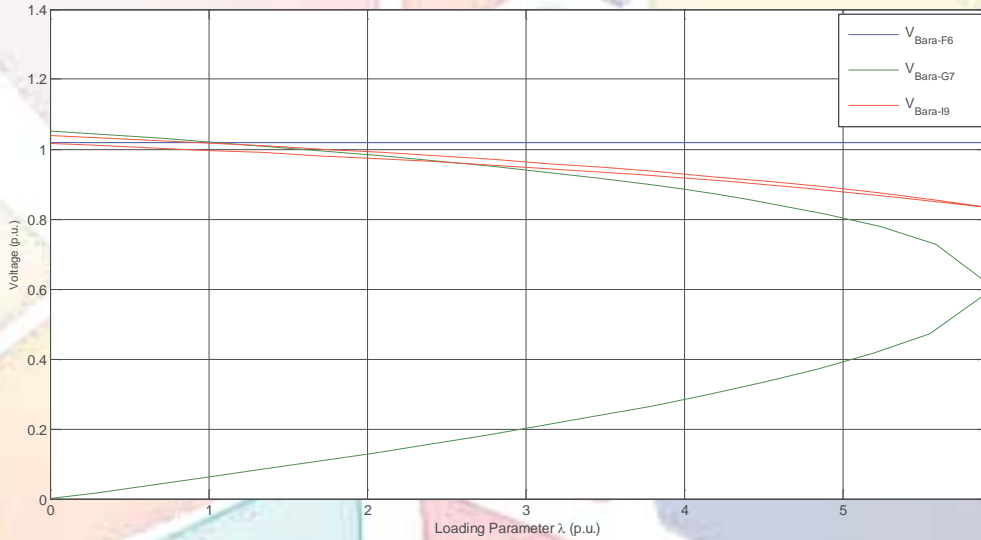
Birinci senaryoda 100 MVA STATCOM ile ZIP yük aktif ve reaktif giriş parametrelerinin her ikisi de 0.05-0.05-0.9, 0.1-0.1-0.8 ve 0.15-0.15-0.7olarak girildiğinde sistemin maksimum yüklenme parametresi sırasıyla 5.93, 5.91 ve 5.89 olmuştur. Yük baralarında elde edilen gerilim gerilim-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi Şekil 5 ile Şekil 7 arasında gösterilmiştir.



Şekil 5: Sistemde 0.05-0.05-0.9 değerlerinde ZIP Yük ile STATCOM mevcut Yük Baralarının Gerilim-Maksimum Yüklenme Parametresi (5.93)

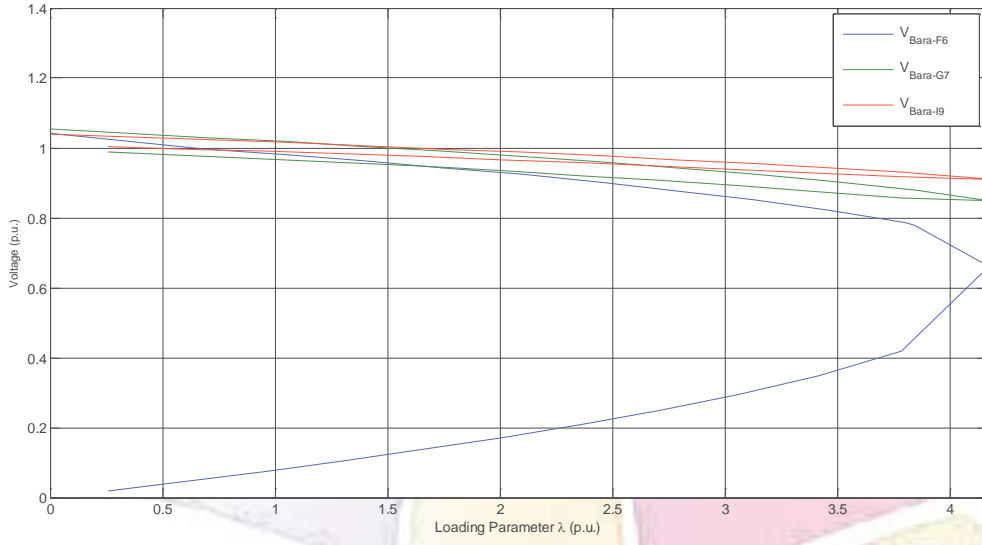


Şekil 6: Sistemde 0.1-0.1-0.8 değerlerinde ZIP Yük ile STATCOM mevcut Yük Baralarının Gerilim-Maksimum Yükleme Parametresi (5.91)

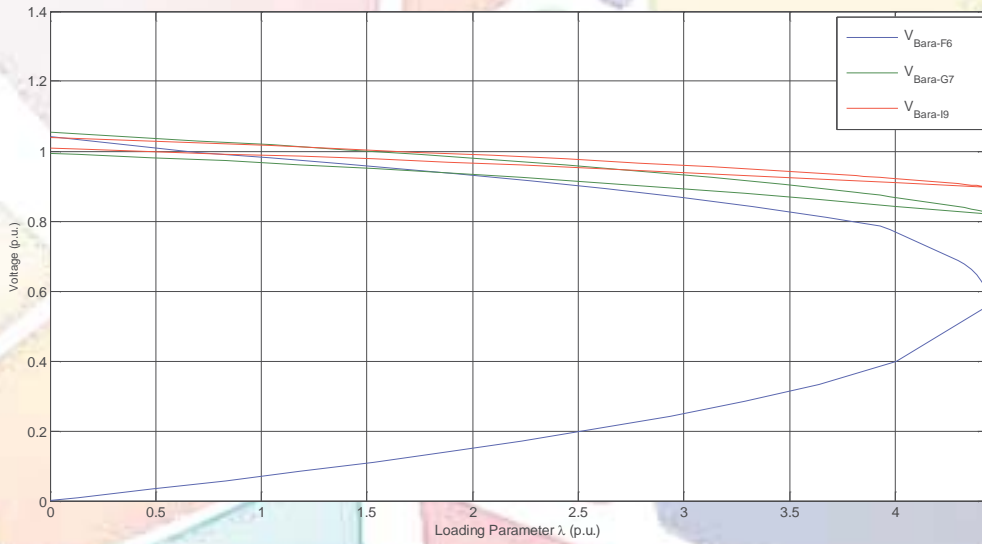


Şekil 7: Sistemde 0.15-0.15-0.7 değerlerinde ZIP Yük ile STATCOM mevcut Yük Baralarının Gerilim-Maksimum Yükleme Parametresi (5.89)

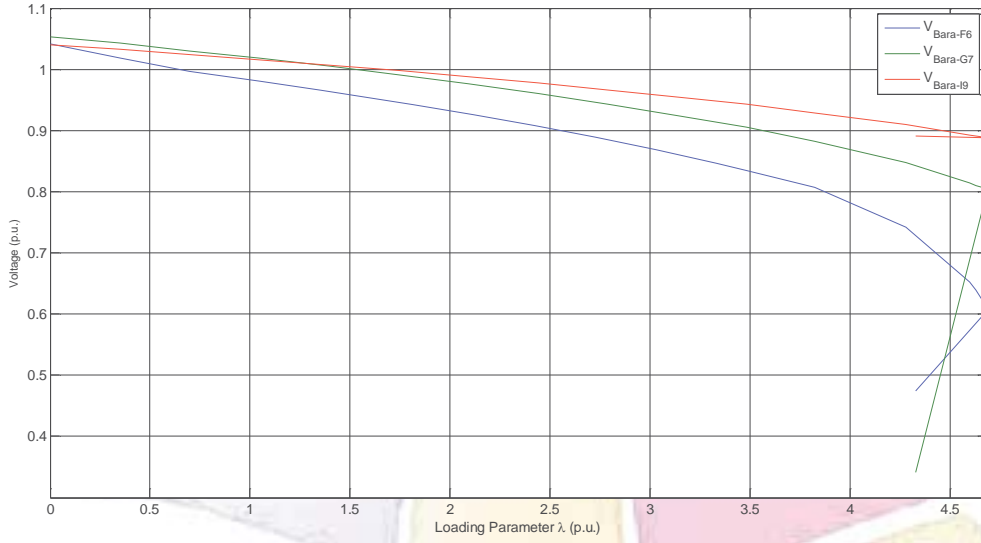
İkinci senaryoda 100 MVA SVC ile ZIP yük aktif ve reaktif giriş parametrelerinin her ikisi de 0.05-0.05-0.9, 0.1-0.1-0.8 ve 0.15-0.15-0.7 olarak girildiğinde sistemin maksimum yüklenme parametresi sırasıyla 4.16, 4.43 ve 4.68 olmuştur. Yük baralarında elde edilen gerilim gerilim-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi Şekil 8 ile Şekil 10 arasında gösterilmiştir.



Şekil 8: Sistemde 0.05-0.05-0.9 değerlerinde ZIP Yük ile SVC mevcut Yük Baralarının Gerilim-Maksimum Yüklenme Parametresi (4.16)



Şekil 9: Sistemde 0.1-0.1-0.8 değerlerinde ZIP Yük ile SVC mevcut Yük Baralarının Gerilim-Maksimum Yüklenme Parametresi (4.43)



Şekil 10: Güç Sistemde 0.15-0.15-0.7değerlerinde ZIP Yük ile SVC mevcut Yük Baralarının Gerilim-Maksimum Yükleme Parametresi (4.68)

7. Sonuçlar

Bu çalışmada, ZIP yük modelinin farklı parametre değerlerindeki statik gerilim kararlılığı analizleri FACTS cihazlarından STATCOM ve SVC ile incelenmiştir. STATCOM ve SVC sistemin maksimum yüklenme parametre değerini tüm farklı parametre durumlarında arttırdığı görülmüştür. Özellikle güç elektroniği tabanlı kompanzasyon cihazı olan STATCOM'un SVC'e göre gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri daha yüksek çıkmıştır. ZIP yük modelinde STATCOM'un kullanılması ile yük parametreleri değiştikçe maksimum yüklenme parametre değeri çok küçük değişmektedir. Ancak ZIP yük modeli ile SVC'nin kullanılmasında yük parametre değişimlerinde maksimum yüklenme parametre değerini daha büyük oranlarda değiştirmektedir. En büyük yüklenebilirlik değeri STATCOM ve 0.05-0.05-0.9 değerlerinde ZIP yük modelinin kullanılması ile elde edilmiştir. Bu değer 5.93'dür. En küçük yüklenebilirlik değeri SVC ve 0.05-0.05-0.9 değerlerinde ZIP yük modelinin kullanılması ile elde edilmiştir. Bu değer 4.16 olarak bulunmuştur.

8. Kaynakça

- [1] Chowdhury, B. H. and Taylor, C. W., "Voltage Stability Analysis: VQ Power Flow Simulation Versus Dynamic Simulation", *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(4), 1354-1359, 2000.
- [2] Andersson, G., Donalek, P., Farmer, R., Hatziargyriou, N., Kamwa, I., Kundur, P. and Schulz, R., "Causes of The 2003 Major Grid Blackouts in North America and Europe, and Recommended Means to Improve System Dynamic Performance", *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(4), 1922-1928, 2005.
- [3] Pereira, L., Kosterev, D., Mackin, P., Davies, D., Undrill, J. and Zhu, W., "An Interim Dynamic Induction Motor Model for Stability Studies in The WSCC", *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(4), 1108-1115, 2002.
- [4] Huang, G. M., Zhao, L. and Song, X., "A New Bifurcation Analysis for Power System Dynamic Voltage Stability Studies", *IEEE In Power Engineering Society Winter Meeting, 2002*, New York, USA, 27-31 Jan., 2, 882-887, 2002.
- [5] Öztürk, A., *Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Genetik Algoritma İle İncelenmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [6] Döşoğlu, M.K., Tosun, S., Öztürk, A. and Poyraz G., "Faz Kaydırıcı Transformatörlerin Statik Gerilim Kararlılığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(3), 43-52, 2013.
- [7] Döşoğlu, M.K., Tosun, S., Öztürk, A., Saraçoğlu, B. and Poyraz, G., "Güç Sistemlerinde Kademe Değiştirici Transformatörlerin Statik Gerilim Kararlılığındaki Etkilerinin İncelenmesi", *7th International Advanced Technologies Symposium (IATS'13)*, Istanbul, Turkey, 30 Oct.- 1 Nov., 598-602, 2013.
- [8] Sode-Yome, A. and Mithulanathan, 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.
- [9] Sode-Yome, A., Mithulanathan, N. and Lee, K. Y., "Static Voltage Stability Margin Enhancement Using STATCOM, TCSC and SSSC", *IEEE In Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES*, Dailan, China, 18 August, 1-6, 2005.
- [10] Natesan, R. and Radman, G., "Effects of STATCOM, SSSC and UPFC on Voltage Stability", *In System Theory, 2004. Proceedings of the Thirty-Sixth Southeastern Symposium on*, Atlanta, USA, 16 March, 546-550, 2004.



- [11] 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 & Energy Systems*, 26(8), 619-626, 2004.
- [12] Döşoğlu, M. K. and Arsoy, A. B., “Modeling and Simulation of Static Loads for Wind Power Applications”, *Neural Computing and Applications*, 25(5), 997-1006, 2014.
- [13] Tosun, S., Öztürk, A., Yalçın, M. A., Döşoğlu, K., and Güvenç, U. (2011). “Güç sisteminde SVC ve STATCOM Denetleyici Etkilerinin İncelenmesi”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11) 2011*, Elazığ, Turkey, 16-18 May, 287-292, 2011.
- [14] Kaya, K. *Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri Kontrolörlerinin İncelenmesi ve Şebeke Üzerindeki Etkileri*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [15] Milano, F. “An Open Source Power System Analysis Toolbox”, *IEEE Transactions on Power systems*, 20(3), 1199-1206, 2005.

