

İNVERTÖR TEMELLİ FACTS CİHAZLARI KULLANARAK REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU İLE GERİLİM KONTROLÜ

Ulaş EMİNOĞLU Saadetdin HERDEM Tankut YALÇINÖZ

Niğde Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,

Niğde 51200 / Türkiye

e-posta: ulas41@hotmail.com sherdem@nigde.edu.tr tyalcinoz@nigde.edu.tr

Anahtar Kelimeler- FACTS, Statcom, Statcom Dinamik Denklemleri, SSSC, Park Dönüşümü

ÖZET

Bu çalışmada invertör temelli FACTS cihazlarından Statik Kompanzatör (Statcom) tanıtılarak kontrol tekniği verilmiştir. Gerilim kontrolü Statcom ile yapılan bir güç sisteminde Park dönüşümü kullanılarak Statcomlu sistemin dinamik denklemleri verilmiştir. Statcom çıkış gerilimi ve DC gerilim kontrol edilerek reaktif güç kompanzasyonu ile iki baralı endüktif reaktif yüklü iletim hattında hat sonu gerilimi kontrol edilmiştir. Simülasyon Matlab/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup reaktif güç kompanzasyonu ile gerilim kontrolünde AC ve DC sistem değişkenlerinin değişimi verilmiştir.

1. GİRİŞ

Esnek AC iletim sistemleri olarak adlandırılan FACTS teknolojisi, aktif ve reaktif güç akışı, paralel ve seri empedans, sistem gerilimi gibi güç sistemi değişkenlerinin kontrolü için geliştirilmektedir. FACTS cihazları ilk aşamada yüksek güçlü tristörler kullanılarak Statik VAr Kompanzatör (SVC) ve Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) [1] olarak bir çok pratik uygulamalarda kullanılmıştır. Yarı iletken teknolojisinin gelişmesi farklı FACTS cihazlarının geliştirilmesine imkan sağlamıştır. Bunlar invertör temelli FACTS cihazları olarak adlandırılmaktadır. İnvertör temelli FACTS cihazlarından Statik Kompanzatör (STATCOM) güç sistemlerinde dinamik kararlılığın artırılması ve gerilim regülasyonu için kullanılmaktadır [2,3]. Statcom yapı olarak invertör çıkışına bağlı kapasitör, kontrol devresi ve kuplaj trafolarından oluşmaktadır. Kuplaj trafoları invertör çıkış gerilimindeki harmonik bileşenleri azaltmak amacıyla kullanılmaktadır.

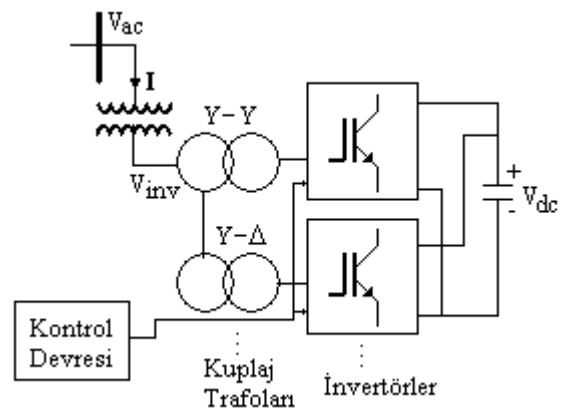
Statik Kompanzatör, gerilim yükseltici transformatör üzerinden güç sistemine paralel olarak bağlanır. Bağlı bulunduğu sisteme reaktif güç aktararak veya reaktif güç çekerek sistem geriliminin kontrolüne imkan sağlamaktadır [4]. Statik kompanzatörün güç sistemine paralel olarak bağlanması sonucunda Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC) kompanzatör devresi elde edilir. Sisteme reaktif güç aktarılması veya

sistemden reaktif güç çekilmesi ile hat empedansı geniş bir aralıkta değiştirilmektedir [5].

Bu çalışmada Statcom çalışma prensibi incelenerek invertör çıkış gerilimi ve DC geriliminin kontrolü için statcom dinamik denklemleri ve kontrol devresi verilmiştir. Son bölümde Matlab/Simulink programı kullanılarak endüktif yüklü bir iletim hattında statcom ile reaktif güç kompanzasyonu sonucunda çıkış geriliminin kontrolü ile AC ve DC sistem değişkenlerinin değişimi verilmiştir.

2. STATCOM ÇALIŞMA PRENSİBİ

İnvertör temelli FACTS cihazlarından STATCOM, Tristör tetiklemeli Statik VAr Kompanzatör limitlerini aşmak amacıyla dizayn edilmiş olup reaktif güç kompanzasyonu ile bağlı bulunduğu sistem geriliminin belirli sınırlarda kontrolüne imkan sağlamaktadır. Bağlı bulunduğu AC sistem gerilimi ile invertör çıkış geriliminin büyüklüğü Statcom reaktif gücünü tayin etmektedir. Genel olarak Statcom devre şeması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Statcom devre şeması

Reaktif güç, Statcom çıkış geriliminin değiştirilmesi ile kontrol edilmektedir. Eğer Statcom çıkış gerilimi AC sistem geriliminden büyük ise reaktif akım Statcom'dan AC sisteme doğru akmakta ve AC sisteme reaktif güç aktarılmaktadır. Bu durumda akım gerilimden yaklaşık olarak 90° ilerde olup aktarılan

güç kapasitiftir. Eğer Statcom çıkış gerilimi sistem geriliminden küçük ise reaktif akım AC sistemden Statcom'a doğru akmakta ve sistemden reaktif güç çekilmektedir. Bu durumda akım gerilimden yaklaşık olarak 90° geride olup sistemden endüktif güç çekilmektedir. Statcom çıkış geriliminin AC sistem gerilimine eşit olması durumunda reaktif akım ve reaktif güç sıfır olmaktadır.

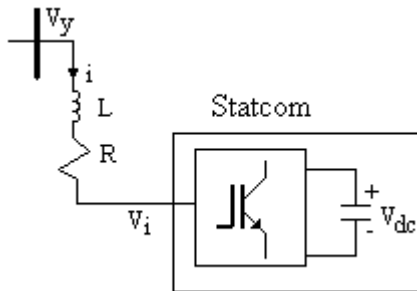
Kapasitör, invertör için gerekli DC gerilimi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Invertör çıkış gerilimi ile AC sistem gerilimi arasındaki faz farkına bağlı olarak kapasitör şarj veya deşarj olmaktadır. Transformatör rezistansının ihmal edilmesi durumunda AC sistemden Statcom'a akan aktif güç,

$$P = 3 \frac{V_{ac} V_{inv}}{X} \sin \alpha \quad (1)$$

olarak ifade edilir [6]. Burada V_{ac} AC sistem geriliminin V_{inv} ise invertör çıkış geriliminin etkin değerleri, X trafoların eşdeğer reaktansı ve α gerilimler arası faz farkıdır. Bu durumda $\alpha > 0$ ise invertör çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazdadır. Çekilen aktif güç $P > 0$ olduğunda kapasitör şarj olur. Açının negatif olması durumunda çekilen aktif güç $P < 0$ olmakta ve kapasitör deşarj olmaktadır. Sürekli durumda invertör çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazda tutularak sistemden çekilen aktif güç trafo ve invertör kayıplarını karşılamaktadır.

3. STATCOM KONTROL TEKNİĞİ

Kapasitör DC gerilimi ve invertör çıkış geriliminin kontrolü için akımın ve geriliminin aktif ve reaktif bileşenlerinden yararlanılır. Park dönüşümü kullanılarak akımın aktif ve reaktif bileşenleri elde edilir. Akımın I_d aktif bileşeni ile DC gerilimin kontrolü için V_q gerilim bileşeni ve I_q reaktif bileşeni kullanılarak invertör çıkış geriliminin kontrolü için de V_d gerilim bileşeni kontrol edilmektedir. Şekil 1'de verilen statcom devre şemasında trafoların eşdeğer empedansı $Z = R + jX$ olarak ifade edilmesi durumunda elde edilen sistemin tek fazına ait devre şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Statcomlu güç sisteminin tek faz devre şeması

AC sistem ile statcom arasındaki akım ve gerilim ilişkisi

$$(R + L \frac{d}{dt})i = V_y - V_i \quad (2)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada verilen değişkenler

$$i = [i_a \ i_b \ i_c]^T, V_i = [V_{ia} \ V_{ib} \ V_{ic}]^T \text{ ve } V_y = [V_{ya} \ V_{yb} \ V_{yc}]^T$$

$$R = R \times [I]_{3 \times 3} \text{ ve } L = L \times [I]_{3 \times 3} \quad (3)$$

matrisleri ile ifade edilir. DC gerilim ve invertör çıkış gerilimlerinin kontrolü için üç fazlı akım ve gerilimler Park dönüşümü ile d-q bileşenlerine dönüştürülür. Bu durumda akım ve gerilimlerin aktif ve reaktif bileşenleri,

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = P \times \begin{bmatrix} V_{ay} \\ V_{by} \\ V_{cy} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = P \times \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ -\sin \alpha & -\sin(\alpha - 2\pi/3) & -\sin(\alpha + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ifadeleri ile belirlenir. Denklem (4)'de verilen Park dönüşümünden yararlanarak elde edilen akım ve gerilim bileşenleri cinsinden Statcomlu sistemin dinamik denklemleri elde edilir.

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L} i_d + \omega i_q + \frac{1}{L} (V_{yd} - V_{id})$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L} i_q - \omega i_d + \frac{1}{L} (V_{yq} - V_{iq}) \quad (5)$$

Elde edilen dinamik denklemlerden yararlanarak invertör çıkış geriliminin aktif ve reaktif bileşenlerinin ifadesi,

$$V_{id} = \omega L i_q + V_y - L u_d$$

$$V_{iq} = -(\omega L i_d + L u_q) \quad (6)$$

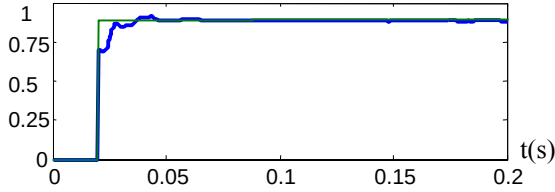
elde edilir. Burada u_d ve u_q lineer PI kontrolörden elde edilen kontrol sinyalleridir [8]. Bu durumda kontrol sinyalleri ve akımın aktif ve reaktif bileşenlerinden yararlanarak invertör çıkış gerilimi ve DC gerilimi kontrol edilir.

Üç fazlı 6 puls tetiklemeli invertörlerde çıkış gerilimi $[6k \pm 1]f$ frekanslı harmonik bileşenler içermektedir. Burada f AC sistemin temel frekans bileşeni ve $k=1,2,3,\dots$ tam sayıları göstermektedir. Invertör sayısı artırılarak akım ve gerilimdeki harmonik bozulmaların azaltılması mümkündür. İki invertörden oluşan Statcom devresi için trafo sargılarının I. trafo için Y-Y, ikinci trafo için Y- Δ bağlanması ile çıkış gerilimleri arasında 30° lik faz farkı oluşmaktadır. Trafo sekonder sargılarının seri bağlanması ile elde

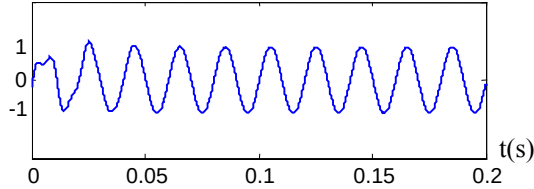
edilen toplam gerilim faz farkından dolayı sinüs fonksiyonuna yakın bir sinyale dönüşmektedir.

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

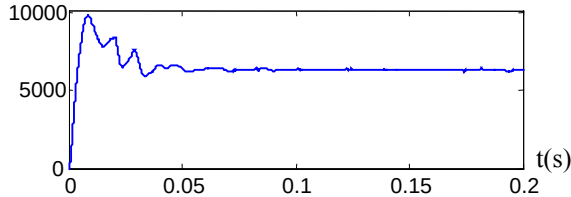
Bu çalışmada, Matlab/Simulink programı kullanılarak endüktif yüklü, dağıtık parametrelili 75 km uzunluğundaki bir iletim hattında Statik Kompanzator (Statcom) kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu ile çıkış (yük) gerilimi kontrol edilmiştir. 15 kV'luk, P=5 MW ve Q=2.5 MVar endüktif yüklü, eşdeğer empedansı $Z_T = 0.9 + j21.9$ olan bir iletim sisteminde ± 4 MVar'lık bir Statcom kullanılmıştır. DC gerilimin ve invertör çıkış geriliminin kontrol edilmesi ile Statcom kapasitif çalıştırılıp sisteme kapasitif güç aktararak çıkış gerilimi kontrol edilmiştir. Invertör çıkış gerilimi AC sistem geriliminden 10° geride tutularak invertör ve transformator kayıpları karşılanmıştır. Invertör anahtarlama frekansı $f_s = 2$ kHz, DC gerilim 6 kV ve $C = 1000 \mu F$ olarak alınmıştır. Çıkış gerilimindeki harmoniklerin sisteme aktarılması filtre kullanılarak önlenmiştir. Statcom ile gerilim kontrolü için yapılan simülasyon sonucu elde edilen AC ve DC sistem değişkenlerinin değişimi Şekil 3'de ve devre şeması Şekil 4'de verilmiştir.



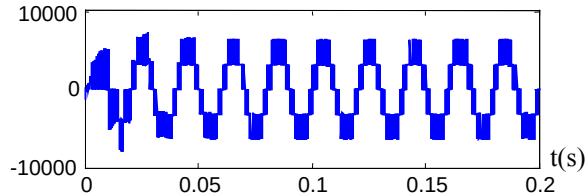
Şekil 3-a. V_{ref} , V_v gerilimlerinin etkin değeri [pu]



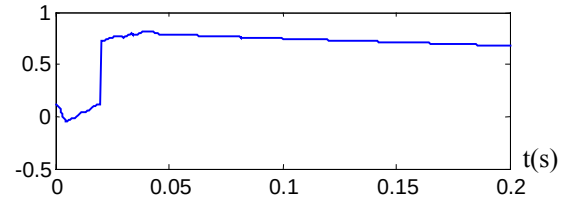
Şekil 3-b. Yük ($V_v=V_i$) gerilimi [pu]



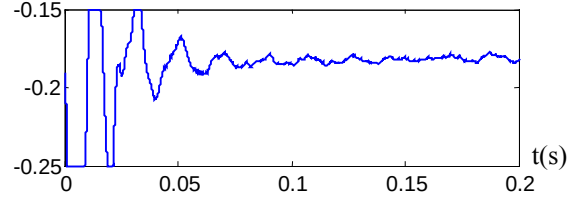
Şekil 3-c. V_{dc} geriliminin değişimi [V]



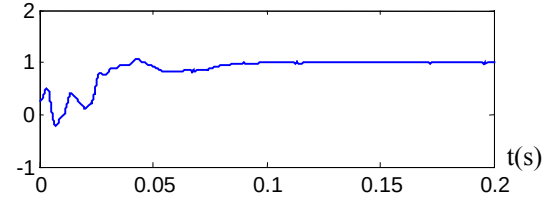
Şekil 3-d. Invertör çıkış (V_i) gerilimi [V]



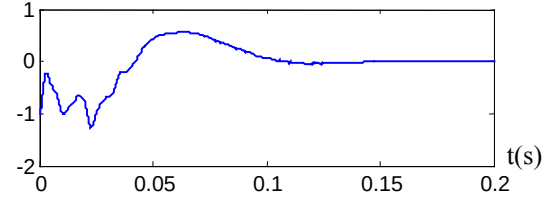
Şekil 3-e. V_{id} geriliminin değişimi [pu]



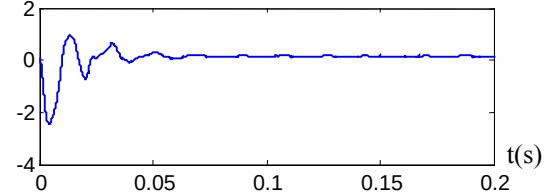
Şekil 3-f. V_{iq} geriliminin değişimi [pu]



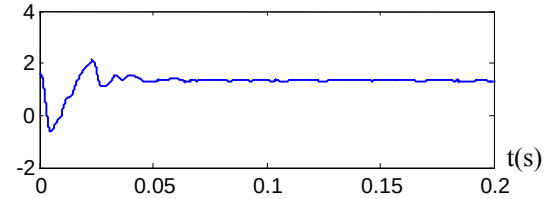
Şekil 3-g. V_{td} geriliminin değişimi [pu]



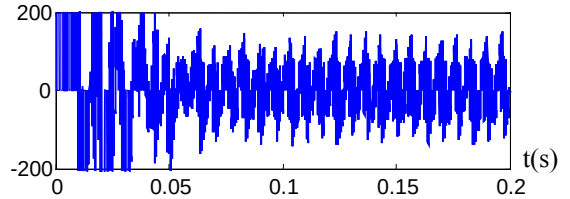
Şekil 3-h. V_{tq} geriliminin değişimi [pu]



Şekil 3-j. I_d akımının değişimi [pu]



Şekil 3-k. I_q akımının değişimi [pu]



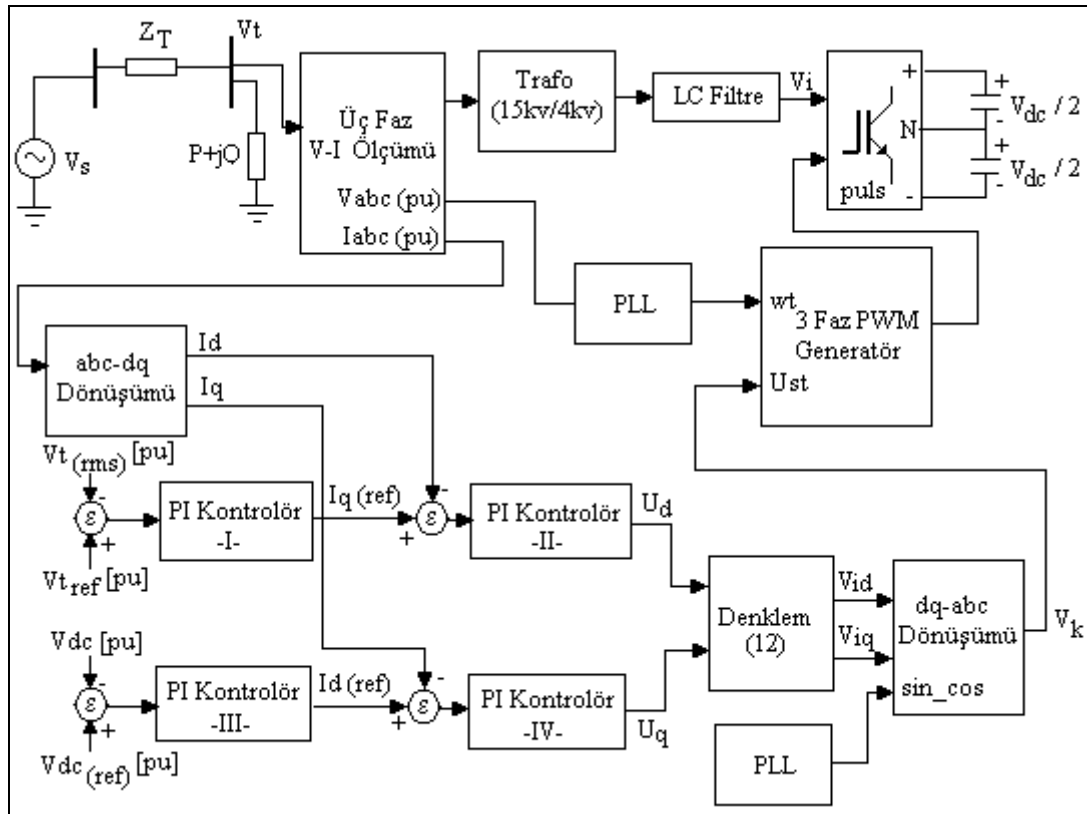
Şekil 3-l. I_{dc} akımının değişimi [A]

4. SONUÇ

Bu çalışmada Statik Kompanzator (Statcom) çalışma prensibi incelenerek Matlab/Simulink uygulaması verilmiştir. Statcom dinamik denklemlerinden yararlanarak kontrol devresi oluşturulmuş, sistem değişkenleri PWM kontrol tekniği ile belirlenen sınırlarda kontrol edilmiştir. PWM kontrol, Matlab/Simulink Power System Toolbox kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan statcom uygulamaları sonuçları ile karşılaştırılarak Statcom Matlab/Simulink modelinin geçerli bir model olduğunu söylemek mümkündür.

KAYNAKLAR

- [1] Hingorani N. G. and Gyugyi L., Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission system, IEEE Press, New York, 1999
- [2] Gyugyi L., Solid-State Synchronous Voltage Sources for Dynamic Compensation and Real-Time Control of AC Transmission Lines, Emerging Practices in Technology, IEEE-Transmission Lines, IEEE Standards Press, Piscataway, USA, 1993
- [3] Mori S., Development of a Large Static Var Generator Using Self-Commutated Inverters for Improving Power Systems Stability, IEEE Trans. Power Delivery, vol.8, No.1, Feb.1993,pp.371-377
- [4] Schauder C, Gernhardt M., Stacey E., Lemak T., Gyugyi L., Cease T. M., and Edris A., Development of 100Mvar Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 10, No.3, July 1995, pp.1486-1493
- [5] Gyugyi L., Schauder c. D., and Sen K. K., Static Synchronous Series Compensator: A Solid-State Approach to the Series Compensation of Transmission Lines, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997, pp. 406-417
- [6] Uzunović E., Canizares C. A., Jeeve J., Fundamental Frequency Model of Static Synchronous Compensator, North American Power Symposium (NAPS)PP. 49-54, October 1997
- [7] Sybille G., Huy H. L., Digital Simulation of Power Systems and Power Electronics using the Matlab/Simulink Power System Blockset, IEEE Power Engineering Society-Winter Meeting 2000 Special Technical Session
- [8] Sahoo N. C., Panigrahi B. K., Dash P. K., Panda G., Application of multivariable feedback linearization scheme for STATCOM control, Electric Power systems Research vol, 62, pp. 81-91, 2002



Şekil 4. Statcom ile gerilim kontrolü için oluşturulan tek faz devre şeması