

PAPER DETAILS

TITLE: STATCOM İLE BİR ENERJİ İLETİM SİSTEMİNDE GERİLİM KONTROLÜ

AUTHORS: M. Mustafa ERTAY, Zafer AYDOĞMUS

PAGES: 77-90

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/440858>



STATCOM İLE BİR ENERJİ İLETİM SİSTEMİNDE GERİLİM KONTROLÜ

M. Mustafa ERTAY¹, Zafer AYDOĞMUŞ²

¹Düzce Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü 81620 Düzce, mustafaertay@duzce.edu.tr

²Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü 23119 Elazığ, zaydogmus@firat.edu.tr

Geliş Tarihi: 26.05.2009

Kabul Tarihi: 22.03.2010

ÖZET

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı çok önemlidir. Reaktif güç akışlarının sistem gerilimi ve kararlılığı üzerinde çok etkili olduğu bilinmektedir. STATCOM reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan konverter tabanlı FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) cihazlarından biridir. Bu çalışmada bir enerji iletim sistemindeki dağıtım barasında, yük değişimlerine karşı STATCOM ile bara geriliminin kontrolü yapılmıştır. Öncelikle STATCOM çalışma prensibi incelenmiş, daha sonra STATCOM ve enerji iletim sistemi ile ilgili denklemler verilmiştir. Dağıtım barasında STATCOM kurulu olan bu enerji iletim sisteminin benzetimi MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçlarında; STATCOM'un bara gerilimini istenen değerlerde tuttuğu, yük değişimlerine karşı hızlı bir şekilde reaktif güç kompanzasyonu sağladığı ve sistemin gerilim kararlılığını iyileştirdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gerilim Kararlılığı, FACTS, STATCOM, Reaktif Güç Kompanzasyonu

THE VOLTAGE CONTROL IN AN ENERGY TRANSMISSION SYSTEM BY STATCOM

ABSTRACT

Voltage stability is very important in power systems. It is known that reactive power flows are very efficient on the system voltage and stability. STATCOM is one of the converter based FACTS devices used for reactive power compensation. In this study, at the distribution bus of an energy transmission system, in spite of load variations, control of the bus voltage have been done with STATCOM. Firstly STATCOM operation is investigated and then the equations related with STATCOM and energy transmission system is given. The simulation of this energy transmission system which the STATCOM installed at distribution bus is realized in the MATLAB/Simulink environment. In the simulation results; It has been seen that STATCOM hold the bus voltage at desired values, inspite of load variations reactive power compensation is provided very fast and voltage stability of the system is improved.

Key Words: Voltage stability, FACTS, STATCOM, Reactive Power Compensation

1. GİRİŞ

Modern endüstri ve yük talebinin hızlı büyümesi ile güç sistemi gerilim kararsızlığı sistem kararlılığının birinci tehdidi olmuştur. Özellikle güç sisteminin kontrol için çok karmaşık hale gelmesi gibi durumlarda gerilim kararlılığı çok önemlidir [1]. Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin normal çalışma koşullarında ve bozucu bir etkiye maruz kaldıktan sonra sistemdeki bütün baralarda sürekli kabul edilebilir gerilimler sağlama yeteneği olarak tanımlanabilir [2]. Güç sisteminin gerilim kararlılığına etki eden birçok etken bulunmaktadır; yetersiz reaktif güç, otomatik uyarı sistemi ve bunun generatöre bağlı olan denetleyicileri, gerilim bağımlı yükler, yük gerilimi düzenleme transformatörleri, iletim sisteminde gerilimi iyileştirmek üzere yerleştirilmiş statik var

kompanzatörler vb.. Reaktif güç kompanzasyonu hem iletim kapasitesi hem de gerilim kararlılığını iyileştirmede çoğu kez en etkin metottur.[1]

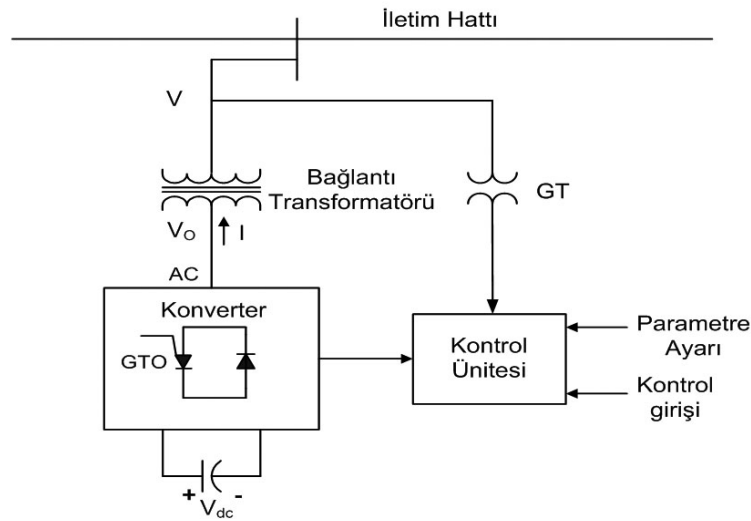
İletim ve dağıtım sistemlerinde reaktif güç kontrolü yeni iletim hatlarının yapımındaki zorluklardan dolayı özel bir dikkat kazanmıştır. Çevresel ve ekonomik faktörler birçok kere yeni iletim hattı projelerini engellemiştir [3]. İndüktif reaktif güç akışları enerji ve iletim kapasitesini harcamakta ve gerilim düşümüne neden olmaktadır. Bu geri güç akışını düzeltmek için ileri reaktif güç (gerilime göre ileri fazlı akım) sağlanarak akımın gerilimle aynı fazlı olması sağlanır. Reaktif güç statik veya dinamik VAR kaynaklarından sağlanmaktadır [4]. Reaktif güç akış kontrolü uygun bir gerilim profili sağlamak için sabit reaktör ve kapasitör gruplarının uygulaması ile başlamıştır. Bu cihazların kullanımı yük değişimlerinden kaynaklanan gerilim dalgalanmalarını minimize etmiş ve kayıpları azaltmıştır [3]. AC güç sistemlerinde, reaktif güç problemlerinin üstesinden gelmek amacıyla uzun yıllardır mekanik anahtarlama kapasitör ve reaktör grupları kullanılmaktadır. Ancak kapasitör ve reaktör anahtarlama kontrol etmek güç mühendisleri için önemli bir sorun olmuştur. Çünkü yavaş cevap zamanlarından ötürü böyle elemanlar geçici olaylar esnasında gerekli kompanzasyonu sağlayamaz ve bozucu etkilerle karşı karşıya kaldıktan sonra gerçekten sistem kararlılığını düşürebilirler [5].

İletim hattı anahtarlama, gerilim çökmeleri, kısa devreler, yük değişimleri gibi dinamik bozucu etkilere destek vermek için reaktif güç kontrolü, istenen gerilim seviyeleri ve sistem kararlılığını sağlamak amacıyla yeterli ve hızlı olmak zorundadır. Bu karakteristikler FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) denetleyicileri kullanılarak elde edilebilir. Bu cihazlar arasında ilk olarak TCR (Tristör kontrollü reaktör),TSC (Tristör anahtarlama kapasitör), TCSVC (Tristör kontrollü statik var kompanzatör) gibi tristör tabanlı cihazlar kullanılmıştır . Günümüzde ise GTO, IGBT, IGCT gibi kontrollü anahtarlar tabanlı cihazlarda uygulanmaktadır. Bu cihazlar içerisinde Gerilim kaynaklı konvertere dayanan STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör) en çok kullanılan cihazlardan birisidir. [3]. STATCOM bugüne kadar ki en hızlı reaktif güç kompanzasyon cihazıdır. STATCOM reaktif akımı sisteme enjekte ederek veya sistemden tüketerek bulunduğu yerdeki gerilimi düzenleyebilir. Bu nedenle gerilim kararlılığı, geçici kararlılık veya yüklenebilirlik eğer gerilim düzenleyici hızlı ve kararlı cevap verirse fazlasıyla iyileştirilebilir [6,7].

Bu çalışmada STATCOM kurulu olan bir enerji iletim sisteminin MATLAB/Simulink benzetimi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle STATCOM çalışma prensibi incelenmiş daha sonra iletim sistemine ait denklemler, STATCOM dinamik denklemleri ve kontrol şeması verilmiştir. Verilen dinamik denklemler ve kontrol şeması kullanılarak STATCOM kurulu olan güç sistemi MATLAB/Simulink kullanılarak modellenmiştir. STATCOM Kontrol yapısı, AC ve DC kısım gerilimlerinin kontrolüne dayanmaktadır. Yapılan benzetim çalışmalarında dağıtım barasındaki, yük değişimlerine göre reaktif güç kompanzasyonu ile gerilim kontrolü yapılmıştır. Ani yük değişimleri ve farklı karakterde yük çeşitleri uygulanarak STATCOM'un dinamik cevabı incelenmiştir. Benzetim sonuçları grafikler halinde verilmiştir.

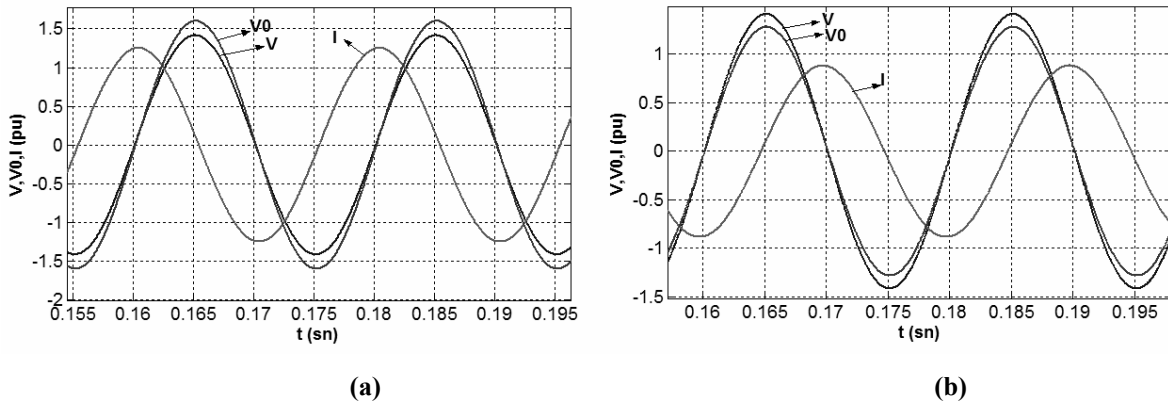
2. STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör)

STATCOM iletim hattına şönt olarak bağlanan bir FACTS cihazıdır. Literatürde STATCON veya ASVC (Gelişmiş Statik Var Kompanzatör) olarak adlandırıldığı çalışmalarda olmuştur. Şekil 1'de STATCOM devre konfigürasyonu gösterilmektedir. Basit olarak STATCOM bağlantı transformatörü, konverter ve bir DC kapasitörden ibarettir. Burada V AC sistem gerilimini V_0 ise STATCOM çıkış gerilimini ifade etmektedir. TCSVC gibi reaktif şönt kompanzasyon için kullanılabilir. Bağlı bulunduğu bara gerilimini düzenlemek için iletim hattına reaktif güç sağlayabilir veya iletim hattından reaktif güç tüketebilir.



Şekil 1. STATCOM Devre Konfigürasyonu.

STATCOM çıkışında şebeke frekansında, kontrol edilebilir genlikte ve faz açısında, dengeli üç faz gerilimleri elde edilir. Bu düzenlemede AC sistem ile aygıt arasındaki sürekli durum güç alışverişi genel olarak reaktiftir. STATCOM ve AC sistem arasındaki reaktif güç alış veriş konverter çıkış geriliminin büyüklüğünü düzenleyerek kontrol edilir. Eğer STATCOM çıkış geriliminin büyüklüğü AC sistem geriliminin büyüklüğünü geçerse ($V_0 > V$) I akımı transformatör reaktansı yolu ile STATCOM'dan AC sisteme akar ve cihaz iletim hattı için reaktif güç üretir. Konverter çıkış akımı iletim hattı geriliminden 90° ileridedir. Bu durumda cihaz kapasitif modda çalışmış olur. Şekil 2.(a)'da bu durum gösterilmektedir. Eğer STATCOM çıkış geriliminin büyüklüğü AC sistem geriliminin büyüklüğünden küçük olursa ($V_0 < V$) akım transformatör reaktansı yolu ile AC sistemden STATCOM'a akar ve cihaz iletim hattından reaktif güç tüketir. Konverter akımı iletim hattı geriliminden 90° geridedir. Bu durumda cihaz indüktif modda çalışmış olur. Şekil 2 (b)'de bu durum gösterilmektedir. Eğer konverter çıkış gerilimi ile iletim hattı gerilimlerinin büyüklükleri eşit ise ($V_0 = V$) AC sistem ile cihaz arasında herhangi bir reaktif güç alışverişi olmaz [8].

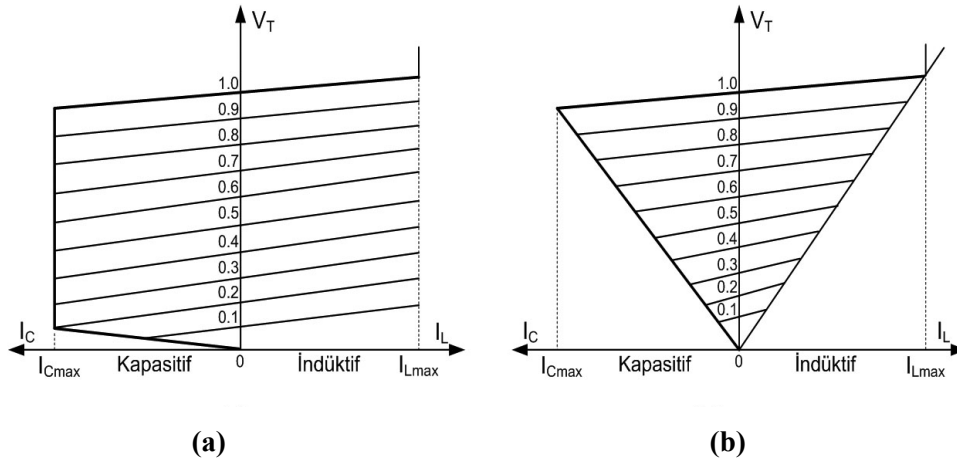


Şekil 2. STATCOM Reaktif güç alışveriş durumları (a) Reaktif güç üretimi (Kapasitif mod)

(b) Reaktif güç tüketimi (İndüktif mod) .

Kapasitör, konverter için gerekli DC gerilimi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Konverter çıkış gerilimi ile AC sistem gerilimi arasındaki faz farkına bağlı olarak kapasitör şarj veya deşarj olmaktadır. Sürekli durumda konverter çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazda tutularak sistemden çekilen aktif güç (küçük miktarda) ile transformatör ve konverter kayıpları karşılanmaktadır [8,9].

Aynı görevi yapan TCSVC'den çok üstün özellikleri vardır. Cevap süresi TCSVC'ye göre çok hızlıdır. Reaktif güç üretmek için kapasitör grupları veya reaktör grupları kullanmadığı için rezonans noktası oluşturma potansiyeli yoktur. STATCOM, kapasitör grupları veya reaktör grupları kullanmadığı ve yüksek kapasiteli yarı iletken güç aygıtlarının varlığından dolayı küçük bir kurulum alanı gerektirir. Eğer dc kapasitöre ek olarak uygun bir enerji depolama aygıtı ile bağlanırsa, STATCOM ile aktif güç kontrolü de mümkündür.

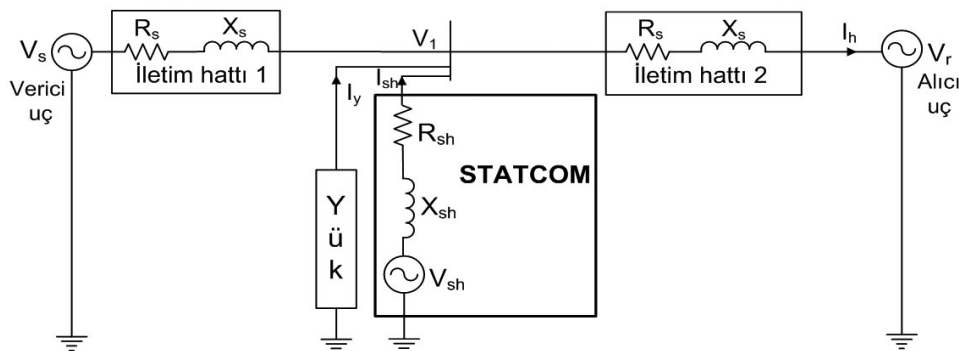


Şekil 3. (a) STATCOM V-I karakteristiği (b) TCSVC V-I karakteristiği.

Şekil 3'te TCSVC ve STATCOM V-I karakteristikleri verilmiştir. Alçak gerilimlerde STATCOM'un akım sağlama kapasitesi TCSVC'den çok daha iyidir. STATCOM herhangi bir sistem gerilimi değerinde tam kapasitif veya tam indüktif çıkış akımı sağlayabilir. STATCOM tarafından sağlanan reaktif güç kompanzasyonu miktarı TCSVC tarafından sağlanan reaktif güç miktarından daha fazladır çünkü TCSVC'de düşük bir gerilim düzeyinde reaktif güç gerilimin karesi ile orantılı olarak azalırken STATCOM'da gerilim ile doğrusal olarak azalır. Bu STATCOM'un reaktif güç denetlenebilirliğini TCSVC'den üstün kılmaktadır [10].

3. BENZETİMİ YAPILAN GÜÇ SİSTEMİ

Bu çalışmada şekil 4'te verilen güç sisteminin benzetimi yapılmıştır. Tüm sistemin modellenmesinde d-q koordinatlarında verilen denklemler kullanılmıştır. Kullanılan bütün denklemlerdeki nicelikler per-unit değerlerdir. Enerji iletim sistemi temel iki makineli bir sistemdir. V_s ve V_r dengeli üç fazlı gerilimler üreten sinüzoidal gerilim kaynaklarıdır. Burada STATCOM'un ideal kontrol edilebilir, sinüzoidal gerilim kaynağı olduğu varsayılmıştır. STATCOM'u V_{sh} gerilim kaynağı temsil etmektedir. STATCOM DC kısım eşdeğeri Şekil 4'teki devrede yer almamaktadır. DC kısım eşdeğeri ayrı olarak STATCOM modeli içerisinde sunulmaktadır. STATCOM bu sistemde enerji iletim sistemi üzerindeki bir yük istasyonuna yerleştirilmiştir. Enerji iletim sistemi burada iki bölüm olarak yani iletim hattı 1 ve iletim hattı 2 olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4. Benzetimi yapılan güç sistemi

SATCOM ve iletim sistemi parametreleri;

$R_s = 0.0075$, $X_s = 0.075$, $X_{sh} = 0.15$, $R_{sh} = 0.01$, $b_{cap} = 2.0$, $g_{cap} = 0.02$, $V_s = 1.0 \angle 30^\circ$, $V_r = 1.0 \angle 0$ şeklindedir [11]. Bütün değerler per-unit olarak verilmiştir. Sistemin baz değerleri $S_b = 100$ MVA, $V_b = 400$ kV şeklindedir. Burada R_s ve X_s sırasıyla iletim hattı rezistansı ve reaktansıdır. g_{cap} ve b_{cap} bu eşdeğer devrede gösterilmeyen ve bölüm 3.1.1’de sunulan STATCOM DC kapasitörün sırasıyla kondüktansı ve süseptansıdır. R_{sh} ve X_{sh} sırasıyla şönt bağlantı transformatörü rezistansı ve reaktansıdır. V_{sh} STATCOM’u temsil eden ideal gerim kaynağı. V_s ve V_r sırasıyla verici ve alıcı uç kaynak gerilimleridir.

3.1. STATCOM Modeli

Şönt reaktif akım ile iletim hattına reaktif güç sağlayarak bara geriliminin kontrolü yapılabilir. Şönt reaktif güç enjeksiyonu ile bara geriliminin kontrolü için STATCOM şönt akımı aktif ve reaktif akım bileşenlerine ayrılır. Bu bileşenlerden aktif akım STATCOM bara 1 gerilimi (V_1) ile aynı fazlı reaktif akım ise bu gerilim ile dik fazlıdır [11].

Üç faz nicelikleri aşağıdaki T_1 dönüşüm matrisi ile ds-qs koordinatlarına dönüştürülür.

$$T_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_o \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_o \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

[1] ds-qs nicelikleri ise T_2 dönüşüm matrisi ile d-q koordinatlarına dönüştürülür.

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = T_2 \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_o \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} = T_2 \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_o \end{bmatrix}$$

[2]

Buna göre STATCOM konverter akımı d-q koordinatlarında aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\frac{di_{dsh}}{dt} = -\frac{R_{sh}\omega_b i_{dsh}}{x_{sh}} + \omega i_{qsh} + \frac{\omega_b}{x_{sh}}(V_{dsh} - V_{1d})$$

[3]

$$\frac{di_{qsh}}{dt} = -\frac{R_{sh}\omega_b i_{qsh}}{x_{sh}} - \omega i_{dsh} + \frac{\omega_b}{x_{sh}}(V_{qsh} - V_{1q})$$

[4]

STATCOM akımı d-q bileşenleri aşağıdaki gibi aktif ve reaktif bileşenlerine dönüştürülebilir.

$$i_{rsh} = i_{dsh} \cos \theta - i_{qsh} \sin \theta$$

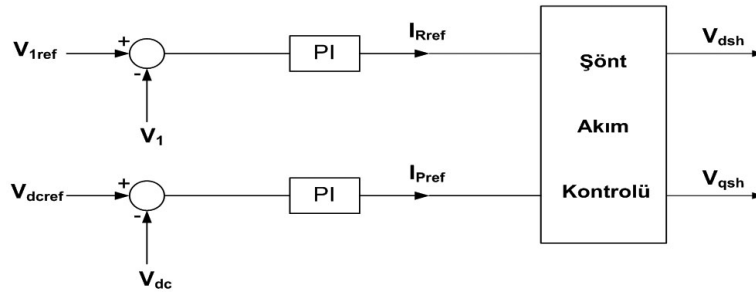
$$i_{psh} = i_{dsh} \sin \theta + i_{qsh} \cos \theta$$

[5]

Burada θ açısı; $\theta = \tan^{-1} \frac{V_{1d}}{V_{1q}}$ şeklinde ifade edilir. Bara gerilimi V_1 rms değeri olup aşağıdaki şekilde hesaplanır [11].

$$V_1 = \sqrt{V_{1d}^2 + V_{1q}^2}$$

[6]



Şekil 5. STATCOM kontrol şeması

Şekil 5 'teki şemada aktif ve reaktif akımlar aşağıdaki gibi d-q bileşenlerine dönüştürülebilir.

$$i_{dsh} = i_{rsh} \cos \theta + i_{psh} \sin \theta$$

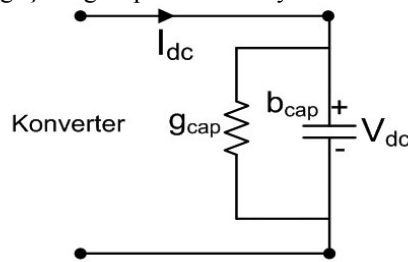
$$i_{qsh} = -i_{rsh} \sin \theta + i_{psh} \cos \theta$$

[7]

Şekil 5'teki şema görüldüğü gibi bara gerilimi ile STATCOM DC kapasitör gerilimini kontrol etmede kullanılan bir şemadır. Burada kullanılan iki PI kontrolör ile STATCOM aktif ve reaktif akım referans bileşenleri ayarlanmaktadır. Bu akım bileşenleri d-q bileşenlerine dönüştürülerek şönt akım kontrol bloğunda, denklem 3 ve 4'ten STATCOM çıkış gerilimi hesaplanabilmektedir.

3.1.1. STATCOM DC Gerilim Modeli

Kararlı bir gerilim elde etmek için DC gerilimin uygun bir modeli geliştirilmelidir. Böyle bir devre şekil 6'da görülmektedir. Bu model anlık aktif güç dengesi prensibine dayanmaktadır [12,13].



Şekil 6. STATCOM DC kısım eşdeğer devresi

Bu model kullanılarak STATCOM DC gerilimi için aşağıdaki dinamik denklem elde edilir.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{g_{cap} \omega_b V_{dc}}{b_{cap}} + \frac{\omega_b}{b_{cap}} I_{dc}$$

[8]

Bilindiği gibi V_{dc} gerilimi STATCOM kontrol değişkenlerinin bir fonksiyonudur. Buna göre güç dengesi prensibine dayanarak STATCOM DC gerilimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{g_{cap}\omega_b V_{dc}}{b_{cap}} + \frac{\omega_b}{b_{cap}} \left(\frac{V_{dsh}i_{dsh} + V_{qsh}i_{qsh}}{V_{dc}} \right)$$

[9]

3.2. Enerji İletim Sistemi Modeli

Enerji iletim sistemi, iletim hattı 1 modeli ve iletim hattı 2 modelinden oluşmaktadır. İletim hattı 1 modelinde, bara 1 gerilimi V_1 hesaplanmaktadır. İletim hattı 1 modeli için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [14].

$$V_{1d} = -R_s i_d - \frac{x_s}{\omega_b} \frac{di_d}{dt} + x_s i_q + V_{sd}$$

[10]

$$V_{1q} = -R_s i_q - \frac{x_s}{\omega_b} \frac{di_q}{dt} - x_s i_d + V_{sq}$$

[11]

Burada i_d ve i_q akımları STATCOM, iletim hattı ve yük akımı d ve q bileşenlerinin toplamıdır. V_{sd} ve V_{sq} kaynak gerilimi d-q bileşenleridir.

İletim hattı 2 modelinde hat akımı I_h hesaplanmaktadır. İletim hattı 2 modeli için denk. 12 ve 13 kullanılmıştır.

$$\frac{di_{dh}}{dt} = -\frac{R_s \omega_b i_{dh}}{x_s} + \omega i_{qh} + \frac{\omega_b}{x_s} (V_{2d} - V_{rd})$$

[12]

$$\frac{di_{qh}}{dt} = -\frac{R_s \omega_b i_{qh}}{x_s} - \omega i_{dh} + \frac{\omega_b}{x_s} (V_{2q} - V_{rq})$$

[13]

3.3. Yük Modeli

Yük STATCOM bulunan sistemde bara 1 kısmına bağlanmıştır. Bu yük yerel bir yüküdür. Yük akımı matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir. Yük burada gerilim bağımlı bir güç tüketicisi olarak temsil edilmektedir [14].

$$I_{yük} = \frac{(P_{yük} \pm jQ_{yük})}{V_{yük-barası}^*}$$

[14]

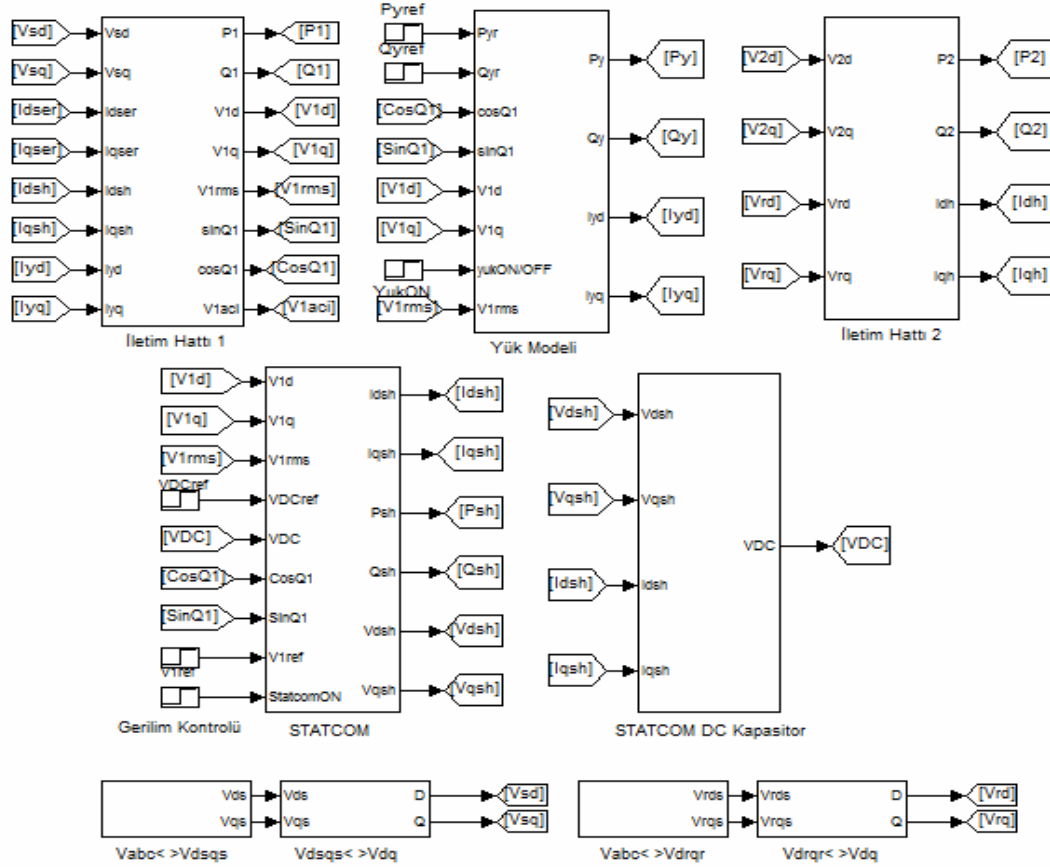
$$P_{yük} = fP(|V_{yük-barası}|)$$

$$Q_{yük} = fQ(|V_{yük-barası}|)$$

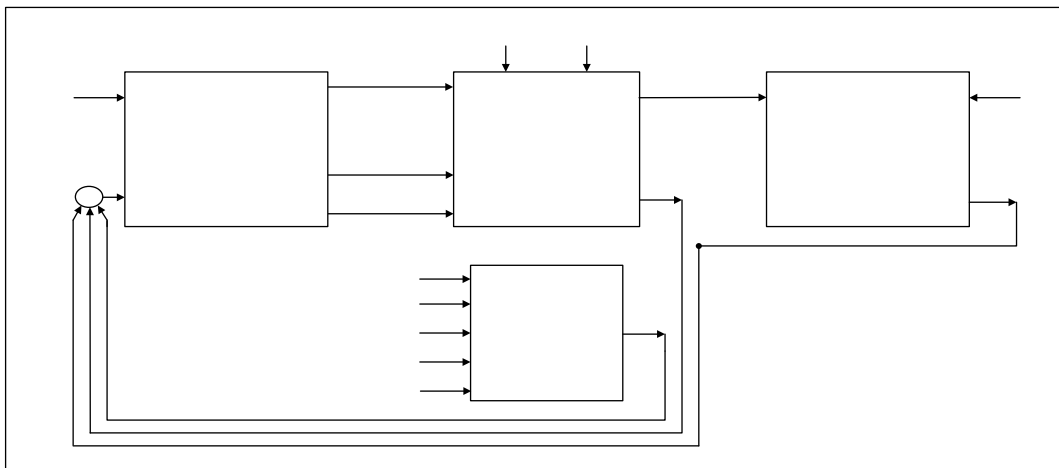
[15]

4. SİSTEMİN SİMULİNK BENZETİMİ

STATCOM kurulu olan enerji iletim sisteminin simulink modeli şekil 7’de gösterilmektedir. Sistemin simulink modeli 3. bölümde elde edilen matematiksel denklemler ve STATCOM kontrol şeması kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 7. STATCOM kurulu olan güç sisteminin simulink modeli (Şekil 4).

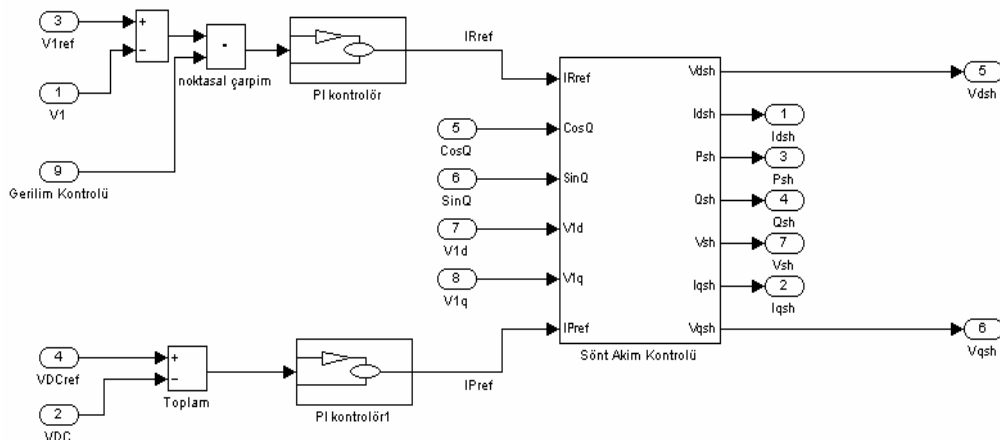


Şekil 8. STATCOM kurulu olan güç sisteminin simulink modeli prensip şeması (şekil 7).

Şekil 8’deki prensip şemasında görüldüğü gibi iletim hattı 1 bloğundan elde edilen bara 1 gerilimi (V_1), STATCOM bloğunda referans değeri ile karşılaştırılmaktadır. Aradaki hata PI kontrolöre gönderilmektedir. Bara 1 gerilimi (V_1), şönt konverter akımı (I_{sh}) ile düzenlenmektedir. Aynı zamanda iletim hattı 1 bloğundan elde edilen $\sin\theta$ ve $\cos\theta$ bilgileri STATCOM bloğuna ve yük modeline gönderilmektedir. Bara 1 gerilimine ilişkin $\sin\theta$ ve $\cos\theta$ bilgileri ile STATCOM aktif ve reaktif akımları ve yük akımları, d-q bileşenlerine dönüştürülmektedir. Bara 1 geriliminin düzenlenmesinde rol oynayan şönt akım (I_{sh}) ve yük akımı (I_y) iletim hattı 1 bloğuna verilmektedir.

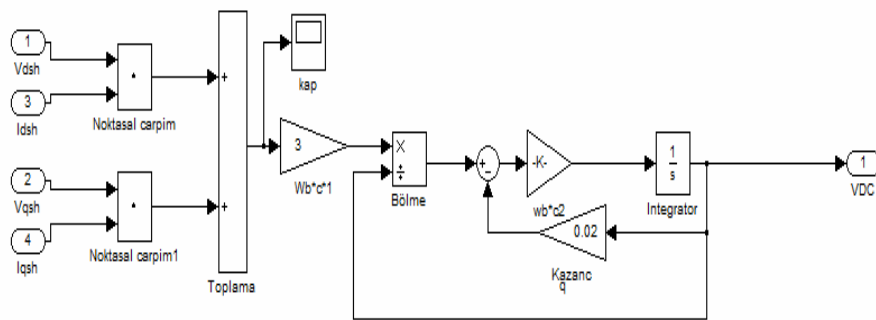
4.1. STATCOM Modeli

STATCOM modeli bölüm 3’te verilen ilgili kontrol şeması kullanılarak modellenmiştir [11]. Bu şema literatürde sıkça kullanılan bir şemadır. Şekil 9’da STATCOM modelinde, İletim hattı 1 bloğundan elde edilen V_1 gerilimi ve DC gerilim modeli bloğundan elde edilen V_{dc} gerilimi, STATCOM modeli bloğunda referans değerleri ile karşılaştırılmaktadır. Aradaki hata PI kontrolörlere gönderilmektedir. PI kontrolör çıkışları, şönt akım aktif ve reaktif referans bileşenleridir. Şönt akım aktif ve reaktif referans bileşenleri iletim hattı 1 bloğundan elde edilen $\sin\theta$ ve $\cos\theta$ bilgileri ile şönt akım kontrolü bloğunda d ve q bileşenlerine dönüştürülmektedir [14].



Şekil 9. STATCOM modeli.

4.1.1. STATCOM DC gerilim Modeli



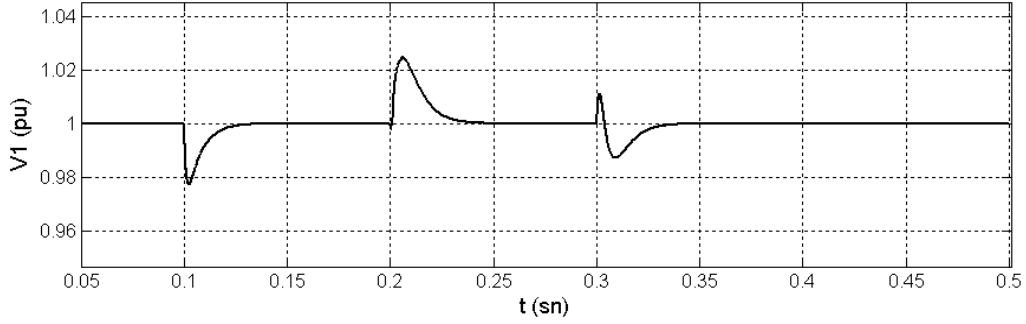
Şekil 10. STATCOM DC gerilim Modeli

STATCOM DC gerilim modeli bölüm 3’te verilen ilgili denklemler kullanılarak simulink bloklarıyla modellenmiştir.

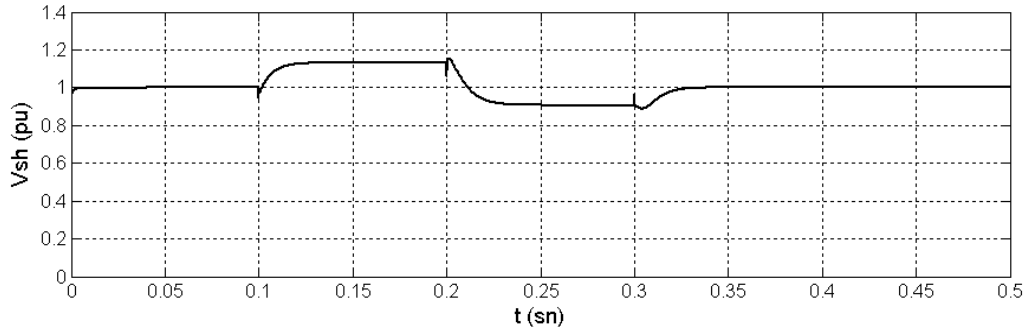
İletim hattı 1, iletim hattı 2 ve yük modeli bölüm 3.2 ve 3.3’te verilen denklemler kullanılarak modellenmiştir.

5. BENZETİM SONUÇLARI

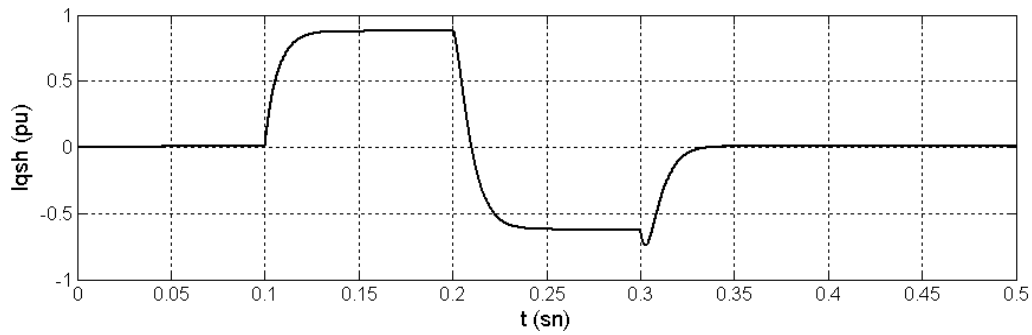
Benzetim çalışmasında değişken yükte, reaktif güç desteği ile bara 1 geriliminin kontrolü yapılmıştır. Benzetim parametreleri; $V_s=1 \angle 30^\circ$ pu, $V_r=1 \angle 0^\circ$ pu, $V_{ref}=1$ pu, $V_{dref}=3.4$ pu. Yük, $0.1 \leq t \leq 0.2$ aralığında $P+jQ=3+j2.25$, $0.2 \leq t \leq 0.3$ aralığında $P-jQ=3-j2.25$ pu, bara 1 gerilimi kontrolü $t=0.04$ 'te devreye girmektedir. STATCOM bara 1 gerilimi kontrolü $t=0.3$ 'te devre dışı kalmaktadır. Yük $t=0.1$ 'de devreye girmekte ve $t=0.3$ 'te devre dışı kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



Şekil 11. Bara 1 geriliminin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği.



Şekil 12. STATCOM çıkış geriliminin (rms) zamana göre değişimi.

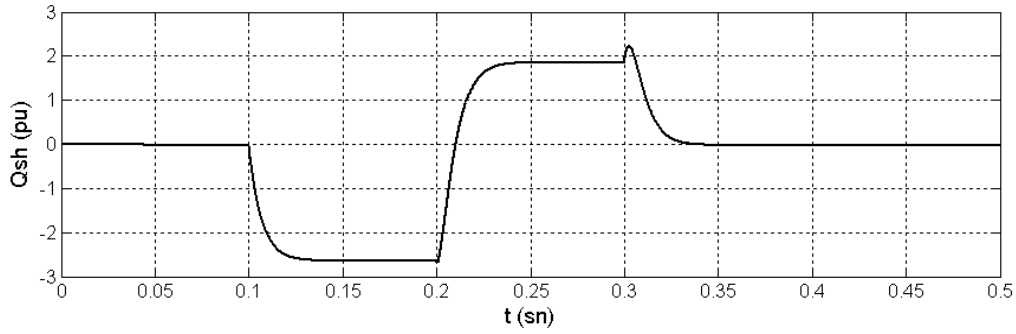


Şekil 13. STATCOM akımı I_{qsh} bileşeninin zamana göre değişimi.

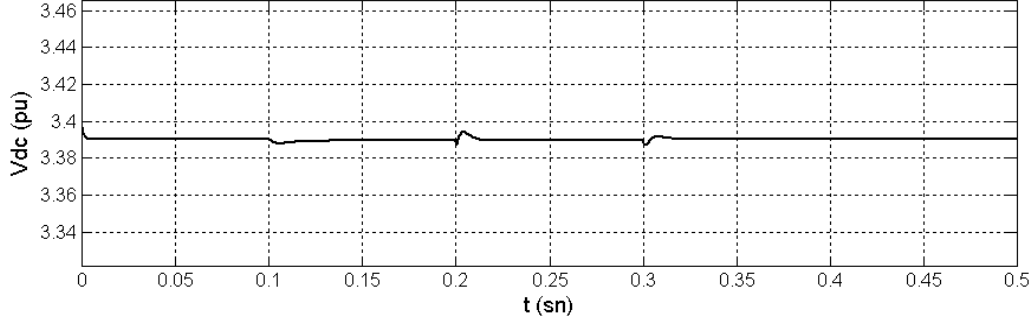
Şekil 11'de görüldüğü gibi $t=0.1$ sn'de $P+jQ$ endüktif yükü devreye girdiği zaman bara 1 gerilimi azalarak yaklaşık 0.98 pu değerini almaktadır. Azalan bara 1 gerilimi çok kısa sürede STATCOM bara 1 gerilimi kontrolü ile referans değer olan 1 pu değerine yükseltilmektedir. STATCOM $0.1 \leq t \leq 0.2$ aralığında sisteme reaktif güç

sağlamakta ve kapasitif çalışmaktadır. Şekil 12’den görüldüğü gibi STATCOM çıkış gerilim değeri endüktif yük devreye girdiği zaman ($t=0.1$) yükselmektedir. Bu durum sisteme reaktif güç sağlandığı anlamına gelmektedir. Şekil 13’te ise bunlara paralel olarak $0.1 \leq t \leq 0.2$ aralığında, STATCOM reaktif akımının (I_{qsh}) pozitif olduğu görülmektedir. P+jQ yükü $t=0.2$ ’de devre dışı kalmaktadır.

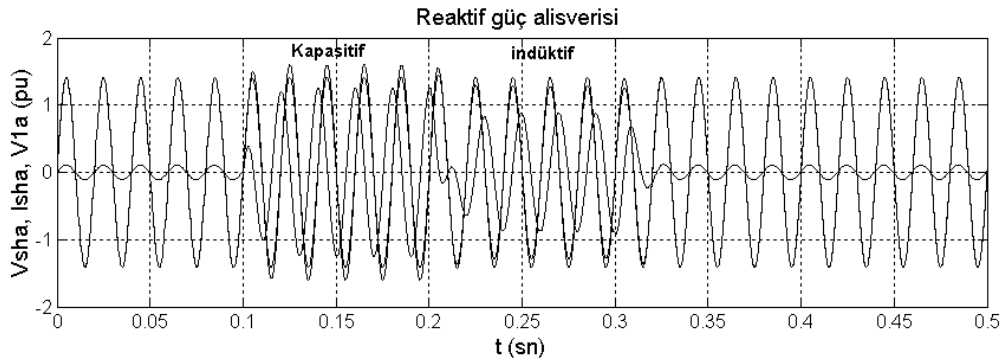
P-jQ kapasitif yükü $t=0.2$ ’de devreye girdiği zaman (Şekil 11) bara 1 gerilimi yükselerek yaklaşık 1.02 pu değerini almaktadır. Yükselen bara 1 gerilimi çok kısa sürede STATCOM bara 1 gerilimi kontrolü ile referans değer olan 1 pu değerine düşürülmektedir. STATCOM $0.2 \leq t \leq 0.3$ aralığında sistemden reaktif güç çekmekte ve endüktif çalışmaktadır. Şekil 12’den görüldüğü gibi STATCOM çıkış gerilim değeri kapasitif yük devreye girdiği zaman ($t=0.2$) azalmaktadır. Bu durum sistemden reaktif güç çekildiği anlamına gelmektedir. Şekil 13’te ise bunlara paralel olarak $0.2 \leq t \leq 0.3$ aralığında, STATCOM reaktif akımının (I_{qsh}) negatif olduğu görülmektedir. P-jQ yükü $t=0.3$ ’te devre dışı kalmaktadır.



Şekil 14. STATCOM reaktif gücünün zamana göre değişimi.

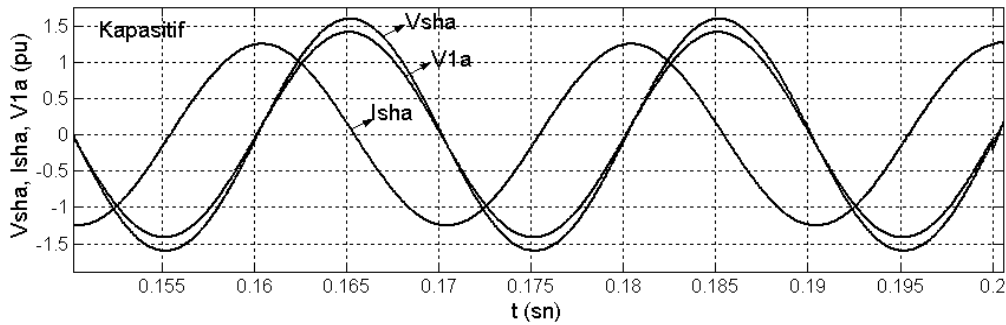


Şekil 15. DC gerilimin zamana göre değişimi.

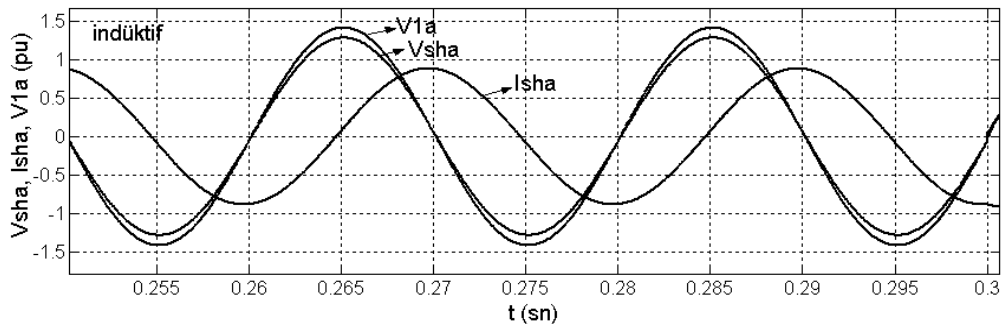


Şekil 16. (a) STATCOM kompanzasyon karakteristiği.

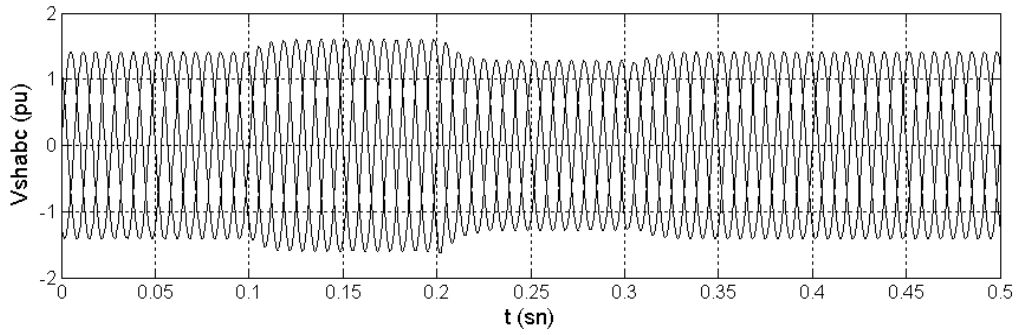
Şekil 14'ten görüldüğü gibi STATCOM $0.1 \leq t \leq 0.2$ aralığında sisteme kapasitif reaktif güç sağlamakta, $0.2 \leq t \leq 0.3$ aralığında ise sistemden indüktif reaktif güç çekmektedir. Şekil 15'te ise STATCOM DC geriliminin değişimi görülmektedir. Yük değişimlerinde DC gerilimde kısa süreli değişimler olsa da gerilimin sabit ve kararlı olduğu görülmektedir. Şekil 16. (a)'da STATCOM kompanzasyon karakteristiği görülmektedir. Endüktif yük devreye girdiği zaman ($t=0.1$) şekil 16. (b)'de görüldüğü gibi STATCOM akımı gerilimden yaklaşık 90° ileride olmakta ve kapasitif çalışma yapılmaktadır. Kapasitif yük devreye girdiği zaman ise ($t=0.2$) şekil 16. (c)'de görüldüğü gibi STATCOM akımı gerilimden yaklaşık 90° geride olmakta ve endüktif çalışma yapılmaktadır. Şekil 17 ve şekil 18'de ise sırasıyla STATCOM çıkış gerilimi ve kaynak gerilimi (V_s) a fazlarının değişimi görülmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürle uyumludur [15,16,17].



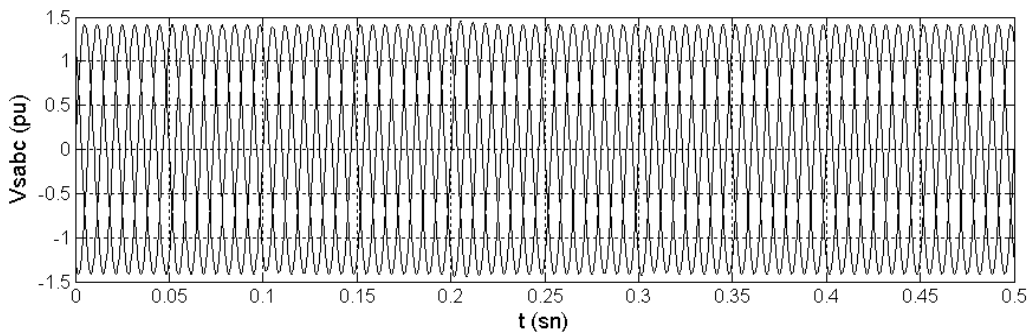
Şekil 16. (b) STATCOM $t=0.15$ 'te genişletilmiş kompanzasyon karakteristiği. (Vsha: STATCOM çıkış gerilimi a fazı, Isha: STATCOM çıkış akımı a fazı, V1a: Bara 1 gerilimi a fazı)



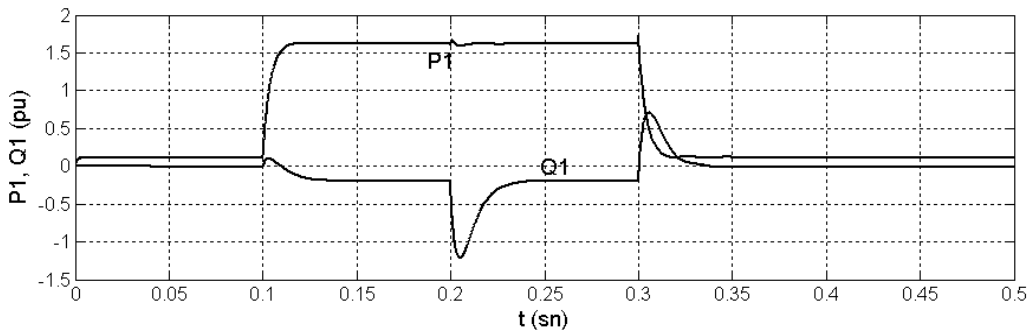
Şekil 16. (c) STATCOM $t=0.25$ 'te genişletilmiş kompanzasyon karakteristiği. (Vsha: STATCOM çıkış gerilimi a fazı, Isha: STATCOM çıkış akımı a fazı, V1a: Bara 1 gerilimi a fazı)



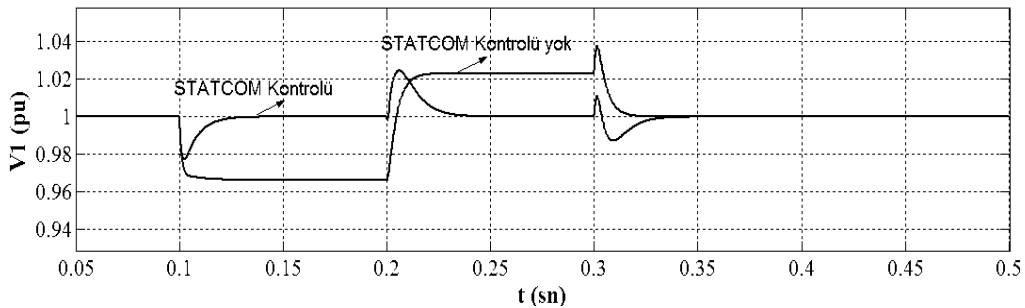
Şekil 17. STATCOM üç faz çıkış geriliminin zamana göre değişimi.



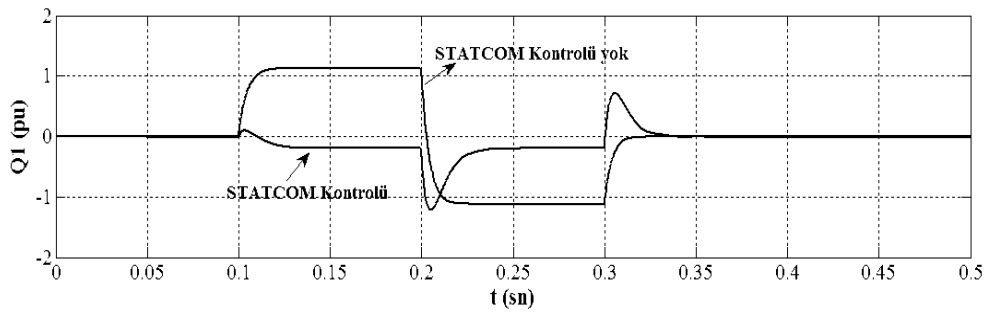
Şekil 18. Kaynak üç faz geriliminin zamana göre değişimi.



Şekil 19. Bara 1 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 20. STATCOM kontrolü ve STATCOM kontrolü olmadan bara 1 geriliminin karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi



Şekil 21. STATCOM kontrolü ve STATCOM kontrolü olmadan bara 1 reaktif güç akışının karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi.

Şekil 20’de karşılaştırmalı olarak kompanzatörün bara 1 geriliminin kontrolüne etkisi görülmektedir. Kompanzatörsüz sisteme göre yük değişimlerinde gerilim istenen referans değerine ulaşmaktadır. Şekil 21’de kompanzatörsüz sisteme göre reaktif güç akışlarının STATCOM ile azaltıldığı görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada bir enerji iletim sistemindeki dağıtım barasında STATCOM ile gerilim kontrolü yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışmasında sisteme endüktif ve kapasitif yükler eklendiğinde STATCOM ile gerekli reaktif güç kompanzasyonunun hızlı bir şekilde sağlandığı görülmüştür. Buna paralel olarak bara gerilimi değerinin ani yük değişimleri ve farklı yük karakterlerine rağmen istenen referans değerini aldığı gözlenmiştir. Kompanzatörün dinamik cevabı hızlıdır. Elde edilen sonuçlar literatürle uyumludur. STATCOM’un geleneksel mekanik anahtarlama cihazlara göre daha hızlı bir kompanzasyon sağladığı açıktır. Reaktif güç akışlarının sistem üzerinde gerilim kararlılığı açısından olumsuz etkiler oluşturduğu görülmüştür. Bu olumsuz etkiler STATCOM ile reaktif güç akışları azaltılarak hızlı bir şekilde giderilebilir. Benzetim sonuçları STATCOM’un iletim sistemi gerilim kararlılığını iyileştirdiğini ve sistemin güvenilirlik ve kapasitesini artırmaya yardımcı olduğunu göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] M.H. Haque, “Best location of SVC to improve first swing stability limit of a power system,” *Electric Power System Research*, vol.77, pp1402-1409, (2007).
- [2] P. Kundur, ‘Power System Stability and Control, McGraw Hill, United States of America, (1994).
- [3] N.G. Hingorani and L. Gyugyi. “Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission systems”, *IEEE Press*. New York, (1999).
- [4] Fangxing (Fran) Li, D. Tom Rizy, Brendan Kirby, John Kueck, Ndeye K. Fall, Reactive Power from Distributed Energy, *The Electricity Journal*, Volume 19, Issue 10, s 27-38. December (2006).
- [5] M. M. Oliveira, Power Electronics for Mitigation of Voltage Sags and Improved Control of AC Power Systems, Stockholm 2000 Doctoral Dissertation Royal Institute of Technology Phd thesis, (2000).
- [6] L.Gyugyi. Fundamentals of Thyristor-Controlled Static Var Compensators in Electric Power System Applications. IEEE Special Symposium on Application of Static var systems for systems dynamic performance, IEEE 87’Mol87-5-PWR, s 8-27 (1987).
- [7] C. Schauder, M. Gemhardt, E. Stacey, T. Lemak, Gyugyi L. Cease T.W., Edris A. Operation of ± 100 Mvar TVA STATCON, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, no. 4, 1805-1811, (1997).

- [8] E. Uzunovic, C. A. Canizares Reeve J.Fundamental Frequency Model of Static Synchronous Compensator, North American Power Symposium (NAPS),Laramie, Wyoming, 49-54, (1997).
- [9] U. Eminoglu, S. Herdem, T.Yalçınöz, invertör temelli facts cihazları kullanarak Reaktif güç kompanzasyonu ile gerilim kontrolü, Elektrik -elektronik -bilgisayar mühendisliği 10. Ulusal kongresi, 152- 155, (2002).
- [10] J. Paserba, J. Reed, G. F.Takeda, M. Aritsuka, T. FACTS and Custom Power Equipment for the Enhancement of Power Transmission System Performance and Power Quality, Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (VII SEPOPE) Curitiba, Brazil, May 21-26, (2000).
- [11] K. R. , Padiyar, A.M. Kulkarni, Control Design and Simulation of Unified Power Flow Controller, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, 1348-1354, (1998).
- [12] Q. Yu, L. Norum, T. Undeland, S. Round, Investigation of Dynamic Controllers for a Unified Power Flow Controller, industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22nd International Conference on Volume 3, 5-10 Aug. (1996).
- [13] C. Schauder,; H.; Mehta, Vector analysis and control of advanced static VAR compensators Generation, , Transmission and Distribution [see also IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution], IEEE Proceedings C Volume 140, Issue 4, 299 – 306, (1993).
- [14] M.M. Ertay, “Enerji iletim sistemlerinin UPFC ile kontrolü”,Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006).
- [15] K. K. Sen, “Statcom - Static synchronous Compensator: Theory, Modeling, and Applications” 99WM706, IEEE Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society for publication in the IEEE Power Engineering Society’s 1999 Winter Meeting Conference Proceedings (1999).
- [16] M. S. El-Moursi, and A. M. Sharaf. Novel Controllers for the 48-Pulse VSC STATCOM and SSSC for Voltage Regulation and Reactive Power Compensation”, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 20, No. 4, November (2005).
- [17] N. Voraphonpiput and S. Chatratana, “STATCOM Analysis and Controller Design for Power System Voltage Regulation”, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China,(2005).