

DGM-Statcom ile Reaktif Güç Kompanzasyonu

Resul ÇÖTELİ, Zafer AYDOĞMUŞ
Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü
23119, ELAZIĞ

ÖZET

Son yıllarda, iletim ve dağıtım sistemlerinin reaktif güç kompanzasyonunda geleneksel kompanzatörlere göre daha iyi cevap hızlarına sahip olmalarından dolayı, dönüştürücü tabanlı FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Hatları) aygıtları kullanılmaktadır. STATCOM, yaygın olarak kullanılan FACTS aygıtlarından biridir. Bu çalışmada, Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) tekniği kullanan STATCOM 'un (Statik Senkron Kompanzator) MATLAB ile benzetimi yapılmıştır. Bu benzetimde, bara geriliminin genliği değiştirilerek DGM-STATCOM 'un dinamik cevabı gözlemlenmiştir. Benzetim programı sonuçlarından, DGM-STATCOM 'un bu ani değişikliklere cevabının çok hızlı olduğu ve güç sistemi için gerekli reaktif gücü kısa sürede sağladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kompanzasyon, DGM-STATCOM.

Reactive Power Compensation By PWM-Statcom

ABSTRACT

In recent years, FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) devices are used for reactive power compensation in power systems, transmission and distribution systems, since their response is faster than that of the conventional compensators. One of the most widely used FACTS device is STATCOM. In this study, simulation of the STATCOM (Static Synchronous Compensator) has been realized by using Pulse Width Modulation (PWM). Matlab-Simulink software is used for simulation. In the simulation, dynamic response of PWM-STATCOM has been observed for various bus voltages. From the results of the simulation, it has been observed that response of the PWM-STATCOM to instant variations is very fast and reactive power for power system is provided in short time.

Key Words: Compensation, PWM-STATCOM.

1. GİRİŞ

Enerji sistemlerinin kontrolünde en önemli problemlerden biri reaktif güç kompanzasyonudur. Reaktif güç, iletim sisteminde kayıpların artmasına, iletim hattının güç iletim kapasitesinin azalmasına ve hat sonundaki gerilimin genliğinde çok büyük değişimlere neden olur. Bu yüzden alternatif akım güç sistemlerinde iletilbilir gücü arttırmak ve kayıpları azaltmak için reaktif güç kompanzasyonu yapmak gerekir (1). Büyük güçlü ve hızlı devreye girip çıkan yüklerin güç faktörü geleneksel elektromekanik kompanzasyon düzenekleri ile düzeltilemez. Bunun nedeni geleneksel kompanzasyon sistemlerinin, yükün ani şekilde ihtiyaç duyduğu reaktif güç talebine hemen cevap verememesi ihtiyaç duyulan kapasitif reaktif gücün kompanzasyon sisteminden karşılanamamasıdır. Ayrıca 2000 yılında yayınlanan yönetmelik ile reaktif güç için izin verilen aralık daraltıldığından geleneksel kontaktörlü kompanzasyon sistemindeki kontaktörler sık sık devreye girip çıkacağı için ömürleri azalacağından tüketiciler ek bir reaktif enerji bedeli ödemek zorunda olacaktırlar (2).

Son yıllarda enerji iletim ve dağıtım sistemleri için hızlı kompanzasyon ihtiyacı giderek önem kazanmaktadır. Günümüzde güç elektroniği elemanları, anahtarlama hızlarının yüksek olması nedeniyle

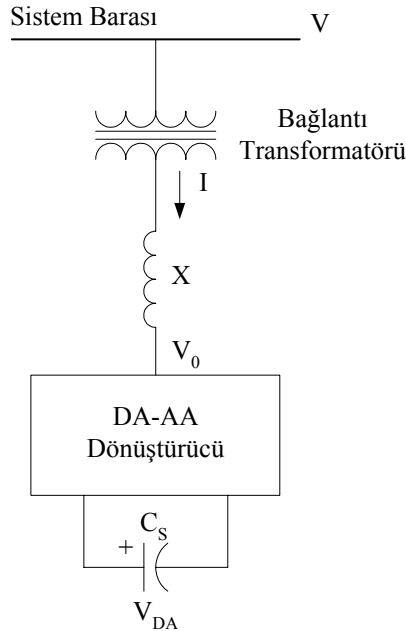
kompanzasyon uygulamalarında tercih edilmektedirler. Güç sistemlerinde kompanzasyonunun yarı iletken anahtarlar ile yapılması durumunda, gerilim çökmelerinin önlenilebileceği ve geçici ve dinamik kararlılığı iyileştirebileceği görülmüştür (3). Yarı iletken tabanlı dönüştürücüler kullanılarak seri ve şönt reaktif kompanzatörler tasarlanabilir. Kompanzasyon için kullanılan bu tip aygıtlara FACTS aygıtları denir. Burada esneklik, çalışma noktasında veya kontrol girişinde meydana gelen herhangi bir değişime, sistemin hızlı bir şekilde cevap verme yeteneği olarak anlaşılır (4). FACTS aygıtları, iletim hatlarının kompanzasyonunda kondansatör veya reaktör gruplarına ihtiyaç duymadan, dönüştürücü devreleri kullanılarak güç sistemi ile reaktif güç alışverişi yapabilmektedirler (5).

Bu çalışmada benzetimi yapılan STATCOM 'un dinamik cevabı; gerilim beslemeli bir dönüştürücünün, doğru ve alternatif tarafındaki gerilimleri kontrol edilerek gözlemlenmiştir. Bunun için gerekli olan dinamik denklemler Park dönüşümü kullanılarak elde edilmiştir. Sonuç bölümünde ise Matlab-Simulink kullanılarak gerçekleştirilen benzetim programının sonuçları verilmiştir.

2. DGM-STATCOM

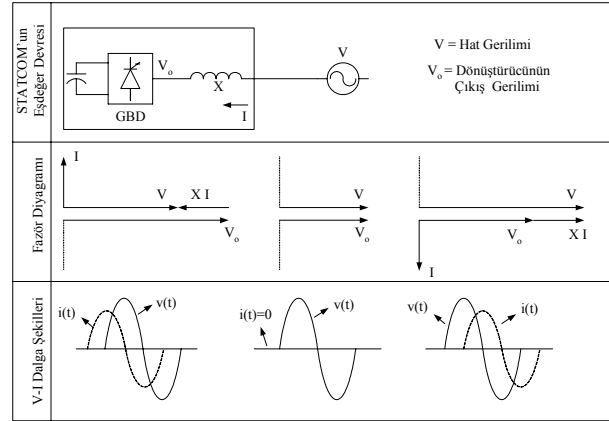
STATCOM veya statik kondenser olarak bilinen ASVC (İleri Statik VAR Kompanzator) bağlı bulunduğu

güç sisteminden reaktif akım çekecek şekilde kontrol edilebilen ve endüktans-kondansatör gibi bir enerji depolama elemanı ile üç fazlı sistem arasına bağlanan yüksek güçlü kendinden komutasyonlu evirici kullanılarak yapılan bir FACTS aygıtıdır (6). Çalışma karakteristiği açısından güç iletim sistemlerinin dinamik kompanzasyonunda, senkron kondenserler gibi kullanılabilirler (7, 8). STATCOM, bir güç sisteminde gerilim regülasyonu ve sürekli durum iletim karakteristiklerini iyileştirmek için kullanılabilir (9). Şekil 1 'de gösterildiği gibi STATCOM, bir bağlantı transformatorü, bir dönüştürücü ve bir doğru gerilim enerji depolama aygıtından (kondansatör) meydana gelir. Dönüştürücü, dolu bir kondansatörün sağladığı doğru gerilimi, güç sistemi ile aynı frekansta, genliği ve faz açısı hızlı bir şekilde kontrol edilebilir üç fazlı alternatif bir çıkış gerilimine dönüştürür ve şebekeye bir bağlantı transformatorü yardımı ile bağlanır.



Şekil 1. STATCOM'un genel gösterimi

STATCOM tarafından üretilen çıkış geriliminin genliği, dönüştürücü ile güç sistemi arasındaki reaktif güç alışverişini belirler. Dönüştürücünün ürettiği çıkış geriliminin genliği bara geriliminin genliğinden fazla ise, akım bağlantı transformatorünün kaçak reaktansı yardımı ile dönüştürücünden baraya doğru akar ve dönüştürücü, sistem için kapasitif reaktif güç üretir. Dönüştürücünün ürettiği çıkış geriliminin genliği bara geriliminin genliğinden küçük olması durumunda akım baradan dönüştürücüye doğru akar ve dönüştürücü endüktif reaktif güç tüketir. Dönüştürücünün çıkış gerilimi ve bara geriliminin genliğinin birbirlerine eşit olduğu durumda reaktif güç alışverişi olmayacaktır. Bu üç duruma ilişkin dalga şekilleri ve fazör diyagramları Şekil 2 'de gösterilmiştir.



Şekil 2. STATCOM'un temel çalışma prensibi

Dönüştürücü ile güç sistemi arasındaki aktif güç değişimi; STATCOM'un bağlı bulunduğu baranın gerilimi ile dönüştürücünün çıkış gerilimi arasındaki faz farkı ayarlanarak kontrol edilebilir. Dönüştürücünün çıkış gerilimi bara geriliminden ileri fazda olacak şekilde kontrol edilirse, dönüştürücü kendi doğru gerilim enerji deposundan sisteme aktif güç sağlar. Eğer dönüştürücünün çıkış gerilimi bara geriliminden geri fazda olursa, bu durumda dönüştürücü, şebekeden aktif güç çekecektir. STATCOM'un ürettiği/tükettiği reaktif güç miktarı,

$$Q = \frac{V}{X} (V - V_0 \cos \phi) \quad (1)$$

ile ifade edilir. STATCOM'un sisteme verdiği veya sistemden aldığı aktif güç miktarı,

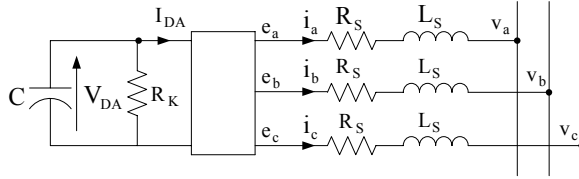
$$P = \frac{V V_0}{X} \sin \phi \quad (2)$$

şeklinde yazılır. Burada V bara gerilimi, V₀ dönüştürücünün çıkış gerilimi, X bağlantı transformatorünün kaçak reaktansı ve φ ise STATCOM'un bağlı bulunduğu baranın gerilimi ile dönüştürücünün çıkış gerilimi arasındaki faz farkıdır. Sürekli durumda, dönüştürücünün çıkış gerilimi, bara geriliminden geri fazda tutularak, aktif güç akışının güç sisteminden dönüştürücüye doğru olması sağlanır (P > 0). Bu durumda dönüştürücüde ve transformatorde meydana gelen kayıplar güç sisteminden karşılanır.

Basit bir evirici, doğru gerilimi yarı iletken anahtarlar yardımı ile kare dalgaya çevirir. İyi bir eviricide amaç, az harmonikli yaklaşık bir sinüzoidal alternatif gerilim üretmektir. Evirici tarafından üretilen gerilimdeki harmoniklerin azaltılması için transformatorlerin kullanıldığı çok darbeli yapı, çok seviyeli eviriciler ve DGM anahtarlama teknikleri kullanılmaktadır (10). Harmonik içeriğini azaltmaya yönelik uygulamalarda kullanılan faz kaydırma transformatorleri, STATCOM'un boyutunu ve karmaşıklığını artırır. DGM tekniği, dönüştürücünün alternatif çıkış gerilimini değiştirmek için, ayarlanabilir genişlikli çok darbeli yapı temeline dayanır. Yüksek anahtarlama frekansına sahip denetimli anahtarların kullanıldığı DGM teknikleri, harmonik içe-

riğini azalttığı ve transformatör devresini basitleştirdiği için STATCOM kontrolünde son zamanlarda tercih edilmektedirler. Geleneksel STATCOM 'da alternatif çıkış gerilimi, giriş tarafındaki doğru gerilim değerinin değiştirilmesi ile DGM-STATCOM 'da ise dönüştürücünün kazancı ayarlanarak kontrol edilir (11).

Şekil 3 'te, bir GBD, dönüştürücüye doğru gerilim sağlayan bir kondansatör, bağlantı transformatörünün kaçak reaktansı ve dönüştürücüde meydana gelen anahtarlama kayıplarını temsil eden bir R_K direncinden oluşan STATCOM 'un eşdeğer devresi gösterilmiştir.



Şekil 3. STATCOM 'un eşdeğer devresi

Sistemin kontrolü için, STATCOM 'un akım ve gerilimleri Park dönüşümü kullanılarak d-q bileşenlerine (aktif-reaktif) ayrılır. Sistem dengeli kabul edilerek Denk.(3) yardımı ile STATCOM 'un akım ve gerilimleri d-q bileşenlerine ayrılabilir.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \times \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Burada,

$$C = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

olarak ifade edilebilir (5).

Şekil 3 'te gösterilen eşdeğer devreye göre STATCOM 'un alternatif gerilim tarafının denklemi;

$$L.p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + R. \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a - e_a \\ v_b - e_b \\ v_c - e_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Burada p, d/dt 'dir. Denk.(5) 'e Park dönüşümü uygulanırsa,

$$p \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega \\ \omega & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} (e_d - v_d) \\ (e_q - v_q) \end{bmatrix} \quad (6)$$

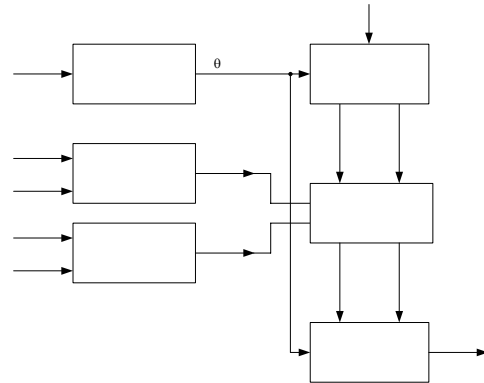
denklemler elde edilerek dönüştürücünün akımı d-q bileşenlerine ayrılır. Burada, $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ 'dir. Dönüştürücünün gerilim vektörleri ise aşağıdaki gibi kontrol edilir.

$$e_d = L_s (x_1 - \omega i_q) + v_d \quad (7)$$

$$e_q = L_s (x_2 + \omega i_d) \quad (8)$$

$$x_1 = (k_p + \frac{k_i}{s})(i_d^* - i_d) \text{ ve } x_2 = (k_p + \frac{k_i}{s})(i_q^* - i_q)$$

şeklinde tanımlanan PI kontrolörün çıkış sinyalleridir. Burada k_p PI kontrolörün oransal kazancı, k_i integral kazancı, i_d^* referans aktif akım değeri, i_q^* ise referans reaktif akım değeridir. DGM-STATCOM 'un genel bir kontrol şeması Şekil 4 'te gösterilmiştir.

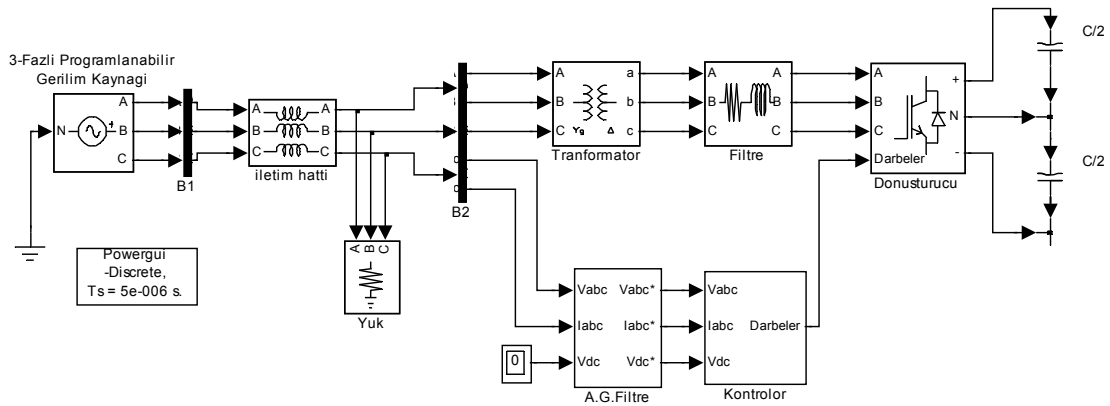


Şekil 4. DGM-STATCOM 'un kontrol şeması

3. BENZETİM SONUÇLARI

Bu çalışmada, MATLAB-SIMULINK Toolbox 'ı kullanılarak DGM-STATCOM 'un benzetimi yapılmıştır. DGM-STATCOM bir bağlantı transformatörü yardımı ile güç sisteminin barasına bağlanmıştır. Benzetimi yapılan güç sistemi ve STATCOM devresi Şekil 5 'te gösterilmiştir. Şekil 5 'ten de görüleceği gibi STATCOM devresi; bağlantı transformatörü, kontrolör, filtre, iki seviyeli GBD ve GBD için gerekli olan doğru gerilimi sağlayan bir kondansatörden meydana gelir.

GBD

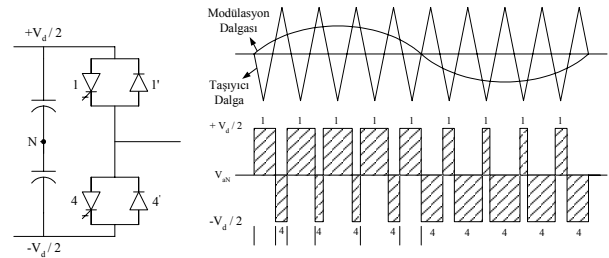


Şekil 5. MATLAB Simulink 'te oluşturulan güç sistemi ve DGM-STATCOM devre modeli

DGM-STATCOM 'un kontrolör kısmının iç yapısı Şekil 6 'da gösterilmiştir. Kontrolör, güç sisteminin gerilimini düzenleme, doğru gerilimi istenilen seviyede tutma ve güç sistemi ile senkronizasyonu sağlama gibi üç temel işlevi yerine getirir.

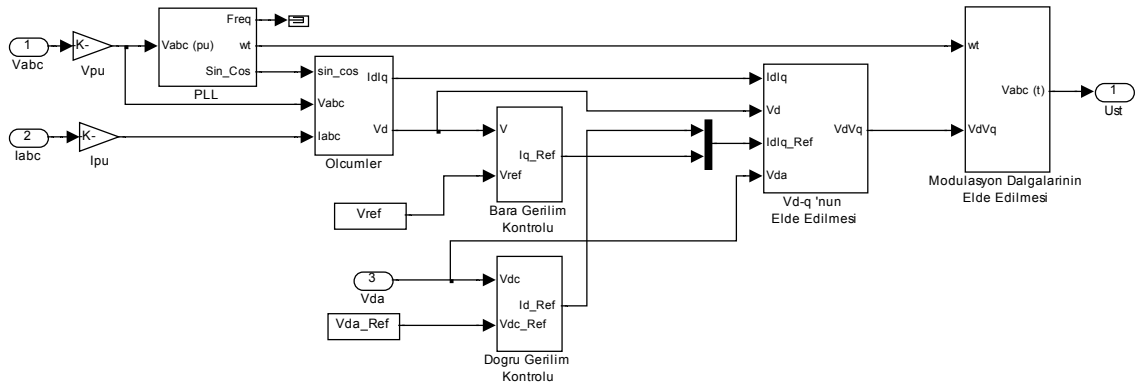
STATCOM 'da doğru gerilim kontrolü ile sistemden dönüştürücüye ya da dönüştürüciden sisteme akacak olan aktif güç miktarı belirlenir. Ölçülen doğru gerilim değeri ile referans doğru gerilim değeri karşılaştırılıp bir PI kontrolörden geçirildikten sonra referans aktif akım bileşeni (I_{dRef}) bulunur. Daha sonra I_{dRef} ile ölçülen aktif akım bileşeni (I_d) karşılaştırılır. Hata değeri bir PI kontrolörden geçirilerek GBD 'nin üretmesi gereken gerilimin reaktif bileşeni (V_q) elde edilir. Aynı şekilde referans reaktif akım bileşeni (I_{qRef}) ile ölçülen reaktif akım (I_q) karşılaştırılıp hata değeri bir PI kontrolörden geçirildikten sonra GBD 'nin üretmesi gereken gerilimin aktif bileşeni (V_d) bulunur. Elde edilen V_d ve V_q tekrar üç faza çevrilerek DGM kontrolü için gerekli olan modülasyon dalgaları elde edilir. Sinüzoidal DGM (SDGM) yapısı, diğer DGM tekniklerine göre daha basit olduğundan yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle, yapılan çalışmada SDGM tercih edilmiştir. SDGM 'de kapı darbeleri, modülasyon

dalgaları ile taşıyıcı dalganın karşılaştırılması sonucu elde edilir. SDGM ile bir fazlı GBD için kapı darbelerinin elde edilmesi Şekil 7 'de gösterilmiştir



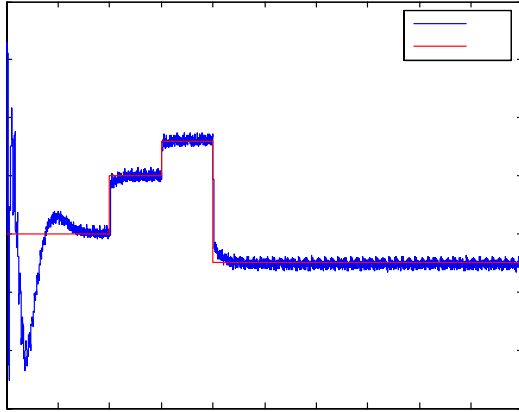
(a) (b)
Şekil 7. SDGM ile dönüştürücü için kapı darbelerinin üretimi a) GBD 'nin bir faz bacağı, b) DGM dalgaları

Benzetim programında DGM-STATCOM 'un dinamik cevabını gözlemlemek için bara gerilimi 0.2 sn 'ye kadar STATCOM gerilimi ile aynı genlikte ve 1 pu 'ya ($1 \text{ pu} = 600 \text{ V}$), 0.2. ile 0.3. sn 'ler arasında 0.97 pu 'ya, 0.3. ile 0.4 sn 'ler arasında 0.94 pu 'ya, 0.4. sn 'den sonra ise 1.02 pu 'ya ayarlanmıştır. Şekil 8 'de bara akımının reaktif bileşenin değişimi (I_q) gösterilmiştir. DGM-STATCOM 'un bara geriliminin genliğinde



Şekil 6. STATCOM devresinin kontrolör kısmı

meydana gelen bu değişimlere göre güç sistemine endüktif/kapasitif kompanzasyon akımı çok kısa bir sürede sağladığı Şekil 8 'den görülmektedir. Referans reaktif akım bileşeni, güç sisteminin ihtiyacı olan kompanzasyon akımıdır. Benzetim sonucundan, STATCOM 'un ürettiği reaktif akım bileşeninin bu değeri çok yakından takip ettiği görülür. Bara gerilimi ile STATCOM 'un ürettiği gerilim değerleri arasındaki farka göre STATCOM 'un ürettiği reaktif akım değerleri Tablo 1 'de gösterilmiştir.

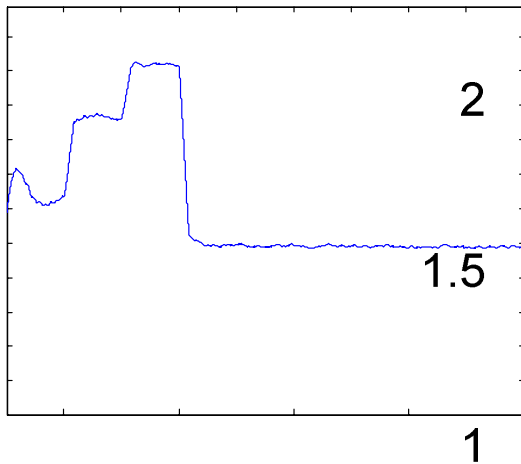


Şekil 8. STATCOM 'un bağlı bulunduğu bara akımına ait I_q bileşeninin değişimi

Tablo 1. Bara gerilimi ile STATCOM'un ürettiği gerilim değerleri arasındaki farka göre STATCOM 'un ürettiği reaktif akım değerleri

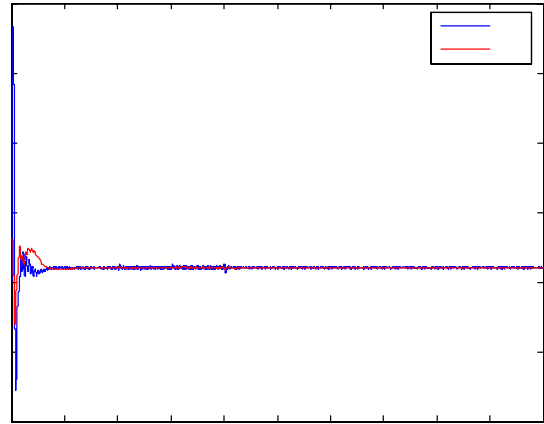
Bara Gerilimi (V-pu)	STATCOM'un Gerilimi (V-pu)	STATCOM 'un Ürettiği Reaktif Akım Değeri (A-pu)
1	1	0
0.97	1	0.48
0.94	1	0.85
1.02	1	-0.22

STATCOM, 0.4 sn 'ye kadar kapasitif bir reaktif güç üretmiş (bara gerilimi referans gerilimden düşük olduğu için), 0.4 sn'den sonra ise endüktif bir reaktif güç üretmiştir. Bu durumla ilgili benzetim programı sonucu Şekil 9 'da gösterilmiştir.



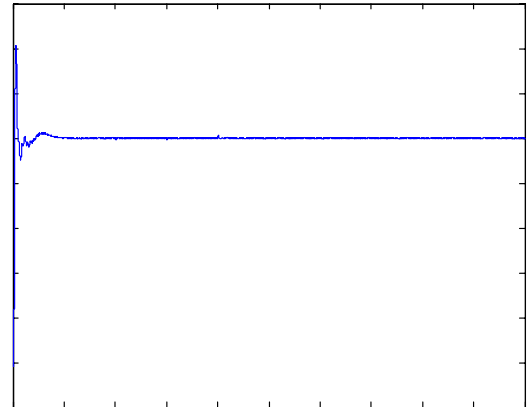
Şekil 9. STATCOM tarafından üretilen reaktif güç

Şekil 10 'da STATCOM 'un aktif akım bileşeni gösterilmiştir. Aktif akım bileşeni pozitif bir değerde olduğundan, aktif güç akışı güç sisteminden STATCOM 'a doğrudur. Böylece transformator ve dönüştürücüde meydana gelen kayıplar, doğru gerilim kontrolörü vasıtasıyla güç sisteminden STATCOM 'a doğru bir aktif güç akışı meydana getirilerek sistemden karşılanmış, kondansatör gerilimi istenilen değerde tutulmuştur.



Şekil 10. STATCOM 'un bağlı bulunduğu bara akımına ait I_d bileşeninin değişimi

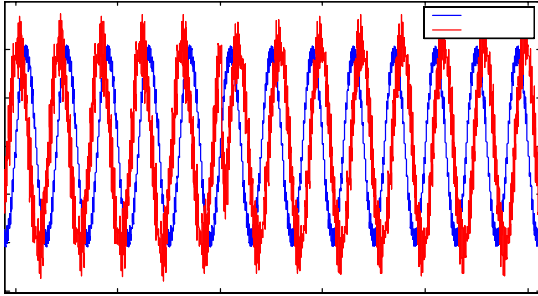
DGM-STATCOM 'larda dönüştürücünün doğru geriliminin değeri sabittir. Dönüştürücünün doğru geriliminin değişimi ile ilgili benzetim programı sonucu Şekil 11 'de verilmiştir. Görüldüğü gibi bara geriliminde meydana gelen değişimlere rağmen doğru gerilim kontrol döngüsü kondansatör gerilimini istenilen değerde sabit tutmuştur. Bu, güç sisteminden STATCOM 'a doğru bir aktif güç akışı sağlanarak başarılmıştır.



Şekil 11. STATCOM 'un doğru geriliminin değişimi

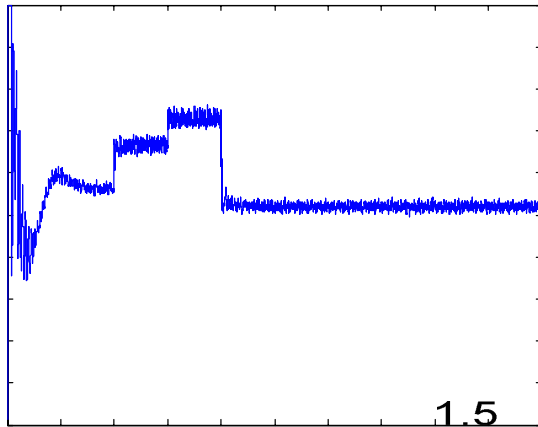
Şekil 12 'de STATCOM 'un bir fazına ait akım ve gerilimleri arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 12 'den görüleceği gibi STATCOM, 0.4 sn 'ye kadar bara gerilimi nominal geriliminin altında (sistem endüktif) olduğundan kapasitif bir reaktif akım, 0.4 sn 'den sonra ise bara gerilimi nominal geriliminin üzerinde (sistem

kapasitif olduğundan endüktif bir reaktif akım sağladığı görülür. STATCOM 0.4 sn 'den sonra kapasitif çalışmadan endüktif çalışmaya geçmiştir. STATCOM, yaklaşık olarak 2.5 ms sonra endüktif reaktif akım sağlamaya başlamıştır. Bu süre geleneksel kompanzasyonla karşılaştırıldığı zaman (Statik anahtarlama kontaktörler ile bir kademeden devreye alınması yaklaşık 60 ms 'dir) çok kısa bir süre olduğu görülür.



Şekil 12. STATCOM 'un bir fazına ait akım ve gerilimleri arasındaki faz ilişkisi

DGM-STATCOM 'larda doğru gerilim değeri değişmediğinden dönüştürücünün çıkış geriliminin değeri, modülasyon indeksi yardımı ile değiştirilir. Benzetim programında modülasyon indeksinin değişimi Şekil 13 'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Modülasyon indeksinin değişimi

4. SONUÇ

Bu çalışmada, MATLAB-Simulink Toolbox 'ı kullanılarak DGM-STATCOM 'un benzetimi yapılmış ve bara geriliminin genliğinde meydana gelen

değişmelere karşı kompanzatorün bu değişikliklere verdiği dinamik cevap gözlemlenmiştir. Benzetim programının sonuçlarından, DGM-STATCOM 'un sistem için gerekli olan kompanzasyon akımını, geleneksel kompanzasyona göre oldukça kısa sürede (2.5 ms) karşılayarak bağlı bulunduğu baraya reaktif güç desteği sağladığı ve güç sisteminde meydana gelen değişimlere çok hızlı cevap verdiği görülmektedir. STATCOM 'un güç sisteminde meydana gelen değişimlere çok hızlı cevap vermesi ve güç sistemi için gerekli olan reaktif gücü çok kısa sürede sağlaması, iletim ve dağıtım sistemlerinin dinamik kararlılığı üzerine olumlu etkisi vardır.

5. KAYNAKLAR

1. Gyugyi, L., Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators, Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 4, pp. 483-494, 1988.
2. Kocatepe, C. ve diğ., Endüstriyel Tesislerde Reaktif Güç Kompanzasyonu İçin Statik Var Kompanzasyon Sisteminin Gerçekleştirilmesi, Proje.
3. Gyugyi, L., Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 9, Issue: 2, 904-911, 1994.
4. Cavaliere, C. A. C., Watanabe, E. H., Aredes, M., Comparison between the Conventional STATCOM and the PWM STATCOM, Vol. 2, COBEP'99, Brazil, 1999.
5. Hingorani, N. G., Flexible AC Transmission Systems. IEEE Spectrum, 1993;40-5.
6. Schauder, C., and Mehta, H., Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators, IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 4, pp.299-306, 1993.
7. Gyugyi, L., et al, Advanced static Var Compensator Using Gate Turn-off thyristors for utility applications, CIGRE, pp. 23-203, 1990.
8. Edwards, C. W., et al., Advanced static Var Generator Employing GTO thyristors, IEEE PES Winter Power Meeting, pp. 38WM109-1, 1988.
9. Uzunovic, E., EMPT, Transient Stability and Power Flow Models and Controls of VSC Based FACTS Controllers, Phd. Thesis, Waterloo, Ontario, Canada, 2001.
10. El-Moursi, M. S. and Sharaf, A. M., Novel Controllers for the 48-Pulse VSC STATCOM and SSSC for Voltage Regulation and Reactive Power Compensation, IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 22, No. 4, 2005.
11. Çötel, R., STATCOM ile Güç Akış Kontrolü, Y. Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.

1
0.5
0
-0.5
Va-la (pu)