



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Mikro şebekelerde güç kalitesinin iyileştirilmesi için D-STATCOM tasarımı ve analizi

Design and analysis of D-STATCOM for improving power quality in micro grids

Yazar(lar) (Author(s)): Ersan KABALCI¹, Oğuz TAŞDEMİR²

ORCID¹: 0000-0002-7964-9368

ORCID²: 0000-0003-1782-0024

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kabalci E. ve Taşdemir O., “Mikro şebekelerde güç kalitesinin iyileştirilmesi için D-STATCOM tasarımı ve analizi”, *Politeknik Dergisi*, 24(2): 361-372, (2021).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.696779

Mikro Şebekelerde Güç Kalitesinin İyileştirilmesi için D-STATCOM Tasarımı ve Analizi

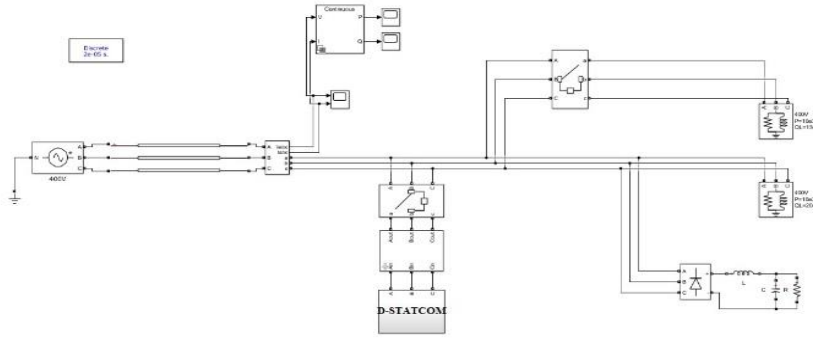
Desing and Analysis of D-STATCOM for Improving Power Quality in Micro Grids

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ D-STATCOM tasarımı ve analizi. / Desing and analysis of D-STATCOM.
- ❖ Güç kalite problemlerinin giderilmesi. / Elimination of power quality problems.
- ❖ UVDGM tekniğinin kullanılması. / Using the SVPWM technique.
- ❖ Esnek alternatif akım iletim sistemleri. / The flexible alternating current transmission system.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Güç kalitesi problemlerinin kaynağında yok edilebilmesi için dağıtım hattıyla reaktif güç alışverişi yapan ve gerilim kaynaklı dönüştürücü temeline dayanan D-STATCOM'un modellenmesi MATLAB Simulink kullanılarak yapılmış ve benzetim sonuçları incelenmiştir.



Şekil. Benzetimi yapılan güç sistemi /Figure. Simulated power system

Amaç (Aim)

D-STATCOM kullanarak dağıtım sistemlerindeki güç kalite problemlerini yok etmek. / Using D-STATCOM to eliminate power quality problems in distribution systems.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

D-STATCOM tasarımında Matlab Simulink programı kullanılmıştır. / Matlab Simulink program was used in D-STATCOM design.

Özgünlük (Originality)

D-STATCOM kontrol tekniği olarak UVDGM tekniği kullanılmıştır. / SVPWM technique was used in the D-STATCOM control technique.

Bulgular (Findings)

D-STATCOM devreyken, gerilim seviyesini 227 V ve THD % 4.04 olarak ölçülmüştür. / When the D-STATCOM is active, the voltage level has been measured as 227V and THD %4.04.

Sonuç (Conclusion)

D-STATCOM dağıtım sistemlerinde güç kalite problemlerini gidermiştir. / D-STATCOM solved power quality problems in distribution systems.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Mikro Şebekelerde Güç Kalitesinin İyileştirilmesi için D-STATCOM Tasarımı ve Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Ersan KABALCI^{1*}, Oğuz TAŞDEMİR²

¹Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Türkiye

²Kaman Meslek Yüksek Okulu, Elektrik-Enerji Programı, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 01.03.2020 ; Kabul/Accepted : 26.03.2020)

ÖZ

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan yüklerin büyük bir kısmı gelişen teknolojiyle birlikte endüktif yüklerden oluşmaktadır. Endüktif yükler, yapıları gereği endüktif reaktif enerji tüketmektedirler. Tüketilen bu reaktif enerji, sistemin kalitesinde ve verimliliğinde düşüşe ve güç faktöründe sorunlara neden olmaktadır. Esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS), güç sisteminin performansını ve kalitesini arttırmada önemli bir rol oynamaktadır. FACTS sistemiyle donatılmış bir güç sisteminin kontrolü daha hızlı ve kolaydır. Dağıtım Statik Senkron Kompansatör (D-STATCOM), güç kalitesini arttırmak için kullanılan en yaygın FACTS cihazıdır. Reaktif güç kontrolü için kullanılan D-STATCOM, dağıtım sistemlerinde güç kalitesini arttırmak amacıyla kullanılan şönt bir cihazdır. D-STATCOM şebeke ile reaktif güç alış verişinde bulunarak gerilim dalgalanmalarını önler. Bu çalışmada, güç kalitesi problemlerinin kaynağında yok edilebilmesi için dağıtım hattıyla reaktif güç alışverişini yapan ve gerilim kaynaklı dönüştürücü temeline dayanan D-STATCOM'un modellenmesi MATLAB Simulink kullanılarak yapılmış ve benzetim sonuçları incelenmiştir. Modellenen sistemde, 4 km uzunluğunda bir dağıtım hattı, hat sonunda kompanzasyon için kullanılan D-STATCOM, 16,40 kVA (10kW+13kVAR) ve 22,36 kVA (10kW+20kVAR) gücünde iki ayrı test yükü kullanılmıştır. Bu yüklerin dağıtım hattında meydana getirdiği güç kalitesi problemleri modellenen D-STATCOM aracılığıyla giderilmeye çalışılmıştır. Yapılan benzetime göre, D-STATCOM şebekeye bağlandığında, sistemdeki gerilim dalgalanmasının ve toplam harmonik distorsiyonunun (THD) büyük oranda azaldığı doğrulanmıştır. Sonuç olarak, D-STATCOM'un şebekedeki değişken yüklerin neden olduğu gerilim artışını veya çökmesini büyük ölçüde giderdiği, güç kaybını azalttığı ve buna bağlı olarak da gerilim kararlılığını arttırdığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dağıtım statik senkron kompansatörü (D-STATCOM), Esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS), Gerilim kaynaklı konvertör (GKK).

Desing and Analysis of D-STATCOM for Improving Power Quality in Micro Grids

ABSTRACT

The current loads in industrial applications are based on inductive loads due to developing technology. The inductive loads consume inductive reactive energy owing to their electrical structures. The consumed reactive energy causes to decrements in power quality and efficiency of the system in addition to power factor deficiencies. The flexible alternating current transmission systems (FACTS) play an important role in improving the performance and quality of the power system. The control of power systems that are equipped with FACTS systems are accomplished more rapidly and easily comparing to regular compensations. The Distribution Static Synchronous Compensator (D-STATCOM) is the most common FACTS device used to increase power quality. D-STATCOM, also used for reactive power control, is a shunt connected device which is used to improve power quality in distribution systems. D-STATCOM exchanges reactive power with mains and prevents voltage fluctuations. In this study, a D-STATCOM that is based on voltage source converter and exchanges reactive power with the distribution line to eliminate power quality problems at the source has been modelled in MATLAB Simulink software and the simulation results were examined. In the modelled system, 4 km distribution line has been modelled with two separate test loads at 16.40kVA (10kW+13kVAR) and 22.36kVA (10kW+20kVAR) rated power, and the D-STATCOM model at the end of the line. The power quality problems caused by these loads on the distribution line were tried to be eliminated through the modelled D-STATCOM. According to the simulation results, it is confirmed that the voltage fluctuation and total harmonic distortion (THD) on the load side are remarkably reduced when the D-STATCOM is connected to the network. As the result, D-STATCOM has been shown to greatly overcome the voltage rise or sags caused by variable loads in the network, to reduce power loss and accordingly improve the voltage stability.

Keywords: The distribution static synchronous compensator (D-STATCOM), The flexible alternating current transmission system (FACTS), Voltage source converter (VSC)

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz enerji iletiminde, yüksek reaktif güç tüketiminden dolayı gerilim dalgalanması ve güç sınırlaması gibi sorunlar sürekli artmaktadır. Reaktif güç

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : kabalci@nevsehir.edu.tr

tüketimi arttıkça, sistemin güç faktörü azalır, güç kalitesi bozulur ve sistemin verimliliği düşer. Artan iletim kayıpları aşırı ısınmaya, gerilim düşmesine ve yüksek işletme maliyetlerine neden olur. Tüm bu sorunları gidermek için, tüketilen reaktif güç kontrol edilmelidir. Özellikle iletim ve dağıtım sistemlerinde, yeni iletim

hatlarının yapımındaki zor koşullar nedeniyle reaktif güç kontrolü daha önemli hale gelmiştir [1]. Endüktif yükler tarafından kullanılan endüktif reaktif güç, güç ve iletim kapasitesini kullanarak gerilimde düşmeye neden olur. Bu ters güç akışını düzenlemek için akımın gerilime göre ileri fazda olduğu ileri yönde reaktif güç üretilir. Böylece akım ve gerilim arasındaki faz farkının kardan kaldırılması amaçlanır.

Güç sistemi kalitesi reaktif güç kompanzasyonu ile korunabilir. Reaktif güç kompanzasyonu, güç iletim sistemlerinin denetlemede önemli bir sorun olmuştur. Alternatif akım güç sistemlerinde, mekanik anahtarlama reaktörü ve kapasitör grupları reaktif gücü kontrol etmek için yıllardır kullanılmaktadır. Ancak, mevcut grupların anlık olaylara karşı yavaş tepki gösterme süreleri ve gerekli düzeltmeyi sağlayamamaları önemli sorunlara neden olmaktadır. İletim ve dağıtım sistemlerinde, sistemin kararlılığını sağlamak için reaktif güç kontrolü çok hızlı gerçekleştirilmelidir. Hızlı tepkileri, küçük boyutları ve düşük kayıpları nedeniyle, dağıtım sistemlerinde güç kalitesini iyileştirmek için evirici tabanlı güç kalitesi şartlandırıcısı önerilmiştir [1]. Gelişen güç elektroniği elamanları sayesinde ortaya çıkan esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) cihazları ile güç sistemleri daha hızlı denetlenmiş, güç sistemi iletim kapasitesi artırılmış, reaktif güç kompanzasyonu ile gerilim ve akım kontrolü yapılmıştır. FACTS cihazları iletim sistemi ile reaktif güç alışverişi yaparak sistemin reaktif güç kompanzasyonunu kontrol eder. FACTS denetleyicileri yapıları gereği bu kontrolü oldukça hızlı bir şekilde yaparlar. Bu denetleyiciler arasında da en gelişmiş statik senkron kompanzator (STATCOM) denetleyicileridir.

Dağıtım statik senkron kompanzatorü (D-STATCOM), dağıtım sistemlerindeki güç kalitesi problemlerini çözmek için kullanılan evirici tabanlı bir cihazdır. D-STATCOM'un avantajı, dağıtım sistemine enjekte edilen akımı etkili bir şekilde ayarlamasıdır. Bunun yanında D-STATCOM birçok uygulamalara da sahiptir. Bunlar güç faktörünün düzeltilmesi, harmonik filtreleme, çökme ya da yükselmeye karşı dağıtım barası geriliminin düzenlenmesi ve reaktif güç kompanzasyonudur. Dağıtım sistemlerinde yapılan kompanzasyonda, sistemde meydana gelen güç kalitesi problemlerine kompanzatorün en fazla birkaç periyot gibi bir sürede çok hızlı cevap vermesi gerekir. Aksi halde dağıtım şebekesinden beslenen hassas yükler zarar görebilirler. Kompanzatorün hızlı cevap vermesi, D-STATCOM'daki eviricinin anahtarlama sırasında yüksek anahtarlama frekansı kullanılan SDGM veya UVDGM gibi tekniklerin kullanılmasıyla sağlanabilir.

Son zamanlarda, güç elektroniğinde yaşanan gelişmelere bağlı olarak yapılan araştırmaların çoğu iletim ve dağıtım hattındaki gerilim dalgalanmalarının önlenmesi, toplam harmonik distorsiyonunun (THD) azaltılması ve güç faktörünün düzeltilmesi üzerine yapılmıştır. Zin ve çalışma arkadaşları, statik gerilim kararlılığı için FACTS karşılaştırarak, statik senkron kompanzatorün (STATCOM'un ve statik var kompanzatorün (SVC)

şebekenin gerilim dengesini ve güç taşıma kapasitesini arttırdığını gözlemlemişlerdir [2]. Pattathurani ve çalışma arkadaşları, D-STATCOM gibi özel güç aygıtları kullanarak gerilim çökme problemlerinin çözümünü göstermişlerdir. D-STATCOM'un uzay modeli, gerilim bozuklarında yük geriliminin ani bir şekilde düzeltilmesi için sorunları önceden tahmin eden bir denetleyici ile birleştirilmiştir. Böylece D-STATCOM'un yük ihtiyacına göre, güç faktörü problemleri, güç faktörü düzeltilmesi, harmonik azaltma, yük dengeleme ve gerilim regülasyonu ayarlamaya olanak sağladığını tespit etmişlerdir [3]. Awasthi ve Huchche, sistemdeki yüklerin çoğu endüktif olduğundan, sistemden daha fazla reaktif güç tüketirler. Sonuç olarak yükün güç faktörü bozulur ve bu durum hattın aktif güç akışını sınırlar. Düşük gerilimle çalışan özel güç cihazı D-STATCOM ile hatta reaktif güç enjekte ederek reaktif gücü telafi etmenin ne kadar faydalı olduğunu göstermişlerdir [4]. Mokhtari ve çalışma arkadaşları, D-STATCOM'un kritik şartlarda ve kısa devre anında, enerji sistemlerinin kararlılığını arttırdığını incelemişlerdir. Bu bağlamda, bulanık mantık denetleyicisi, histerisiz akım kontrolü ve adaptif bulanık kontrolcü gibi diğer gelişmiş kontrol cihazlarının D-STATCOM'un etkinliğini arttırmak için kullanabileceğini göstermişlerdir [5]. Sirjani ve Jordehi, D-STATCOM'un güç sistemlerinde kullanılma hedeflerinin, güç kaybının azaltılması, gerilim kalitesinin ve sistem güvenilirliğinin artırılması olarak belirtmişlerdir [6]. Rohouma ve çalışma arkadaşları, D-STATCOM'un şebekeye bağlandığı noktada güç kalitesini artırdığını ve doğrusal olmayan yüklerin sebebiyet verdiği harmonik bileşenleri azalttığını göstermişlerdir [7].

Bu çalışmada Matlab Simulink programı kullanılarak mikro şebekelerde güç kalitesinin iyileştirilmesi için kullanılmak üzere bir D-STATCOM benzetimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan benzetim çalışmasıyla, doğrusal olmayan ve dengesiz yüklerin neden olduğu reaktif gücün kontrol edilmesi, güç faktörünün düzeltilmesi, THD oranlarının azaltılması ve gerilimde meydana gelen dalgalanmaların azaltılması amaçlanmaktadır. Güç kalitesi ve güç kalitesi problemleri Bölüm 2'de açıklanmıştır. Bölüm 3'te ise D-STATCOM'un yapısı, çalışma durumları, matematiksel modelleri ile birlikte D-STATCOM'un çalışma prensibi, kullanılan modülasyon tekniği (Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu) ve kontrol bloğu anlatılmıştır. Benzetimi yapılan mikro şebekede, farklı yükler altında D-STATCOM'un etkilerini ve performansını incelemek için benzetim sonuçları Bölüm 4'te karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir.

2. GÜÇ KALİTESİ (POWER QUALITY)

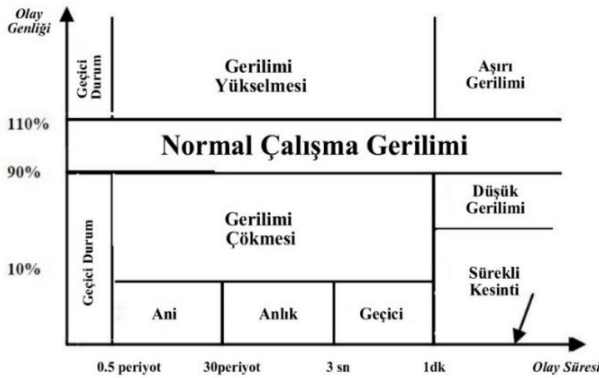
Son yıllarda, hassas yüklerin artması üzerine, elektrik güç kalitesi üzerine yapılan çalışmalar büyük önem kazanmıştır. Önceki yıllarda temel sorun güç sisteminde enerjinin sürekliliği iken günümüzde elektrik kaynaklarının sadece sürekliliği değil aynı zamanda güç kalitesi de çok önemli olmaya başlamıştır. Güç kalitesi, ideal sinüs dalgasının istenen seviyede, sabit genlik ve

sabit frekans değerine sahip olması olarak ifade edilebilir. Ancak sisteme bağlı yüklerin güç kalitesini etkileyen birçok faktöründen dolayı ideal sinüs dalgalarından sapmalar görülmekte ve pratikte ideal sinüs dalgası sürdürülememektedir. Güç kalitesi, sadece dağıtım sistemlerinin problemi gibi görünse de iletim sistemlerinin de güç kalitesi üzerinde etkisi vardır. İletim sistemi, aktif ve reaktif güç akışının denetlenmesiyle ilgilenirken, dağıtım sistemi her bir yüke yaklaşık sinüzoidal bir gerilim sağlamak için güç faktörü, yükteki harmonikler, dengesiz yükler, gerilim düşmesi veya gerilim yükselmesi gibi problemlerle ilgilenir.

Alternatif enerji sistemlerinde, akım ve gerilimin saf sinüs dalga şekline sahip olması, frekansın nominal değerinde sabit kalması (50Hz veya 60Hz) ve yük üzerindeki gerilimin efektif olarak anma değerinde olması ya da kabul edilebilir sınırlar içerisinde olması gibi kriterler istenen kalite şartlarının ifade edilmiş halidir. Enerji kalitesi, bu zorlukların her koşulda aşılması ve ideal ya da ideale yakın kriterlerin sürekli sağlanması ile ilişkilidir. Güç kalitesi problemleri, hassas endüstriyel yüklerin çalışmasını bozacak ve üretim kayıplarına sebep olacak bozulmaları kapsamaktadır. Güç kalitesi problemlerinde farklı sınıflandırmalar mevcut olsa da IEEE 1159:1995 standardı, enerji kalitesi problemlerini aşağıda listelenen 7 başlık altında toplamaktadır [8-9];

- Geçici Olaylar
- Kısa Süreli Gerilim Değişimleri
- Uzun Süreli Değişimler
- Gerilim Dengesizliği
- Güç Frekans Değişimleri
- Dalga Formu Bozukluğu
- Gerilim Dalgalanmaları

Geçici ve sürekli olayların normal çalışma gerilimi ve ideal çalışma koşullarıyla karşılaştırılması, ideal değerler ve izin verilen sınırlar Şekil 1’de görülmektedir. Gelişen teknoloji ile yüklerin çoğunlukla endüktif olması ve yarı iletken güç elamanlarının kullanımının artmasıyla şebekeden farklı fazda ve lineer olmayan akımlar çekilmektedir.



Şekil 1. IEEE Std. 1159-1995'e göre gerilim azaltma standardı (Voltage Reduction Standard of IEEE Std. 1159-1995) [9]

Dolayısıyla sistemde yukarıda anlatılan güç kalitesi problemleri ortaya çıkmaktadır. Bunun aksine güç sisteminde; frekans ve gerilimin sabit olması, harmonik bulunmaması, akım ve gerilimin aynı fazda olması beklenir. Bunun için sistemin güç kalitesinin artırılmasında reaktif gücün kontrolü çok önem arz etmektedir. Bu amaç doğrultusunda gerilim ve yük dengelenmesi için reaktif güç kompanzasyonu yapılır [10]. Güç kalitesi problemlerinin çözümü için devletin yetkili kurumları tarafından birçok standartlar belirlenmiştir. Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) tarafından “ Elektrik İletim Sistemleri Arz Güvenliği ve Kalitesi Yönetmeliği” gereğince iletim hattına doğrudan bağlanan tüketiciler için kurulu güce göre reaktif enerji sınırlamaları Çizelge 1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1. EPDK tarafından yürürlüğe konulan reaktif enerji sınırlamaları (Reactive energy limitations of EPDK)

İşletmenin Kurulu Gücü	Enerji Talebi/Ay		
	Aktif Enerji (%)	Reaktif Enerji (%)	
		Endüktif	Kapasitif
<50kVA	100	≤33	≤20
>50kVA	100	≤20	≤15

Yukarıda bahsedilen güç kalitesi problemlerinin çoğu reaktif gücün uygun bir denetimiyle yani reaktif güç kompanzasyonu ile zayıflatılabilir. İletim ve dağıtım sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu ise gerilim regülasyonu veya yük kompanzasyonu için yapılmaktadır. Yük kompanzasyonunda amaç sistemin güç faktörünü düzeltmek, şebekeden çekilen aktif gücü dengelemek ve büyük güçlü doğrusal olmayan yüklerden dolayı oluşan akım harmoniklerini yok etmektir. Gerilim regülasyonundaki amaç ise, denetlenmek istenilen noktadaki gerilim dalgalanmalarını azaltmaktır. Dolayısıyla güç kalitesini arttırmak ve gerilimi düzenlemek için uygun reaktif güç kompanzasyonuna ihtiyaç vardır. Hızlı bir reaktif güç kontrolü içinde FACTS ve özel güç elektroniği devreleri idealdir. FACTS ve özel güç elektroniği devreleri evirici tabanlı kompanzatorlardır. Günümüzde ise en çok tercih edilen güç elektroniği tabanlı kompanzasyon sistemi olan STATCOM, iletim sistemlerinde kullanıldığında STATCOM ismiyle anılırken, dağıtım sistemlerinde kullanıldığında ise D-STATCOM olarak adlandırılır.

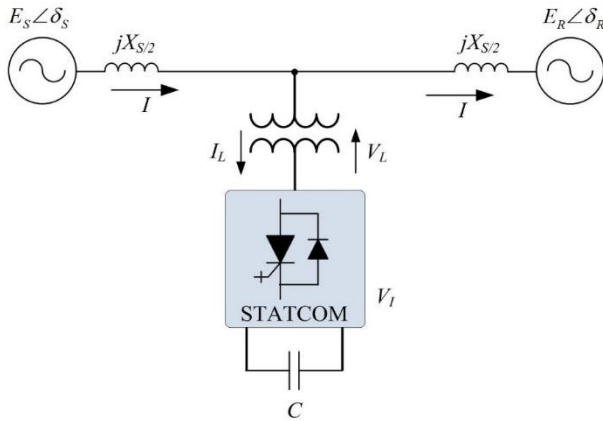
3. D-STATCOM (D-STATCOM)

Evirici tabanlı, güç sistemi ile reaktif güç alışverişinde bulunan ve sisteme paralel bağlanan FACTS cihazları olan STATCOM'lar, enerji depolama cihazlarından direkt olarak reaktif güç üretmek yerine bağlı oldukları şebeke ile güç alışverişini yaparlar. Dolayısıyla kullanılan enerji depolama elamanı, SVC’de kullanılan kondansatör gruplarından daha küçük boyutlu olmaktadır. Dağıtım sistemlerinden beslenen hassas yüklerin zarar görmemesi

için yapılan kompanzasyon sisteminin meydana gelen güç kalite problemlerine hızlı cevap vermesi gerekir. Kompanzasyon sisteminin hızlı cevap vermesi ise D-STATCOM'daki eviricinin anahtarlamasında kullanılan modülasyon teknikleri ile ilgilidir. D-STATCOM çok düşük bir gerilimde dahi istenilen reaktif akımı sağlayabilir. Böylece D-STATCOM aktif güç kayıplarını telafi edebilmek için gerekli aktif enerjiyi şebekeden alabildiği sürece çok düşük gerilim seviyesinde de reaktif güç üretebilir veya tüketebilir.

Temel olarak gerilim kaynaklı konvertör (GKK), DA enerji depolama cihazı ve bağlantı transformatöründen oluşan örnek bir D-STATCOM sistemi Şekil 2'de gösterilmiştir [11]. Bu sistemde bağlantı her ne kadar dağıtım hattının ortasında gösterilmiş olsa da D-STATCOM uygulamalarında bağlantı sistem ihtiyaçlarına göre istenilen herhangi bir noktada gerçekleştirilebilir. Önerilen bu çalışmada, D-STATCOM Şekil 4'te görüldüğü gibi dağıtım barasına bağlanmıştır. GKK, depolanan DA gerilimini üç fazlı AA çıkış gerilimine dönüştürür. Bu gerilimler faz halinde olup, bağlantı transformatörünün reaktansı sırasında AA sistemine bağlanır. D-STATCOM çıkış gerilim fazını ayarlayarak, D-STATCOM ile AA sistem arasında aktif ve reaktif güç değişimlerinin etkin kontrolü sağlar. Bu yapılandırma, cihazın aktif ve reaktif gücü üretmesini ya da tüketmesini sağlar. AA sisteme şönt olarak bağlanan GKK, üç ayrı amaç için kullanılabilen çok işlevli bir topoloji sunmaktadır [12]:

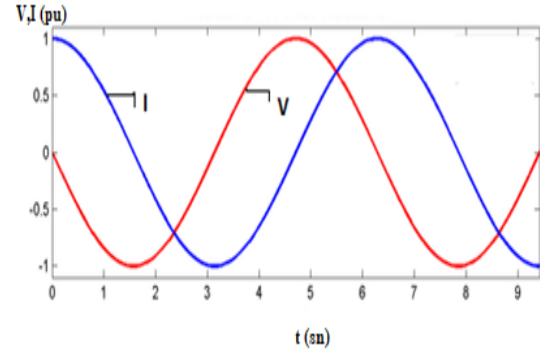
1. Gerilim Regülasyonu
2. Güç Faktörünün Düzeltilmesi
3. Mevcut Harmoniklerin Giderilmesi



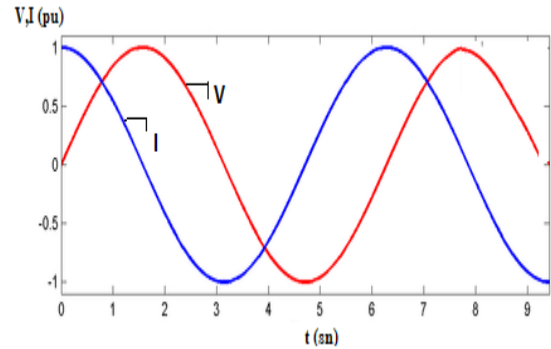
Şekil 2. D-STATCOM blok diyagramı (D-STATCOM block diagram)

Doğru akım enerji depolama aracı genellikle bir kondansatör olduğundan STATCOM iletim hattı ile sadece reaktif güç alışverişi yapar. Doğru akım tarafındaki kondansatör değerinin STATCOM'un maliyeti ve performansı üzerinde önemli etkisi vardır. Bu amaçla kondansatör değerinin uygun seçilmesi STATCOM açısından çok önemlidir [13]. Dönüştürücü için gerekli olan DA gerilim, kondansatör tarafından karşılanır. AA sistem ile dönüştürücü çıkış gerilimi

arasındaki faz farkına göre de kapasitörün şarj veya deşarjı gerçekleşir. Ayrıca D-STATCOM kayıpları AA sistemden çekilen aktif güç aracılığıyla karşılanmaktadır. D-STATCOM, bağlı olduğu bara gerilimini düzeltmek veya iletim hattına reaktif güç sağlamak için iletim hatlarından reaktif güç harcar. D-STATCOM, bu reaktif güç değişimini, gerilim dönüştürücünün çıkış gerilim büyüklüğünü düzenleyerek kontrol eder. AA sistemin gerilim büyüklüğü, D-STATCOM'un çıkış gerilim büyüklüğünden düşük ise D-STATCOM'dan, AA sisteme doğru bir akım akar. Bu durumda D-STATCOM iletim hattı için reaktif güç üretir ve kapasitif modda çalışır. Endüktif çalışma Şekil 3.a'da gösterilirken kapasitif çalışma modu durumunda akım ve gerilim arasındaki faz farkı Şekil 3.b'de gösterilmiştir. Kapasitif çalışmada gösterildiği gibi dönüştürücü çıkış akımı (I), şebeke geriliminden (V) 90° ileri fazdadır. Çalışma esnasında eğer AA sistem gerilimi D-STATCOM'un geriliminden daha yüksek ise AA sistemden D-STATCOM'a doğru bir akım akar. Bu durumda, D-STATCOM iletim hattından reaktif güç harcar ve Şekil 3.a'da gösterildiği gibi endüktif modda çalışır. Endüktif çalışma durumunda I akımı, şebeke geriliminden 90° geri fazdadır. Eğer D-STATCOM çıkış gerilimi ile iletim hattı gerilimi genliği eşit ise D-STATCOM ile AA sistem arasında herhangi bir reaktif güç alışverişi olmaz.



a) Endüktif durum (Inductive condition)



b) Kapasitif durum (Capacitive condition)

Şekil 3. D-STATCOM çalışma durumları (Operating states of D-STATCOM)

Sonuç olarak, endüktif durumda reaktif enerji D-STATCOM'a doğru akar. Bu durumdaki reaktif güç miktarı şebekeyle evirici arasındaki gerilim farkı ile

orantılıdır. Çıkış gerilim genliğinin değişimi, kapasitör gerilim değeri değiştirilerek elde edilir. D-STATCOM, şebeke geriliminden bağımsız olarak kapasitif veya endüktif bir akım sağlayabilir. Böylece, düşük gerilim değerinde bile maksimum kapasitif akım sağlayabilir. Ayrıca, D-STATCOM nominal akımı endüktif ve kapasitif durumlarda geçici olarak arttırabilir [14].

3.1 D-STATCOM'un Çalışma Prensipleri

(Operating Principle of D-STATCOM)

D-STATCOM'un çalışması; bir endüktans aracılığı ile birbirine bağlanan aynı frekanslı iki AA kaynağın çalışma prensibine dayanmaktadır. Bu çalışmada modellenen D-STATCOM, $1,6+j0,791\Omega$ değerinde empedansa sahip 4 km'lik dağıtım hattının sonunda dağıtım barasına eklenmiştir. Bununla ilgili D-STATCOM'un eşdeğer devresi Şekil 4'te verilmiştir. Böyle bir devrede aktif güç, ileri fazdaki kaynaktan geri fazdaki kaynağa doğru akarken reaktif güç de daha büyük genlikli AA kaynaktan daha küçük genlikli AA kaynağa doğru akacaktır. Bir başka ifadeyle iki AA kaynak arasındaki reaktif güç akışı kaynaklar arasındaki gerilim farkı tarafından ve aktif güç akışı kaynaklar arasındaki faz farkı tarafından belirlenir [15].

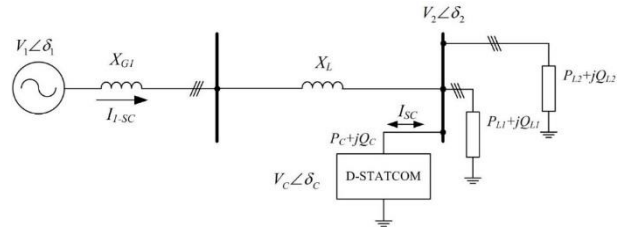
D-STATCOM'un yapısında bulunan dönüştürücü, kondansatörden sağlanan DA geriliminden, şebeke ile aynı frekansta, genliği ve faz açısı kontrol edilebilir üç fazlı AA bir çıkış gerilimi üretir. Üretilen bu gerilimler bir bağlantı transformatör yardımı ile şebekeye bağlanır. Çıkış gerilimi genliği değiştirilerek dönüştürücü ile güç sistemi arasındaki reaktif güç alışverişini kontrol edilir. Şebeke gerilimi ile dönüştürücü çıkış geriliminin genliği arasındaki fark, bağlantı transformatörü yardımı ile sistemler arasındaki reaktif güç alışverişinin miktarını belirler. Dönüştürücünün çıkış gerilimi, şebeke geriliminden ileri fazda olduğunda D-STATCOM'dan şebekeye aktif güç akar. Bunun tersine dönüştürücünün çıkış gerilimi bara geriliminden geri fazda iken, GKK şebekeden aktif güç çeker. Ayrıca, GKK'nin gerilimi değiştirilerek D-STATCOM'un reaktif gücü de değiştirilebilir [13]. DA hat kondansatörü daha fazla şarj edilerek DA hat gerilimi arttırılırsa, D-STATCOM'un kapasitif çalışmada verdiği reaktif güç miktarı artar ve endüktif çalışmada çektiği reaktif güç miktarı azalır. Ancak kondansatörün deşarjı ile DA hat gerilimi azaltılırsa, bu durumda D-STATCOM'un kapasitif çalışmada verdiği reaktif güç miktarı azalacak, endüktif çalışmada çektiği reaktif güç miktarı artacaktır. Bununla birlikte D-STATCOM devresindeki aktif güç kayıplarını karşılamak amacıyla sürekli durumda hem endüktif hem kapasitif çalışmada D-STATCOM çıkış gerilimi AA şebeke geriliminden geri fazda tutulur [16]. Şekil 5'te verilen fazör diyagramlarını kullanarak kaynak gerilimi aşağıdaki gibi yazılır;

$$\vec{V}_S = \vec{V}_C + \vec{V}_R + \vec{V}_X \quad (1)$$

$$\vec{V}_X = jXI \quad (2)$$

$$\vec{V}_R = RI \quad (3)$$

$$V_S - V_C \cos \delta = I \cdot (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (4)$$



Şekil 4. D-STATCOM'un tek faz eşdeğer devresi (Single-phase equivalent circuit of D-STATCOM)

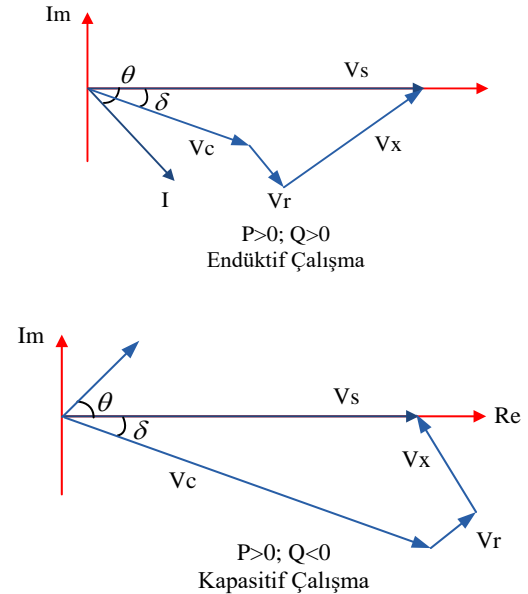
$$V_C \sin \delta = I \cdot (X \cos \theta - R \sin \theta) \quad (5)$$

Burada; V_S şebeke faz nötr gerilimini, I D-STATCOM'un akımını, P D-STATCOM'un aktif gücünü, Q D-STATCOM'un reaktif gücünü, R bağlantı endüktansının ve evirici kayıplarını temsil eden direnci, L bağlantı endüktansının kaçak endüktansını, V_c evirici faz nötr gerilimini, δ ise V_s ile V_c gerilimleri arasındaki faz açısını ifade etmektedir. D-STATCOM'un aktif ve reaktif gücü ise;

$$P = V_S I \cos \theta \quad (6)$$

$$Q = V_S I \sin \theta \quad (7)$$

eşitlikleriyle hesaplanır.



Şekil 5. Sürekli durumda D-STATCOM'un fazör diyagramları (Phasor diagrams of D-STATCOM continuous condition)

Reaktif güç X ve R cinsinden yazıldığında;

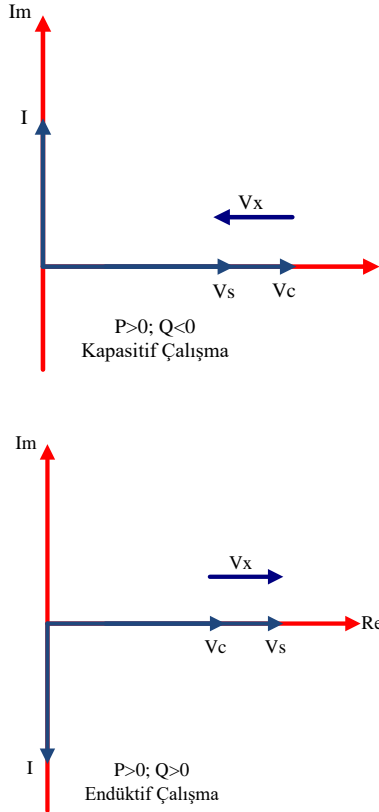
$$Q = V_S \frac{V_S - V_C \cos \delta}{R \cos \theta + X \sin \theta} \sin \theta \quad (8)$$

Bağlantı endüktansına ilave olarak eviricinin de ideal olduğu varsayılırsa, bu durumda V_c ile V_s arasındaki faz farkı $\delta=0$ olacaktır. Bu durumda ise aktif ve reaktif güç aşağıdaki gibi olacaktır.

$$P = 0 \quad (9)$$

$$Q \cong V_s \frac{V_s - V_c}{X} \quad (10)$$

İdeal durumda ($R=0$) fazör diyagramları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. İdeal durum için D-STATCOM'un fazör diyagramları (Phasor diagrams of D-STATCOM for ideal condition)

D-STATCOM'un şebekeye verdiği veya şebekeden çektiği reaktif güç aşağıdaki üç metot ile kontrol edilebilir;

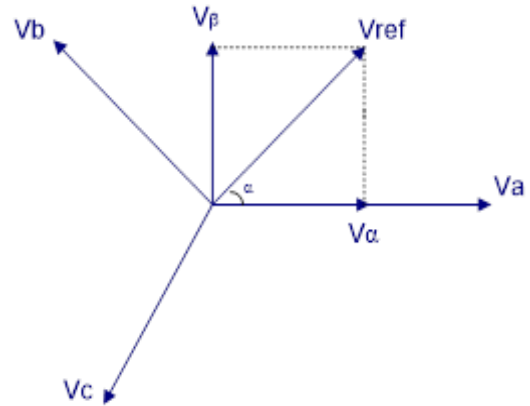
- Modülasyon indeksini değiştirme,
- DA hat gerilimini değiştirme,
- Her ikisini de değiştirme.

D-STATCOM'un temel fonksiyonlarından biri olan reaktif güç kontrolünün dinamik tepki verebilmesi için çok hassas ve verimli çalışan bir kontrolcü tasarlanması gerekir. Bu amaçla dönüştürücü anahtarlar için kullanılan modülasyon tekniği çok önemlidir.

3.2 Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği (Space Vector Pulse Width Modulation Technique)

Alternatif akım makinalarının analizinde kullanılan uzay vektör modülasyonu D-STATCOM için de kullanılmıştır. Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UVDGM) tekniği başlangıçta üç fazlı eviriciler için darbe genişlik modülasyonuna bir vektör yaklaşımı olarak geliştirilmiştir. UVDGM tekniği, iyi harmonik performansı, giriş DA geriliminin maksimum kullanımı ve düşük akım dalgalanması nedeniyle STATCOM kontrolünde modülasyon için uygundur. UVDGM'de, üç fazlı referans gerilimleri, Clarke dönüşümü kullanılarak α ve β uzayında temsil edilir. Bu değerlerin elde edilmesi için 11-13 eşitlikleri kullanılır. Faz açısı ve vektörün boyutu, bu üç fazlı niceliklerin anlık değerleri ile bulunur. UVDGM uygulamalarında gerilim ve akım sentezinde, üç faz sistem iki faz sisteme dönüştürülür.

Eviricinin üretmesi gereken V_a , V_b , V_c referans gerilimler Clarke dönüşümü kullanılarak Şekil 7'de gösterildiği gibi V_α ve V_β bileşenlerine dönüştürülür. Referans gerilim vektörünün genliği ve açısı ise sırasıyla aşağıdaki denklem (14) ve (15) ile hesaplanır.



Şekil 7. Gerilim uzay vektörü ve bileşenleri (Voltage space vector and components)

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$V_\alpha = V_{an} - \frac{1}{2}V_{bn} - \frac{1}{2}V_{cn} \quad (12)$$

$$V_\beta = -\frac{\sqrt{3}}{2}V_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{cn} \quad (13)$$

Referans vektörünün genliği (V_{ref}):

$$|V_{ref}| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (14)$$

Çizelge 3. Sektörler için anahtarlama sırası (Switching sequence for sectors)

Sektör-1	\vec{V}_0	\vec{V}_1	\vec{V}_2	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_2	\vec{V}_1	\vec{V}_0
Sektör-2	\vec{V}_0	\vec{V}_3	\vec{V}_2	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_2	\vec{V}_3	\vec{V}_0
Sektör-3	\vec{V}_0	\vec{V}_3	\vec{V}_4	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_4	\vec{V}_3	\vec{V}_0
Sektör-4	\vec{V}_0	\vec{V}_5	\vec{V}_4	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_4	\vec{V}_5	\vec{V}_0
Sektör-5	\vec{V}_0	\vec{V}_5	\vec{V}_6	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_6	\vec{V}_5	\vec{V}_0
Sektör-6	\vec{V}_0	\vec{V}_1	\vec{V}_6	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_6	\vec{V}_1	\vec{V}_0

Vektörün hangi bölgede olduğunu belirlemek için α açısı ise aşağıda verilen eşitlikte hesaplanır.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V_\alpha}{V_\beta} = \omega t = 2\pi ft \quad (15)$$

Referans gerilim vektörü V_{ref} 'in hangi sektörde yer aldığını tespit etmek için α açısına bakılır. Açılı değeri göre V_{ref} 'in hangi sektörde yer aldığı Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Sektör tespiti (Sector identification)

α Değeri	Sektör
$0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$	1
$60^\circ \leq \alpha < 120^\circ$	2
$120^\circ \leq \alpha < 180^\circ$	3
$180^\circ \leq \alpha < 240^\circ$	4
$240^\circ \leq \alpha < 300^\circ$	5
$300^\circ \leq \alpha < 360^\circ$	6

V_{ref} vektörünün hangi sektörde olduğunu belirledikten sonra her sektör için anahtarlama süreleri olan T_a, T_b, T_0 hesaplanır. Referans vektörü V_{ref} , sabit üç komşu vektör tarafından meydana getirilir. Bu vektörler için anahtarlama süresi, modülasyon şemasının bir anahtarlama periyodu T_s süresince seçilen anahtarların görev periyodu zamanını ifade eder.

Örneğin; V_{ref} vektörü, birinci sektörde olduğunda V_1, V_2, V_0 vektörleri tarafından oluşturulur. Bu durumda;

$$V_{ref} \cdot T_s = V_1 \cdot T_a + V_2 \cdot T_b + V_0 \cdot T_0 \quad (16)$$

$$T_s = T_a + T_b + T_0 \quad (17)$$

T_a, T_b, T_0 sırasıyla V_1, V_2, V_0 vektörleri için anahtarlama süreleridir. Bütün sektörler için T_a, T_b, T_0 genel ifade denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir. (k referans vektörünün bulunduğu sektörü belirtir)

$$T_a = \frac{\sqrt{3}V_{ref}}{V_{da}} T_s \sin \left(k \frac{\pi}{3} - \alpha \right) \quad (18)$$

$$T_b = \frac{\sqrt{3}V_{ref}}{V_{da}} T_s \sin \left(\alpha - \frac{(k-1)\pi}{3} \right) \quad (19)$$

$$T_0 = T_s - T_a - T_b \quad (20)$$

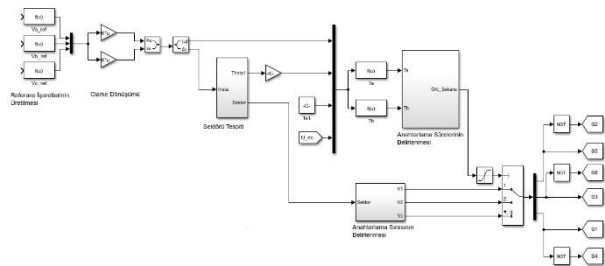
Verilen V_{ref} için anahtarlama işaretleri üretilirken öncelikle uzay vektörlerin uygulama sırasının belirlenmesi gerekir. Sektörler için anahtarlama sırası Çizelge 3'de verilmiştir. Bu uygulama sırası birçok şekilde uygulanabilir ancak minimum anahtarlama frekansının ve optimum harmonik performansın elde edilmesi için iki şart vardır: Bir anahtarlama durumundan diğerine geçiş, aynı evirici bacağındaki biri iletimde diğeri kesimde olan iki anahtar içermelidir ve gerilim vektör uzayında referans vektörün bir sektörden diğerine geçişi en az sayıda anahtarlama içermelidir.

3.3. D-STATCOM Kontrol Bloğu (D-STATCOM Control Block)

D-STATCOM'un ana işlevi, yükün talep ettiği şekilde reaktif güç sağlamaktır. Böylece kaynak tarafından, sadece aktif güç beslendiğinden, kaynak referans akımı dengede tutularak yük dengelenmesi sağlanır. D-STATCOM'un önceki bölümde anlatılan uzay vektör DGM'ye göre geliştirilen simulink kontrol modeli Şekil 8'de verilmiştir. Kontrol sisteminde, üç fazlı referans gerilimleri Clarke dönüşümü kullanılarak α ve β uzayında gerilim uzay vektörü olarak temsil edilir. Vektörün faz açısı ve uzunluğu, bu üç fazlı büyüklüklerin anlık değerleri ile tespit edilir. Referans vektörleri, sıfır vektörlerinin ve referans vektörüne komşu olan iki uzay vektörlerinin ağırlıklı ortalamaları alınarak oluşturulur. V_a, V_b ve V_c sırasıyla a, b ve c fazlarının referans gerilimleri olmak üzere, V_{ref} vektörü aşağıdaki gibi yazılır.

$$\vec{V}_{ref} = V_\alpha + jV_\beta = \frac{2}{3} (V_a + V_b e^{j2\pi/3} + V_c e^{-j2\pi/3}) \quad (21)$$

Vektörün hangi bölgede olduğunu belirlemek için sektör tespiti yapılır. Sonrasında herhangi bir sektör için anahtarlama süreleri ve anahtarlama sıraları belirlenir. Böylece, D-STATCOM'un anahtarlama elamanlarında kullanılacak olan referans akımlar elde edilir.


Şekil 8. D-STATCOM simulink kontrolcü modeli (D-STATCOM simulink controller model)

D-STATCOM'un kontrol bloğu Şekil 9 da verilmiştir. Bu bağlamda, referans kaynak akımlarını üretmek için yükün bağlandığı yük gerilimleri ve yük akımları kullanılır. Öncelikle Clarke dönüşümü kullanılarak üç fazlı referans gerilimleri ve akımları, α - β koordinat sistemlerinde iki faza dönüştürülür. Elde edilen değerler ile anlık gerçek güç ve reaktif güç aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$p = v_{\alpha} i_{\alpha} + v_{\beta} i_{\beta} \quad (22)$$

$$q = -v_{\beta} i_{\alpha} + v_{\alpha} i_{\beta} \quad (23)$$

Yukarıdaki denklemler (22) ve (23) matris gösterimi şeklinde;

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{pmatrix} \quad (24)$$

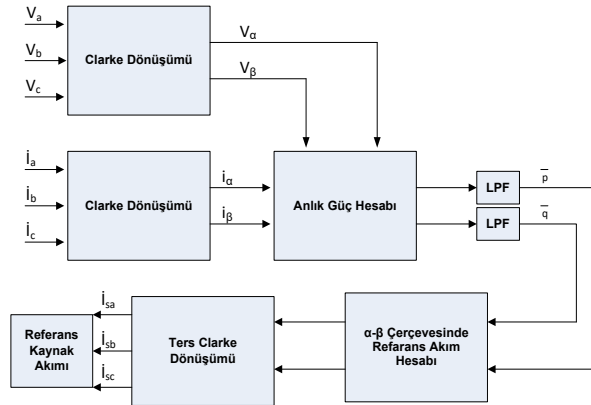
olarak elde edilir ve α - β çerçevesinde referans kaynak akımları hesaplanır.

$$i_{\alpha} = \frac{1}{\Delta} (v_{\alpha} \bar{p} - v_{\beta} \bar{q}) \quad (25)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\Delta} (v_{\alpha} \bar{q} + v_{\beta} \bar{p}) \quad (26)$$

Son olarak, abc çerçevesindeki referans kaynak akımı, Ters Clarke dönüşümü yardımıyla hesaplanır.

$$\begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_0 \\ i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{pmatrix} \quad (27)$$



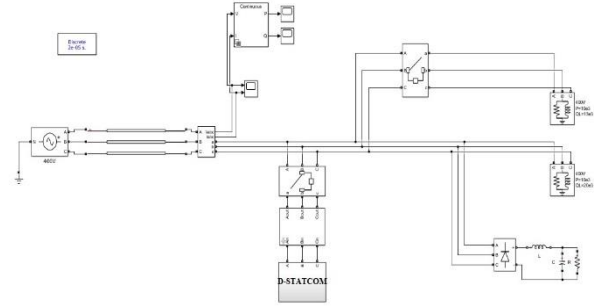
Şekil 9. D-STATCOM kontrol bloğu (D-STATCOM control blog)

Eviricinin anahtarlama durumları ise, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 ve S_6 ikili sayı değerleri ile ifade edilir. Yani anahtar iletime geçirildiğinde $S_k=1$, anahtar kesime geçirildiğinde ise $S_k=0$ olur. S_1 ve S_4 , S_3 ve S_6 , S_5 ve S_2 çiftleri tümleyen çiftlerdir. Dolayısıyla, $S_4=1-S_1$, $S_6=1-S_3$ ve $S_2=1-S_5$ dir. Referans vektörü, sektörleri bir bir geçerken farklı anahtar gurupları Çizelge 3'te sıralandığı gibi anahtarlama durumlarına göre iletime ve kesime geçecektir. Sonuçta, V_{ref} uzayda bir tur döndüğünde evirici çıkış gerilimi zaman üzerinde bir periyodunu tamamlar. Evirici çıkış frekansı, V_{ref} 'in dönme hızına karşılık gelir ve çıkış gerilimi V_{ref} 'in genliği değiştirilerek ayarlanır. Ayrıca anahtarlama frekansını

azaltmak için anahtarlama sırasını düzenlemek çok önemlidir. Yani bir anahtar iletime geçirilirken diğeri kesime geçirilir. Uzak vektör kontrol diyagramında bir sektörden diğerine hareket etmek için geçişte, ya minimum ya da sıfır sayıda anahtarlama sayısına ihtiyaç duyar [17].

4. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Mikro şebekelerde D-STATCOM'un gerilim değişimlerine, güç faktörüne ve THD'ye etkisini incelemek için MATLAB Simulink programı kullanılarak sistemin benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonuçlarında; D-STATCOM'un şebekeye bağlı olduğu ve olmadığı durumlarda, sistem üzerindeki etkisi gözlenmiştir. GKK'nin kontrolünde uzak vektör DGM modülasyon tekniği kullanılmış olup D-STATCOM'un şematik gösterimi Şekil 10'da verilmiştir. Burada yükler ve D-STATCOM 4 km'lik dağıtım hattının sonunda ve aynı dağıtım barasında yer alacak şekilde bağlanmıştır. Şebekedeki gerilim dengesizliğini azaltmak için D-STATCOM şebekeye bir transformatör yardımı ile paralel bağlanmıştır. Kontrol girişi, yük tarafından ölçülen gerilim ile referans gerilim arasında tespit edilen hata sinyalidir.



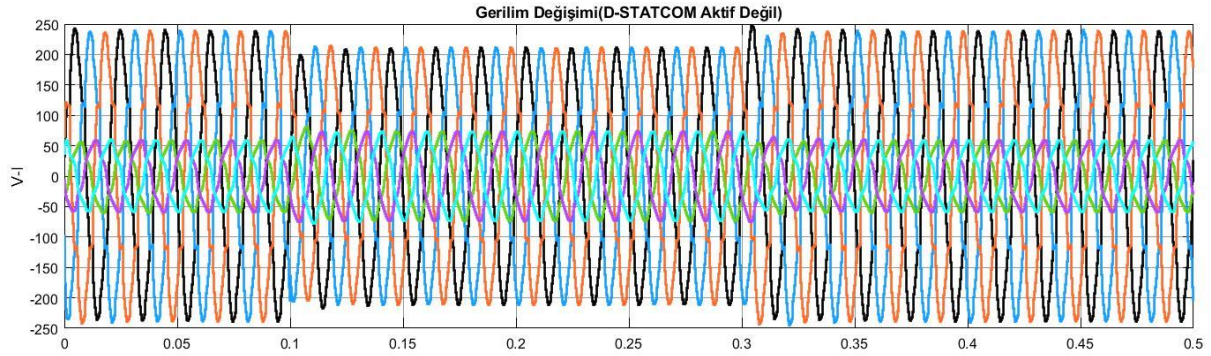
Şekil 10. Benzetimi yapılan güç sistemi (Simulated power system)

PI kontrolü mevcut yük gerilimini referans değerinde tutmak için hata sinyalini işleyerek δ açısını üretir. Üretilen bu açı PWM sinyali generatörüne gönderilir. Bu açıya aynı zamanda modülasyon açısı da denir. PWM gelen sinyali işleyerek, D-STATCOM'un sistem bozulmalarında meydana gelen gerilim genliği değişimlerinden hassas yükleri korumasını sağlar.

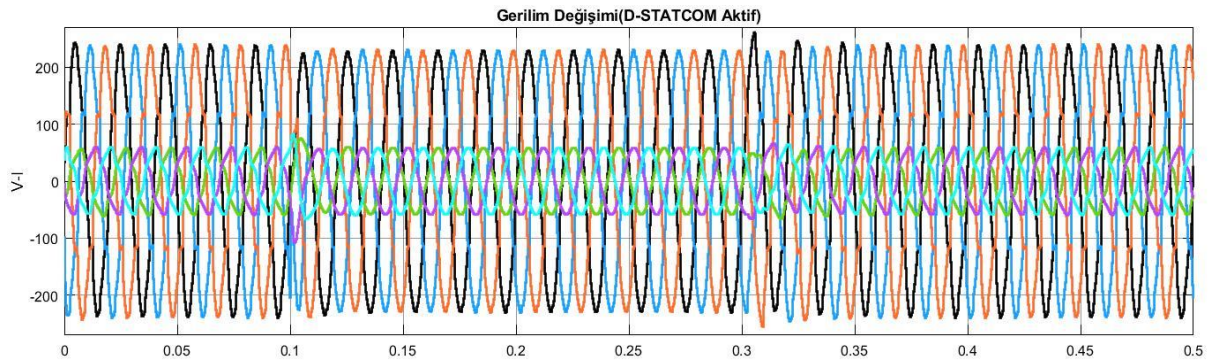
Güç kalitesini arttırmak için kullanılan D-STATCOM'un sisteme belirlenen zaman aralıklarında etkileri incelenmiştir. Sistem 0,5sn boyunca çalışır durumdadır. Çalışma süresi içerisinde D-STATCOM 0,1-0,3sn arasında aktif hale getirilmiştir. Bu durumda, D-STATCOM devrede değil iken, gerilimin stabil olmadığı ancak D-STATCOM devrede iken gerilimin stabil olduğu görülmüştür. D-STATCOM'un devrede olmadığı sistemde meydana gelen gerilim değişimi Şekil 11'de görüldüğü gibi dalgalıdır. Değişken yüklerin veya kısmi arızaların neden olduğu bu durumdan hassas yükler olumsuz etkilenecektir. Hassas elektronik

cihazların gerilim dengesizliğinden etkilenip endüstriyel tesis veya şebekenin zarar görmemesi için gerilimin kontrol altına alınması çok önemlidir. Bunun için tasarlanan D-STATCOM devreye girdiğindeki gerilim değişimi Şekil 12'de gösterilmiştir.

değeri 203 V'a kadar düşmüştür. Şekil 12'de ise, D-STATCOM'un 0,1-0,3 sn aralığında devreye girmesiyle gerilim değerinin 227 V'a kadar yükseldiği görülmektedir. Böylece gerilim değeri istenilen seviyeye getirilmiş ve gerilim kararlılığı arttırılmıştır. Ayrıca, gerilim dengesizliğinin şebekeye olan olumsuz etkileri



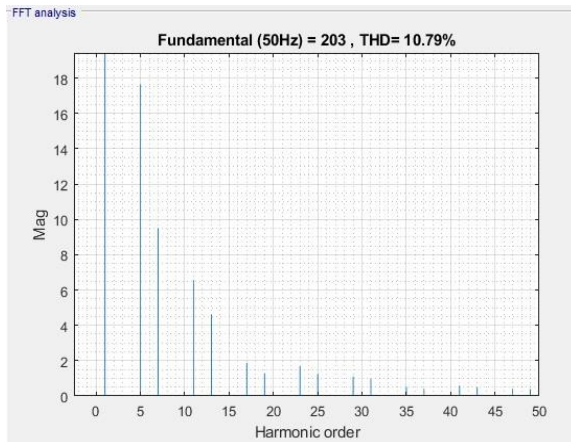
Şekil 11. D-STATCOM aktif değil iken gerilim değişimi (Voltage variation when D-STATCOM is inactive)



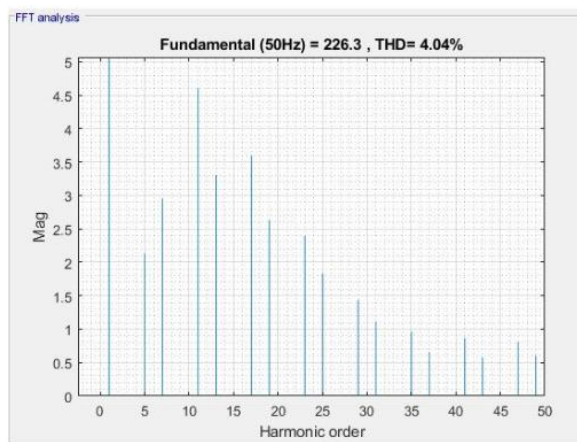
Şekil 12. D-STATCOM aktif iken gerilim değişimi (Voltage variation when D-STATCOM is active)

Değişken bir yükün sonucu olarak, yük kısmındaki gerilim dalgalanması kaçınılmazdır. Ancak, D-STATCOM'un devreye girmesiyle gerilimin kararlı hale geldiği Şekil 12'de görülmüştür. Şekil 11'de, D-STATCOM devrede değil iken ve 0,1-0,3 sn aralarında devreye endüktif bir yükün girmesi sonucunda gerilim

büyük ölçüde azaltılmıştır. D-STATCOM'un benzetim çalışmasında THD oranlarını önemli ölçüde azalttığıda görülmüştür. Şekil 13.a ve Şekil 13.b'de gösterildiği gibi, D-STATCOM'un işletmeye alınmasıyla gerilimde meydana gelen THD oranları % 10,79'dan, % 4,04'e kadar düşmüştür. Ayrıca, akım THD oranları ise Şekil



(a)



(b)

Şekil 13. Gerilimdeki THD değişimi (a) D-STATCOM kontrolü olmadan (b) D-STATCOM kontrolü varken (THD change in voltage (a) Without D-STATCOM control (b) With D-STATCOM control)

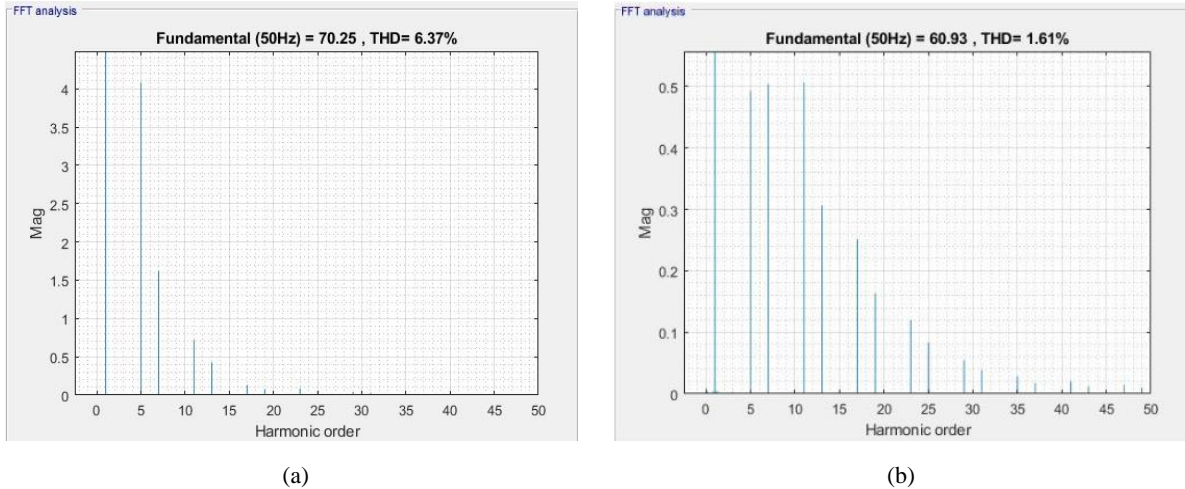
14.a ve Şekil 14.b'de gösterilmiştir. Bu analizlerde, D-STATCOM'un devreye alınmasıyla akımdaki THD oranları % 6,37'den, % 1,61'e kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Gerekli önlemler alınmadığı takdirde harmonikler; nötr iletkeninin aşırı ısınmasına, güç kayıplarının artmasına, rezonans riskinin artmasına, elektrik makinelerinde gürültü ve sıcaklık yükselmesine, kontrol cihazlarının hatalı çalışmalarına neden olacaktır. D-STATCOM'un devreye girmesiyle THD'nin azaldığı, Şekil 13.b ve Şekil 14.b'de gözlemlenmiştir.

THD'nin azaltılmasıyla, elektronik cihazların ömrü uzar, sistem verimliliği artar, elektronik cihaz arızaları azalır ve üretimde maliyet kaybına neden olan plansız duruşların daha az yaşanması sağlanır. P+jQ endüktif yükü t=0,1-0,3 sn'de devreye girdiği zaman, sistemin aktif ve reaktif gücünde yükselme meydana gelmiştir. Sistemde reaktif gücün belli bir oranın üstüne çıkması istenmeyen bir durumdur. Çünkü reaktif güç iletim hattı için ek bir yük oluşturur. Dolayısıyla, reaktif güç, tüm kabloların, transformatörlerin, şalt cihazların kullanımında önemli bir faktördür. Fazla miktarda reaktif güç mevcutsa, sistemin güç faktörünü büyük oranda düşürecek ve işletmenin verimliliği azalacaktır. Bu durum, istenmeyen iletim kayıplarına, yüksek işletme maliyetlerine ve ısınmaya neden olacaktır. Bütün bu

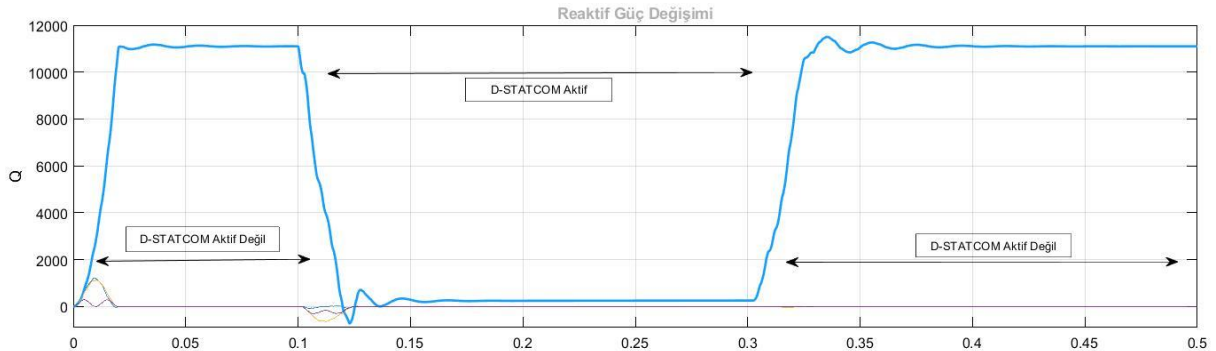
olumsuzluklarının azaltılması amacıyla, D-STATCOM t=0,1-0,3 sn'de devreye girmiştir. D-STATCOM devreye girip sistem için gerekli olan reaktif gücü kendi üzerinden tedarik ederek, iletim sisteminden çekilen reaktif gücü azaltmıştır. Şekil 15'te reaktif güç değişimi gösterilmiştir. Böylece sistemin güç faktörünü yükselterek, istenmeyen olumsuzlukların etkileri de azaltılmıştır. Yükün neden olduğu aktif güç değişimi ise Şekil 16'da verilmiştir. Şekil 16'ya göre, sistemden çekilen aktif güç P+jQ yükünün de devreye girmesiyle yaklaşık 20 kW'tır.

D-STATCOM aktif değilken sistemden çekilen toplam reaktif güç, Şekil 15'te görüldüğü üzere, 11kVAR seviyesinde iken D-STATCOM'un devreye alınmasıyla hemen hemen 0 (sıfır) olmaktadır. Bu durum, yükün talep ettiği ve kullanmadan tekrar sisteme gönderdiği reaktif gücün D-STATCOM tarafından karşılanmasıyla mümkün hale gelmektedir.

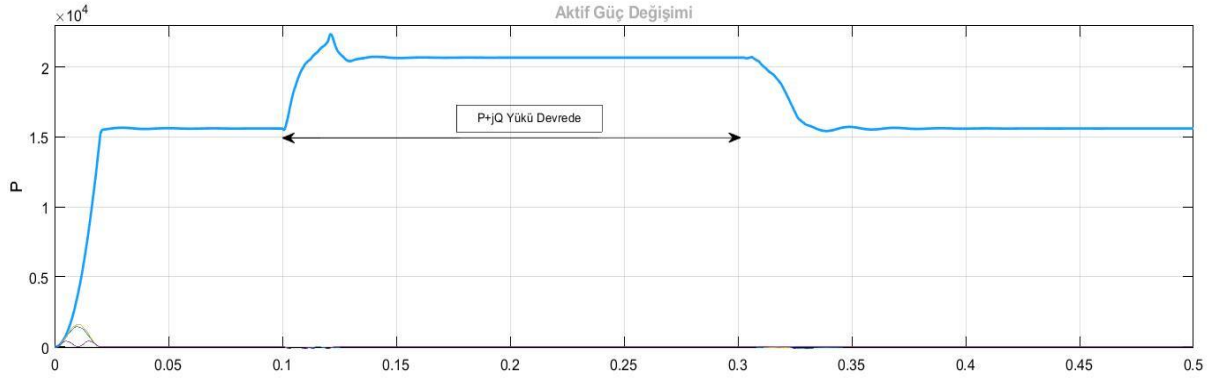
D-STATCOM, gerilim ve akım arasındaki faz açısını düzeltmede de etkin bir role sahiptir. Şekil 17'de D-STATCOM kontrolü ve kontrolü olmadan gerilim ve akım arasındaki faz açısı değişimleri verilmiştir. D-STATCOM t=0,2-0,3 sn'de devreye girdiği anda gerilim ve akım arasındaki faz açısını sıfıra (0) indirdiği görülmüştür. D-STATCOM, gerilim ve akım arasındaki faz farkını bağlı olduğu sistem ile aktif güç alışverişini



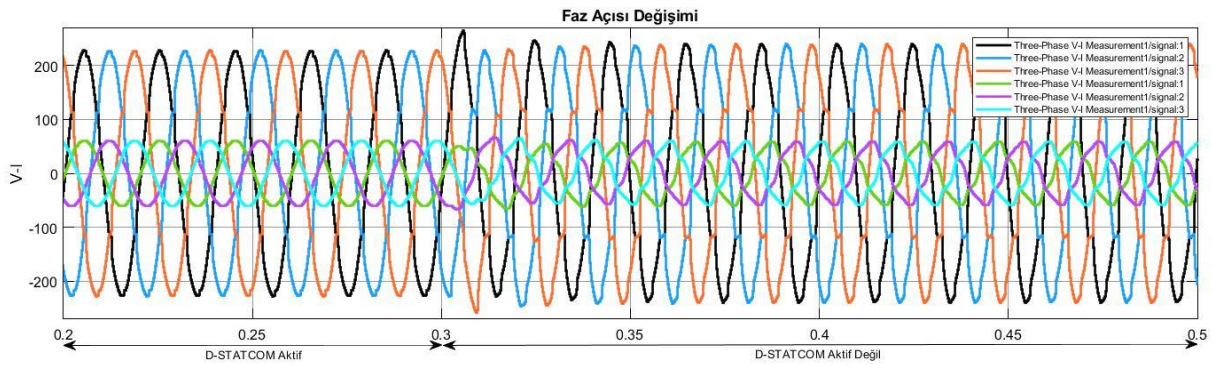
Şekil 14. Akımdaki THD değişimi (a) D-STATCOM kontrolü olmadan (b) D-STATCOM kontrolü varken (THD change in voltage (a) Without D-STATCOM control (b) With D-STATCOM control)



Şekil 15. Reaktif güç akışının değişimi (Variation of reactive power flow)



Şekil 16. Aktif güç akışının değişimi (Variation of active power flow)



Şekil 17. Faz açısı değişimi (Phase angle variation)

yaparak kontrol eder. D-STATCOM'un çıkış gerilimi, bara geriliminden ileri fazda ise D-STATCOM sisteme aktif güç sağlar. D-STATCOM çıkış gerilimi bara geriliminden geri fazda ise D-STATCOM sistemden aktif güç çeker. D-STATCOM çıkış gerilimi ile bara gerilimi aynı fazda olursa D-STATCOM ile sistem arasında aktif güç alışverişi olmaz.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

D-STATCOM, dağıtım sistemlerindeki güç kalite problemlerini çözmek için kullanılan evirici tabanlı bir cihaz olup, esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) denetleyiciler arasında en gelişmişidir. Bunun yanında D-STATCOM çok çeşitli uygulamalara sahiptir. Bunlar; dağıtım bara geriliminin düzenlenmesi, yükün reaktif güç kontrolünün yapılması, güç faktörünün düzeltilmesi ve harmonik içeriklerinin etkisini azaltılmasıdır.

Bu çalışmada, MATLAB-Simulink programı kullanılarak şebekedeki güç kalite problemlerine neden olan parametreleri incelemek üzere D-STATCOM'un benzetimi yapılmıştır. Benzetim çalışmaları, D-STATCOM'un gerilim düzenlemedeki etkisini görebilmek için şebekeye geliştirilen D-STATCOM'un bağlı olduğu ve olmadığı durumlar üzerine analizler yapılmıştır. D-STATCOM devrede olmadığı durumda gerilim seviyesi 203 V, D-STATCOM'un devreye alınması sonucunda ise gerilim seviyesi 227 V olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla benzetim sonuçları, D-STATCOM'un devreye bağlı olduğu durumlarda gerilim

dalgalanmasının büyük oranda azaltıldığını göstermiştir. Ayrıca yapılan benzetim çalışmasında, gerilimdeki THD oranlarının % 10,79'dan, % 4,04'e düştüğü, akımdaki THD oranlarının ise % 6,37'den, % 1,61'e düştüğü, sistemden talep edilen 11kVAR reaktif gücün hemen sıfırlandığı ve gerilim ile akım arasındaki yaklaşık 30°'lik (gerilim akımdan ileri fazda) faz açısının sıfıra düştürüldüğü gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, iletim hattına paralel bağlı olan D-STATCOM'un şebeke ile reaktif güç alışverişi yaparak gerilim bozulmalarını gidermede, toplam harmonik distorsiyonunun azaltılmasında ve güç faktörünün düzeltilmesinde büyük etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Ersan KABALCI: D-STATCOM modellemiş ve sonuçlarını analiz etmiştir. / The D-STATCOM modeled and analysed the results.

Oğuz TAŞDEMİR: D-STATCOM modellemiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. / The D-STATCOM modeled and wrote the manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ertay M.M. ve Aydoğmuş Z., “Statcom ile bir enerji iletim sisteminde gerilim kontrolü”, *Dumlupınar Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü Der.*, 21: 1302-3055, (2010).
- [2] Zin A.A.M., Moradi M., Khairuddin A., Zareen N., Naderipour A.R. and Moradi M., “A comprehensive comparison of facts devices for enhancing static voltage stability”, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11: 21, (2016).
- [3] Pattathurani L., Dwibedi R.K. and Sivachidam B.P., “A voltage controlled dstatcom for power quality improvement”, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 10(6): 27-34, (2015).
- [4] Awasthi V.M. and Huchle V.A., “Reactive power compensation using D-STATCOM”, *2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, India, 583-585, (2016).
- [5] Mokhtari A., Gherbi F.Z., Mokhtar C., Kerrouche K.D.E. and Aimer A.F., “Study analysis and simulation of a static compensator D-STATCOM for distribution systems of electric power”, *Leonardo Journal of Sciences*, 25: 117-130, (2014).
- [6] Sirjani R. and Jordehi A.R., “Optimal placement and sizing of distribution static compensator (D-STATCOM) in electric distribution networks: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77: 688-694, (2017).
- [7] Rohouma W., Balog R.S., Peerzada A.A. and Begovic M.M., “D-STATCOM for harmonic mitigation in low voltage distribution network with high penetration of nonlinear loads”, *Renewable Energy*, 145: 1449-1464, (2019).
- [8] Ghosh A. and Ledwich G., “*Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*”, Kluwer Academic Publishers, USA, (2002).
- [9] IEEE Std 1159-1995, “IEEE recommended practice for monitoring electric power quality”, (1995).
- [10] Çöteli R., “Üç seviyeli H köprü evirici tabanlı d-statkom’un sinirsel bulanık ağ ile denetimi”, *Doktora Tezi*, Fırat Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).
- [11] Kabalci E., “Converter and output filter topologies for statcoms”, *Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems*, Springer, Singapore, (2015).
- [12] Pattathurani L., Dwibedi R.K. and Sivachidam B.P., “A voltage controlled D-STATCOM for power quality improvement”, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 10(6): 27-34, (2015).
- [13] Gencer E., “Orta gerilim şebekelerinde gerilim sarkmalarında D-STATCOM’un etkileri”, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, (2018).
- [14] Mokhtari A., Gherbi F.Z., Mokhtar C., Kerrouche K.D.E. and Aimer A.F., “Study analysis and simulation of a static compensator D-STATCOM for distribution systems of electric power”, *Leonardo Journal of Sciences*, 25: 117-130, (2014).
- [15] Deniz E., Tuncer S. and Gencoglu M.T., “Voltage regulation in a distribution system by using statcom with three level diode clamped inverter”, *5. International Advanced Technologies Symposium*, Karabük, 1-7, (2009).
- [16] Çetin A., “Desing and implementation of a voltage source converter based statcom for reactive power compensation and harmonic filtering”, *Doktora Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).
- [17] Rashid M.H., “*Güç Elektronikleri*”, Nobel Yayınevi, Ankara, (2016).