



Araştırma Makalesi/Research Article

Güç sistemlerinde sürekli ve geçici durum için gerilim kararlılığının STATCOM-Yakıt hücresi ile incelenmesi

M. Kenan Döşoğlu¹, Muhammet Demirbaş²

¹Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye

²Kastamonu Üniversitesi, Tosya Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 37300, Kastamonu, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Sürekli ve geçici durum
Gerilim kararlılığı
STATCOM
Yakıt hücresi

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 14.07.2023
Kabul Tarihi: 07.09.2023

Öz: Güç sistemlerinde, çeşitli çalışma koşullarından dolayı, bara gerilimlerinde ve yüklenme parametresi değerlerinde azalmalar meydana gelmektedir. Buda sistemin kararsızlığa girmesine sebep olmaktadır. Kararsızlık durumlarını ortadan kaldırmak için Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) yaygın olarak kullanılmaktadır. STATCOM'un güç sistemlerinde etkililiğini arttırmak için enerji depolama sistemlerinden yakıt hücresi kullanılabilir. Bu çalışmada 6 baralı güç sisteminde sürekli ve geçici durum gerilim kararlılığı için STATCOM ve yakıt hücresi birlikte kullanılmıştır. Güç sisteminde sürekli durum ve kesici açma-kapama durumunda oluşan geçici durum çalışmasındaki bara gerilim-maksimum yüklenme parametresi arasındaki ilişki incelenmiştir. Bunun yanısıra yakıt hücresinin farklı güç değerlerindeki etkileri de detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda STATCOM ve yakıt hücresinin birlikte kullanılmasının sürekli ve geçici durumda gerilim kararlılığı açısından etkili sonuçlar verdiği görülmüştür.

Atıf için/To Cite:

Döşoğlu, M.K Demirbaş M. Güç sistemlerinde sürekli ve geçici durum için gerilim kararlılığının STATCOM-Yakıt hücresi ile incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(3), 95-102, 2023.

Investigation of voltage stability for the steady and transient state in power systems with STATCOM-Fuell cell

Keywords

Steady and transient state
Voltage stability
STATCOM
Fuel cell
PSAT

Article history:

Received: 14.07.2023
Accepted: 07.09.2023

Abstract: Due to various operating conditions of power systems, bus voltages and load parameter values decrease. This causes the system to go into instability. Static Synchronous Compensator (STATCOM) is widely used to eliminate instability situations. Fuel cells can be used from energy storage systems to increase the efficiency of STATCOM in power systems. In this study, STATCOM and fuel cell are used together for steady and transient voltage stability in a 6-bus power system. In the voltage stability system, the relationship between the bus voltage-maximum load parameter in the steady-state operation is examined, while in the transient state study, the relationship between the bus voltage-maximum load parameter for the transient stability that occurs in the case of breaker opening-closing on the line in the system. In addition, the effects of the fuel cell at different power values are examined in detail. As a result of the study, it has been seen that the use of STATCOM and fuel cell together gives effective results in terms of voltage stability in continuous and transient situations.

1. Giriş

Güç sistemlerinin sürekli ve geçici kararlılık durumlarından en az derecede etkilenmesi için çeşitli modeller kullanılmaktadır. Özellikle bara gerilim kontrolünün sağlanmasında Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) cihazlarından birisi olan Statik

Senkron Kompanzator (STATCOM) tercih edilmektedir. Güç elektroniği tabanlı kompanzasyon sistemlerinden olan STATCOM'un literatürde kullanımı yaygındır. STATCOM'un bara gerilim kontrolünü sağlaması reaktif güç alınması yada reaktif güç verilmesi ile sağlanmaktadır. STATCOM'un gerilim kontrolü için geri besleme kontrol stratejisi kullanılmaktadır. Doğrusal

* İlgili yazar/Corresponding author: kenandosoglu@duzce.edu.tr

optimal kontrol modeli sayesinde STATCOM'un çalışma koşullarına göre zaman tepkisinin hızlı olduğu görülmektedir [1]. STATCOM gerilim kontrolü sağlamanın yanısıra açı kontrolünün sağlanmasında da etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Açı kontrolünün sağlanması STATCOM devresindeki evirici devresinde bulunan DC link modeli sayesinde gerçekleştirilmektedir [2]. Güç sistemlerinde güç elektroniği tabanlı lineer olmayan yük modelleri şebekede saf sinüsoidal dalganın bozulmasına neden olabilmektedir. Bunun yanısıra güç sistemlerinde kullanılan bu yük modelleri kırpışma ve güç kalitesi problemlerine sebep olabilmektedir. Bu problemleri ortadan kaldırmak ve etkilerini azaltmada STATCOM'un başarılı olduğu görülmektedir [3,4]. Çok makinalı güç sisteminde güç akışı analizlerinde STATCOM yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tercih edilen STATCOM model ile yüksek frekans etkilerini, güç elektroniği kayıplarını ve sistemdeki aktif-reaktif güç kayıplarını azaltabilmektedir. Dahası bara gerilimini istenen sınırlar içerisinde ayarlayabilmektedir [5,6]. Güç sistemlerinde çeşitli kısa devreler sonucunda sistemin kararsızlık durumlarında kaldığı ve parametreler üzerinde oluşan salınımların artarak devam ettiği görülebilmektedir. Sistem kararlılığının kısa sürede sağlanması ve salınımların hızlı bir şekilde sönümlenmesi için STATCOM'un etkili ve başarılı oldukları ilgili çalışmalarda görülmektedir [7,8]. STATCOM ile kısa sürede kararlılığın sağlanması ve salınımların en hızlı şekilde sönümlenmesinde kullanılan önemli durumlardan birisi de optimum parametre belirlenmesi işlemidir. STATCOM'da kullanılan geleneksel denetleyiciler çoğu zaman geçici kararlılık durumlarında iyi sonuç vermemektedir. Bunun için farklı denetleyici modelleri yaygın olarak tercih edilebilmektedir [9,10]. Çok makinalı güç sistemlerinde gerilim kararlılığı analizlerinde STATCOM'un etkili bir şekilde kullanıldığı ilgili çalışmalarda gösterilmektedir. Çeşitli çalışma koşullarında bara gerilim sınır aralığını kontrol etmek, sistemin yüklenebilirliğini arttırmak ve sistem güvenliğini sağlamak için STATCOM'un gerilim kararlılığı çalışmalarında önemli bir rolü bulunmaktadır [11-13].

Yapılan bu çalışmada Referans [11-13]'den farklı olarak 6 baralı güç sisteminde sistemin sürekli ve geçici çalışma koşullarında STATCOM ve yakıt hücresinin gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bunun yanısıra STATCOM ile farklı güç değerlerinde kullanılan yakıt hücresinin sistemdeki bara gerilim profilleri ve sistemin maksimum yüklenme parametresi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve yorumlanmıştır.

2. Gerilim Kararlılığı

Güç sistemlerinde sürekli durum ve geçici durumda gerilim kararlılığı hesaplaması genel olarak reaktif güç kullanılarak yapılmaktadır. Reaktif güç değeri yük barasına bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Güç sisteminde reaktif gücün değeri belli bir sınırın altına düştüğünde gerilim çökmesi meydana gelebilmektedir. Gerilim çökmesi problemini azaltmak için güç sistemine reaktif güç desteği verilmesi gerekmektedir. Güç sistemindeki gerilim kararlılığı ilişkisi gerilim-maksimum yüklenme parametresine bağlı olarak yapılmaktadır. Güç sisteminde gerilim kararlılığını analizinde aktif-reaktif güç ilişkisine bakılması gerekmektedir. Aktif-reaktif güç ilişkisi Denklem 1 ve Denklem 2'de gösterilmiştir [13].

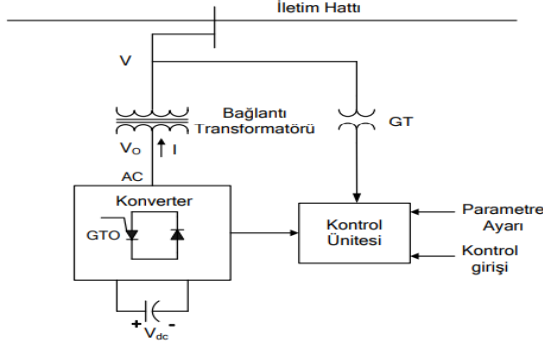
$$P_L = P_{L0}(1 + \lambda) \quad (1)$$

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

Denklem 1 ve Denklem 2'de, PL ve QL yükün aktif güç ve reaktif güç değeri, PL0 ve QL0 yükün başlangıç aktif güç ve reaktif güç değerleri, λ maksimum yüklenme parametre değeri olarak tanımlanmaktadır. Gerilim kararlılığı analizinde sürekli yük akışı metodu uygulanmaktadır. Sürekli yük akışı yöntemi belirli bir sistem modeline bağlı olmadığı istenilen duruma göre güç akışındaki belirli zorlukların üstesinden gelmektedir. Bunun yanısıra sistemdeki denklemlerinin tekillikleri hakkında yüklenme parametre değerini otomatik olarak değiştirerek tüm gerilim profilini takip etmektedir.

3. Statik Senkron Kompanzator (STATCOM)

STATCOM paralel bağlantılı olan FACTS cihazlarından birisidir. Gerilim kaynaklı evirici olarak çalışmaktadır. Aktif veya reaktif güç sağlamak için giriş DC link gerilimini çıkışında alternatif gerilime dönüştürmektedir. Yük barasına bağlandığında bara gerilimini ayarlamak için reaktif güç verebilir veya reaktif güç çekebilir. STATCOM bağlantı transformatörü, konverter, kontrol ünitesi ve kondansatörden oluşmaktadır. STATCOM modeli Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. STATCOM modeli

STATCOM'un çıkış gerilimi büyüklüğü AC sistemden büyük ise akım STATCOM'dan sisteme transformator aracılığıyla akmaktadır. Böylece STATCOM şebeke için reaktif güç üretir. İkinci durumda ise STATCOM'un çıkış gerilimi büyüklüğü AC sistemden daha düşük ise AC sistemden STATCOM'a akım akmaktadır. Böylece STATCOM reaktif güç tüketmektedir. STATCOM'un matematiksel eşitlikleri Denklem 3 ile Denklem 5 arasında gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \alpha \\ m \end{bmatrix} = f(x_c, \alpha, m, V, V_{dc}, v_{ref}, V_{dc-ref}) \quad (3)$$

$$V_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{1}{R_c C} V_{dc} - \frac{R}{C} I^2 \quad (4)$$

$$0 = \begin{bmatrix} P - VI \cos(\delta - \theta) \\ Q - VI \sin(\delta - \theta) \\ P - V^2 G + kV_{dc} VG \cos(\delta - \theta) + kV_{dc} VB \sin(\delta - \theta) \\ Q - V^2 B - kV_{dc} VG \cos(\delta - \theta) + kV_{dc} VB \sin(\delta - \theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Burada, puls genişlik modülasyonuna bağlı olarak k ifadesinin değeri olarak belirlenmiştir. Sürekli durumda gerilim kararlılık analizi için tercih edilen model Denklem 6'da gösterilmiştir [14].

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} \mp X_{SL} I \\ V_{dc} - V_{dc-ref} \\ P - V_{dc}^2 / R_c - RI^2 \\ g(\alpha, k, V, V_{dc}, \delta, I, \theta, P, Q) \end{bmatrix} \quad (6)$$

4. Yakıt Hücresi

Enerji depolama sistemi elemanlarından birisi olan yakıt hücresi bu çalışma için tercih edilmiştir. Yakıt hücresi analizi gerçekleştirilen program içerisinde mevcuttur. Bu analiz programında kullanılan yakıt hücresi üç bölümden meydana gelmektedir. Üç bölümden oluşan yakıt hücresinde her bölümün ayrı

ayrı özellikleri bulunmaktadır. Kullanılan yakıtın elektrik enerjisi üretimine hazır hale getirildiği kısım ilk bölüm olan yakıt işlemcisidir. Yakıt hücresi kısmı Elektrokimyasalların kullanılması ile elektrik enerjisinin üretildiği kısım ikinci bölüm olan yakıt hücresi bölümüdür. Sistemde AC güç akım, gerilim ve frekansı bir arada bulunduran üçüncü bölüm ise güç bağlantı birimidir. Güç bağlantı birimi çalışma koşullarına göre şebeke güç dönüşümünü ayarlayabilmektedir. Güç dönüşümü AC veya DC olabilmektedir. AC veya DC güç dönüşüm işlemleri eş zamanlı olarak yapılmaktadır.

Yakıt hücresinde sabit güç kontrolü kullanılmaktadır. Yakıt hücre akımının sabit güç kontrolüne ve farklı sınır değerlerine bağlı olarak hesaplanması durumları Denklem 7 ve Denklem 8 arasında gösterilmiştir.

$$I_k = \frac{(P_{ref} / V_{k0} - i_k)}{T_e} \quad (7)$$

$$I_k = \left(\frac{U_{limir} qH_2}{2K_r} - i_k \right) \frac{1}{T_e} \quad (8)$$

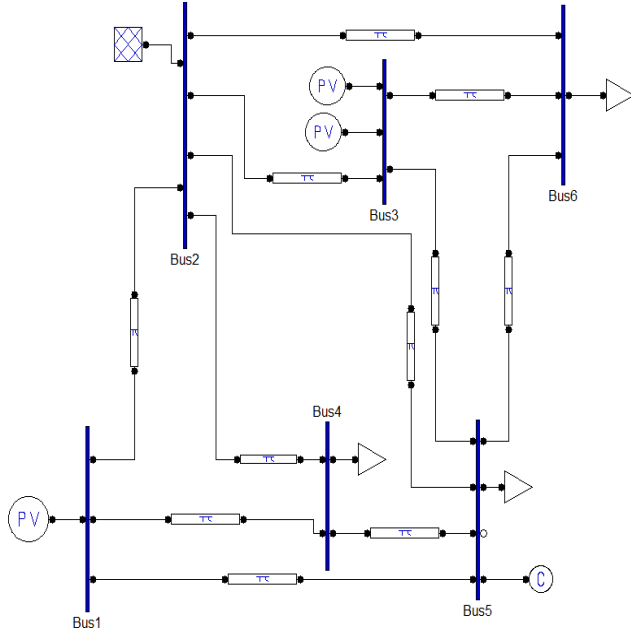
Burada, Ik yakıt hücresi akımı, Vk0 başlangıç DC gerilimi, ik başlangıç yakıt hücresi akımı, Te küçük zaman sabiti, Ulimir minimum-maksimum yakıt sarfiyatı, H2 hidrojen oranı, q soğutma katsayısı, Kr DC katsayısıdır. Yakıt hücresinin kullanımında bağlı olduğu şebeke ile aynı gerilim seviyesinde çalışması gerekmektedir. Bunun için gerekli olan genlik ve açı değerleri modülasyon indeksi tarafından ayarlanabilmektedir. Yakıt hücresinin modülasyon indeksi hesaplaması Denklem 9'da gösterilmiştir.

$$m = \frac{-(K_m (V_{ref} - V_s) - m)}{T_m} \quad (9)$$

Burada, m modülasyon genliği, Km modülasyon katsayısı, Vref referans gerilim, Vs ölçülen şebeke gerilimi, Tm modülasyon zaman sabitidir [15].

5. Benzetim Çalışması

Analizi yapılan bu çalışmada gerilim kararlılığı hem sürekli durum hem de geçici durum çalışmaları olarak ele alınmıştır. 6 baralı sistem detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışma Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) ortamında gerçekleştirilmiştir [16]. Analizi yapılan sistem Şekil 2'de gösterilmiştir.



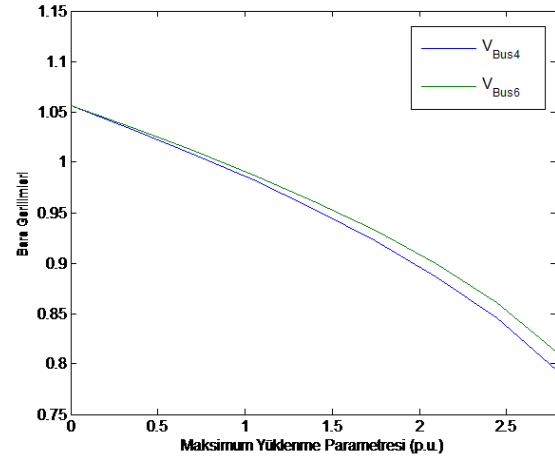
Şekil 2. Analiz yapılan sistemi.

Bu sistemde 2 numaralı bara salınım barası olarak kullanılırken, 1 ve 3 numaralı baralar generatör barası ve 4, 5, 6 numaralı baralar ise yük barası olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada sürekli durum analizinde STATCOM 5 numaralı yük barasına bağlanmıştır. Geçici durum analizinde ise hatta kesicinin açılması durumu incelenmiştir. Kesici açması durumu 2 ile 5 numaralı hatlar arasında meydana gelmiştir. Geçici durumda sürekli durumda olduğu gibi STATCOM ve yakıt hücresi aynı baralara bağlıdır. STATCOM'un gücü 100 MVA olarak belirlenirken, yakıt hücresinin gücü hem sürekli durum hem de geçici durum için farklı güç değerlerinde kullanılmıştır. Yakıt hücresinin gücü ilk etapta 100 MVA olarak belirlenmiştir.

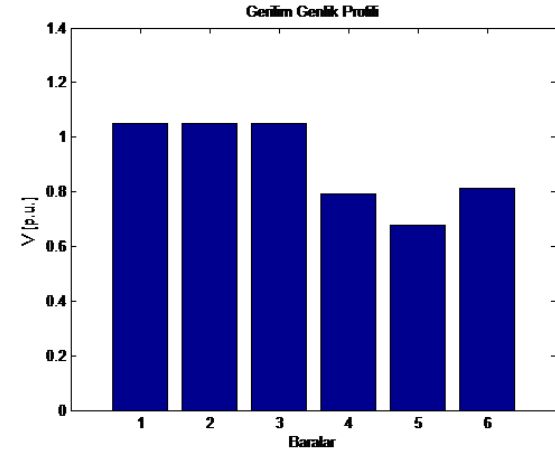
5.1. Benzetim çalışması sonuçları

Yapılan bu çalışmada 3 ayrı analiz gerçekleştirilmiştir. İlk analizde STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durum, ikinci analizde STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlanma durumu ve son analizde ise STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlandığı durum ve 3 numaralı baraya yakıt hücresinin farklı güç değerlerinde sisteme bağlanması durumları hem sürekli durum hem de geçici durum açısından incelenmiştir. 100 MVA gücündeki STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlandığı gerilim değeri yük akışı analizine göre 0.675 p.u olarak belirlenmiştir. Sürekli durum çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durum, STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlandığı durum ve STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlandığı durum ile birlikte yakıt hücresinin yüzde 10 güç değerinde bağlı olduğu durumdaki elde edilen maksimum yüklenme

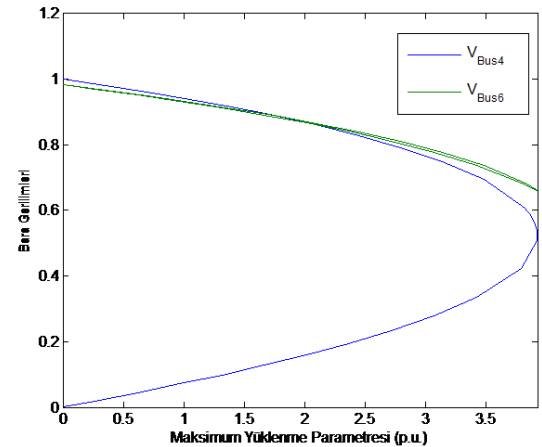
parametresi ve bara gerilim profilleri sonuçları Şekil 3 ile Şekil 8 arasında gösterilmiştir.



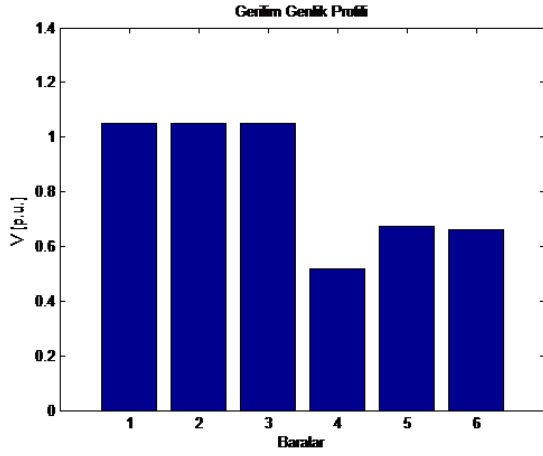
Şekil 3. Sürekli çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durumdaki bara gerilimi-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi



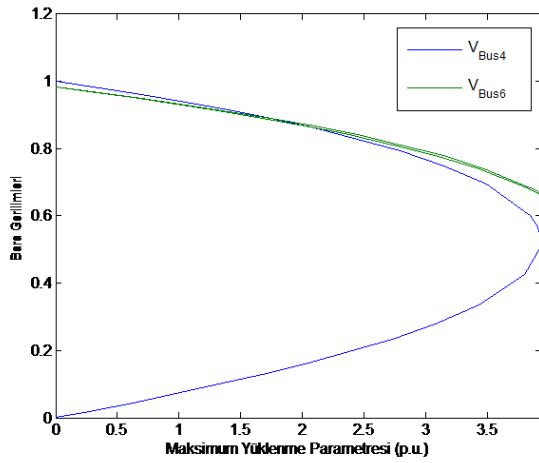
Şekil 4. Sürekli çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durumdaki bara gerilim profilleri



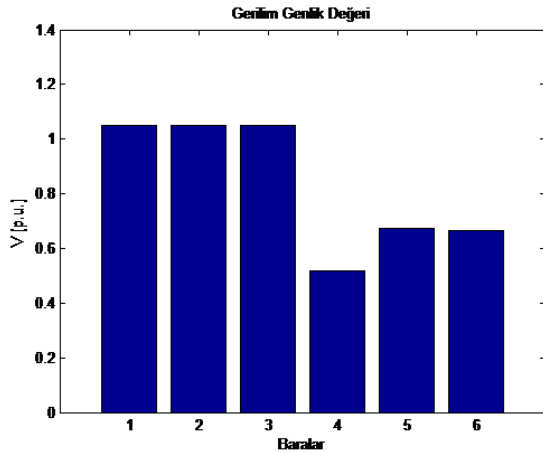
Şekil 5. Sürekli çalışmada STATCOM'un bağlı olduğu durumdaki bara gerilimi-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi



Şekil 6. Sürekli çalışmada STATCOM'un bağlı olduğu durumdaki bara gerilim profilleri



Şekil 7. Sürekli çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlı olduğu durumdaki bara gerilimi-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi



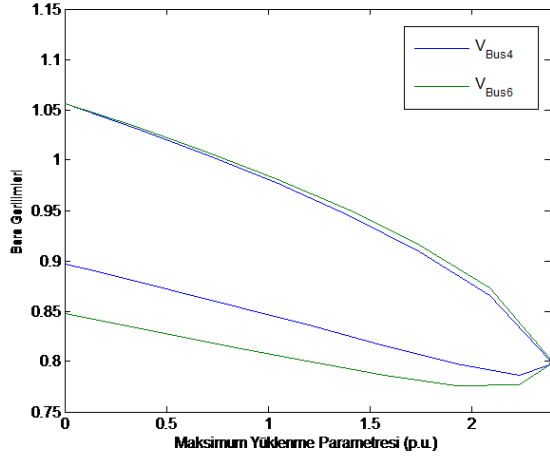
Şekil 8. Sürekli çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlı olduğu durumdaki bara gerilim profilleri

Sürekli çalışma durumunda STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durumdaki maksimum yüklenme parametre değeri 2.7836, sürekli çalışmada STATCOM'un bağlı olduğu durumdaki maksimum yüklenme parametresi 3.9305 ve sürekli çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin yüzde 10 güç değerinde bağlı olduğu durumdaki maksimum yüklenme parametresi 3.9366 olarak elde edildiği görülmüştür. İkinci ve üçüncü analizlerde kullanılan STATCOM ve yakıt hücresi sayesinde bara gerilim profillerinde ilk analize göre sürekli durum çalışmasında iyileştiği görülmektedir. Sürekli çalışmadaki 3. analizde kullanılan yakıt hücresinin farklı güç değerlerinde kullanılması ile elde edilen değerleri sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir.

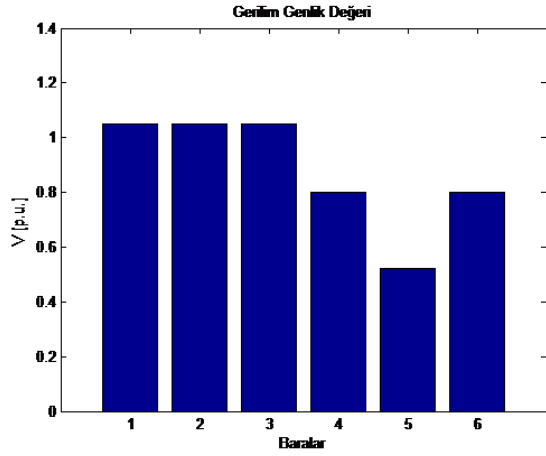
Tablo 1. Sürekli durumda farklı yakıt hücresi güç değerlerinde elde edilen maksimum yüklenme parametresi sonuçları

Yakıt hücresi güç oranları	Maksimum yüklenme parametresi sonuçları
%30	3.9476
%50	3.9573
%70	3.9663
%90	3.9743

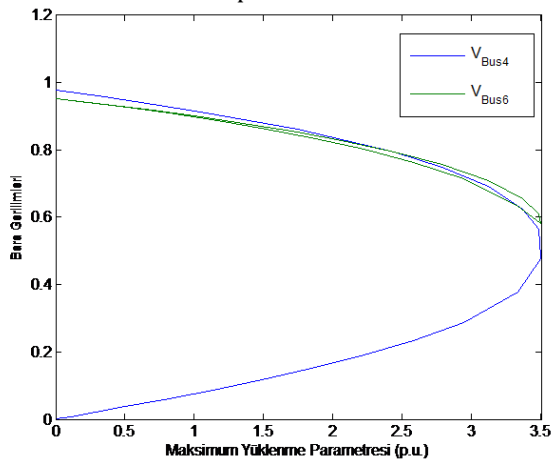
Benzer senaryolar geçici durum içinde detaylı olarak incelenmiştir. 2 ile 5 numaralı baralar arasındaki kesicinin belli bir zaman sistemi açıp kapaması esnasında gerilim kararlılığı analizi yorumlanmıştır. Geçici durum için ilk analizde STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durum, ikinci analizde STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlanma durumu ve son analizde ise STATCOM'un 5 numaralı baraya bağlandığı durum ve 3 numaralı baraya yakıt hücresinin farklı güç değerlerinde sisteme bağlanması durumları hem sürekli durum hem de geçici durum açısından incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 9 ile Şekil 14 arasında gösterilmiştir.



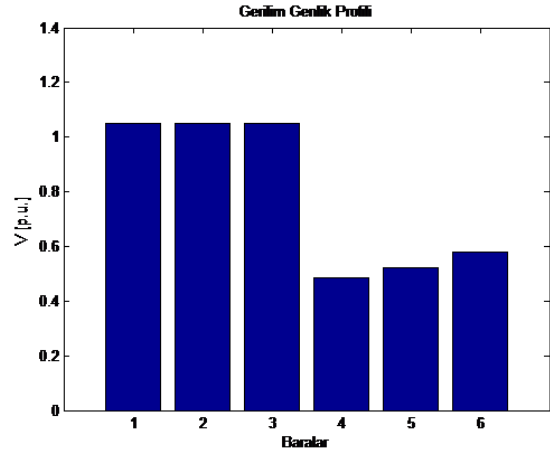
Şekil 9. Geçici çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durumdaki bara gerilimi-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi



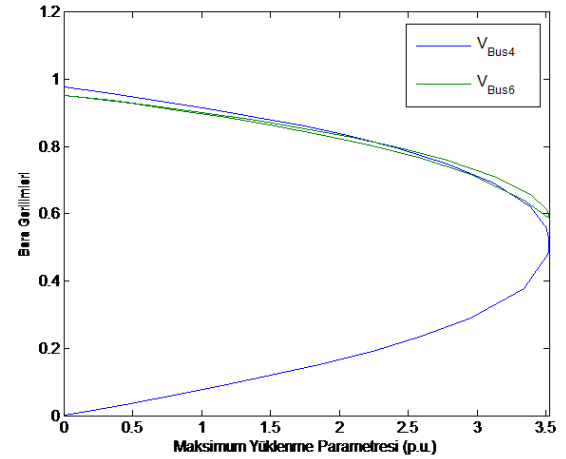
Şekil 10. Geçici çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durumdaki bara gerilim profilleri



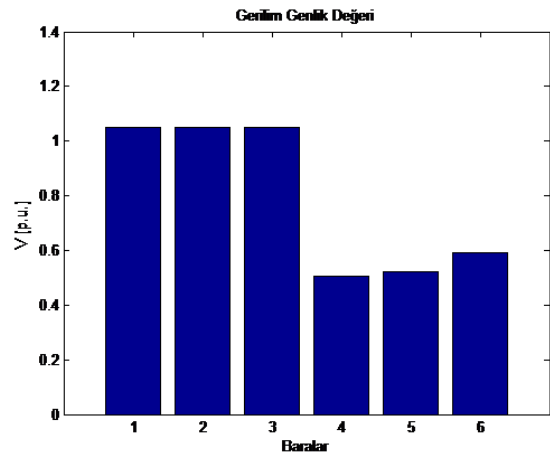
Şekil 11. Geçici çalışmada STATCOM'un bağlı olduğu durumdaki bara gerilimi-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi



Şekil 12. Geçici çalışmada STATCOM'un bağlı olduğu durumdaki bara gerilim profilleri



Şekil 13. Geçici çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlı olduğu durumdaki bara gerilimi-maksimum yüklenme parametresi ilişkisi



Şekil 14. Geçici çalışmada STATCOM ve yakıt hücresinin bağlı olduğu durumdaki bara gerilim profilleri

Geçici durumda STATCOM ve yakıt hücresinin bağlanmadığı durumdaki maksimum yüklenme parametre değeri 2.3824, geçici çalışma durumunda STATCOM'un kullanılması ile maksimum yüklenme parametre değeri 3.5007, geçici durumda STATCOM ve yakıt hücresinin yüzde 10 güç değerinde bağlı olduğu durumdaki maksimum yüklenme parametresi 3.5237 olarak elde edildiği görülmüştür. İkinci ve üçüncü analizlerde kullanılan STATCOM ve yakıt hücresi sayesinde bara gerilim profillerinde ilk analize göre geçici durum çalışmasında iyileştiği görülmektedir. Geçici durum çalışmadaki 3. analizde kullanılan yakıt hücresinin farklı güç değerlerinde kullanılması ile elde edilen sonuçlar Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Geçici durumda farklı yakıt hücresi güç değerlerinde elde edilen maksimum yüklenme parametresi sonuçları

Yakıt hücresi güç oranları	Maksimum yüklenme parametresi sonuçları
%30	3.5506
%50	3.5730
%70	3.5923
%90	3.6090

6. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, gerilim kararlılığı analizlerinde yaygın olarak kullanılan FACTS cihazlarından birisi olan STATCOM'un güç sistemindeki etkinliği arttırmak için farklı güç değerlerinde yakıt hücresinin kullanım durumu detaylı olarak incelenmiştir. Hem sürekli çalışma hem geçici çalışma durumlarındaki maksimum yüklenme parametre değeri ve bara gerilim profilleri üzerindeki etkiler analiz edilmiştir. Yakıt hücresinin sistemin yüklenebilirliği arttırması ve bara gerilim profillerinin daha iyi hale getirilmesi bu çalışmada sağlanmıştır. Bara gerilim çalışma sınırlarının kararlı bölgede olmasında ve sistemin güvenilirliğinin sağlanmasında STATCOM ve yakıt hücresinin birlikte kullanılmasının başarılı olduğu bu çalışmada görülmüştür. Bara gerilim profilleri açısından STATCOM ve yakıt hücresinin kullanılmadığı durumda en çok etkilenen bara 5 numaralı bara olurken, STATCOM ve STATCOM ile yakıt hücresinin kullanılmasında en çok etkilenen bara 6 numaralı bara olmuştur. Bu çalışma, yakıt hücresinin hem baraya bağlanan hem de iletim hattına bağlanan farklı FACTS cihazları ile birlikte farklı test sisteminde kullanılması ve gerilim kararlılığı açısından değişik yaklaşımları ortaya koyması açısından bundan sonraki yapılması düşünülen çalışmalara yol gösterecektir.

Kaynaklar

- [1] Rao P, Crow ML, Yang Z. STATCOM control for power system voltage control applications. *IEEE Transactions on power delivery*, 15(4), 1311-1317, 2000.
- [2] Canizares CA, Pozzi M, Corsi S, Uzunovic E. STATCOM modeling for voltage and angle stability studies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 25(6), 431-441, 2003.
- [3] Chen BS, Hsu YY. A minimal harmonic controller for a STATCOM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(2), 655-664, 2008.
- [4] Mienski R, Pawelek R, Wasiak I. Shunt compensation for power quality improvement using a STATCOM controller: modelling and simulation. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 151(2), 274-280, 2004.
- [5] Acha E, Kazemtabrizi B. A new STATCOM model for power flows using the Newton-Raphson method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 2455-2465, 2013.
- [6] Bhargava A, Pant V, Das B. An improved power flow analysis technique with STATCOM. *International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems*, New Delhi, India, 12-15 December, 2006.
- [7] Puleston PF, Gonzalez SA, Valenciaga F. A STATCOM based variable structure control for power system oscillations damping. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 29(3), 241-250, 2007.
- [8] Padiyar KR, Prakash VS. Tuning and performance evaluation of damping controller for a STATCOM. *International journal of electrical power & energy systems*, 25(2), 155-166, 2003.
- [9] Luo A, Tang C, Shuai Z, Tang J, Xu XY, Chen D. Fuzzy-PI-based direct-output-voltage control strategy for the STATCOM used in utility distribution systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(7), 2401-2411, 2009.
- [10] Stella M, Dash PK, Rout PK. Function based hybrid-fuzzy genetic controller for VSI based STATCOM. *International Journal of Knowledge-based and Intelligent Engineering Systems*, 11(3), 139-156, 2007.
- [11] Sode-Yome A, 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] Bhole SS, Nigam P. Improvement of voltage stability in power system by using SVC and STATCOM. *International Journal of Advanced*

Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 4(2), 76-81, 2015.

- [13] Kamarposhti MA, Alinezhad M. Comparison of SVC and STATCOM in static voltage stability margin enhancement. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 3(2), 297-302, 2009.
- [14] Canizares CA. Power flow and transient stability models of FACTS controllers for voltage and angle stability studies. *IEEE Power Engineering*

Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077), Singapore, 23-27 January, 2000.

- [15] Yildirim B, Gencoglu MT. Oscillatory stability and eigenvalue analysis of power system with microgrid. *Electrical Engineering*, 100(4), 2351-2360, 2018.
- [16] Milano, F. An open source power system analysis toolbox. *IEEE Transactions on Power systems*, 20 (3), 1199-1206, 2005.