

**T.C.  
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİKRO ŞEBEKELERDE GÜÇ KALİTESİNİN  
İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN D-STATCOM TASARIMI VE  
ANALİZİ**

**Tezi Hazırlayan  
Oğuz TAŞDEMİR**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Ersan KABALCI**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**Ağustos 2020  
NEVŞEHİR**



**T.C.  
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİKRO ŞEBEKELERDE GÜÇ KALİTESİNİN  
İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN D-STATCOM TASARIMI VE  
ANALİZİ**

**Tezi Hazırlayan  
Oğuz TAŞDEMİR**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Ersan KABALCI**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**Ağustos 2020  
NEVŞEHİR**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tüm bilgilerimi benimle paylaşmaktan kaçınmayan, her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan Sayın Hocam Prof. Dr. Ersan KABALCI'ya,

Maddi ve manevi olarak desteğini esirgemeyen ve hep yanımda olan sevgili aileme, özellikle de ebediyete intikal eden sevgili babam Osman TAŞDEMİR'e,

Teknik ve idari yardımlarından dolayı Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Rektörlüğü'ne, Mühendislik Fakültesi Dekanlığına, Elektrik-Elektronik Bölüm Başkanlığı'na teşekkür ederim.

# MİKRO ŞEBEKELERDE GÜÇ KALİTESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN D-STATCOM TASARIMI VE ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Oğuz TAŞDEMİR

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2020

## ÖZET

Gelişen teknolojiyle birlikte, endüstriyel uygulamalarda kullanılan yüklerin büyük bir kısmı 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 içinde kullanılan D-STATCOM, dağıtım sistemlerinde güç kalitesini arttırmak için kullanılan şönt bağlı bir cihazdır. D-STATCOM şebeke ile reaktif güç alış verişinde bulunarak, gerilim dalgalanmalarını önler. Bu çalışmada şebekelerde güç kalitesini arttırmak için Matlab/Simulink programı kullanılarak D-STATCOM modellenmesi yapılmış ve benzetim sonuçları incelenmiştir. Modellenen sistemde, iki ayrı test yükü kullanılmıştır. Bu yüklerin dağıtım hattında meydana getirdiği güç kalitesi problemleri ise modellenen D-STATCOM aracılığıyla giderilmeye çalışılmıştır. Yapılan benzetime göre, D-STATCOM şebekeye bağlandığında, sistemdeki gerilim dalgalanmasının ve toplam harmonik distorsiyonunun (THD) büyük oranda azaldığı doğrulanmış ve D-STATCOM'un şebekedeki değişken yüklerin neden olduğu gerilim artışı veya çökmesini büyük ölçüde giderdiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** D-STATCOM, Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri, Reaktif Güç.

**Tez Danışman:** Prof. Dr. Ersan KABALCI

**Sayfa Adeti:** 81

**D-STATCOM DESIGN AND ANALYSIS FOR IMPROVING POWER  
QUALITY IN MICRO GRIDS  
(M. Sc. Thesis)**

**Oğuz TAŞDEMİR**

**NEVSEHIR HACI BEKTAS VELI UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**August 2020**

**ABSTRACT**

The current 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 decrease 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 faster and easier 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, D-STATCOM modeling has been performed in order to improve the power quality in grids by using Matlab/Simulink software and the simulation results were examined. Two separate test loads were used in the modeled system. The power quality problems caused by these loads on the distribution line were tried to be eliminated through the modeled 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-SATCOM is connected to the network and D-STATCOM has been seen to greatly improve the voltage rise or sagging caused by variable loads in the network.

***Keywords: D-STATCOM, The Flexible Alternating Current Transmission System, Reactive Power.***

**Thesis Supervisor: Prof. Dr. Ersan KABALCI**

**Page Number: 81**

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI .....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Taraması.....	3
1.2. Tezin Amacı ve Önemi .....	5
1.3. Tezin İçeriği ve Bölümleri.....	6
BÖLÜM 2 .....	8
GÜÇ KALİTESİ.....	8
2.1. Güç Kalitesi Problemleri .....	8
2.1.1. Geçici olaylar .....	10
2.1.2. Kısa süreli gerilim değişimleri .....	10
2.1.3. Uzun süreli değişimler .....	10
2.1.4. Gerilim dengesizliği.....	11
2.1.5. Güç frekans değişimleri .....	11
2.1.6. Dalga şekli bozukluğu.....	11
2.1.7. Gerilim dalgalanmaları .....	12
2.2. Reaktif Güç Kompanzasyonu .....	13
2.2.1. Şönt kompanzasyon .....	16
2.2.2. Seri kompanzasyon .....	18
2.3. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS).....	20

BÖLÜM 3 .....	23
EVİRİCİLER.....	23
3.1. Üç Fazlı Eviriciler.....	24
3.2. Çok Seviyeli Eviriciler .....	26
3.3. Eviricilerde Kullanılan Modülasyon Yöntemleri .....	29
3.3.1. Sinüzoidal DGM yöntemi .....	30
3.3.2. Uzay vektör DGM yöntemi.....	33
BÖLÜM 4 .....	36
DAĞITIM STATİK SENKRON KOMPANSATÖR .....	36
4.1. D-STATCOM'un Çalışma Prensipleri .....	41
4.2. D-STATCOM Tasarım İlkeleri .....	46
4.2.1. DA hat kondansatör büyüklüğünün hesabı .....	46
4.2.2. Bağlantı reaktörü büyüklüğünün hesabı.....	47
4.2.3. Anahtarlama elemanı (IGBT) .....	49
4.2.4. DA hat gerilim değerinin hesabı .....	50
4.3. D-STATCOM Kontrol Teknikleri.....	50
4.3.1. Faz kaydırma kontrolü .....	51
4.3.2. Ayrılmış akım kontrolü (p-q teorisi).....	52
4.3.3. Senkron referans çerçevesi (SRF) yöntemi.....	53
4.3.4. Şebeke ve DA bağlantı geriliminin düzenlenmesi .....	54
BÖLÜM 5 .....	58
D-STATCOM BENZETİM ÇALIŞMASI.....	58
5.1. D-STATCOM'un Kontrol Bloğu .....	59
5.2. D-STATCOM'lu Sistemin Gerilim Analizi .....	65
5.3. D-STATCOM'lu Sistemin Geriliminin ve Akımının Harmonik Analizi.....	67
5.4. D-STATCOM'lu Sistemin Aktif ve Reaktif Güç Analizi .....	69
5.5. D-STATCOM'lu Sistemin Gerilim ve Akım Arasındaki Faz Açısının Analizi .....	71
5.6. D-STATCOM Çıkış Reaktif Güç ve Evirici DA Gerilim Analizi .....	72



BÖLÜM 6 .....	75
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	75
KAYNAKLAR .....	77
ÖZGEÇMİŞ .....	81



## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. IEEE 1159:2019 standartına göre enerji kalitesi problemleri.....	9
Tablo 2.2. EPDK tarafından yürürlüğe konulan reaktif enerji sınırlamaları.....	13
Tablo 3.1. Üç faz eviricinin anahtarlama durumları .....	25
Tablo 3.2. m seviyeli eviricinin topolojilerine göre karşılaştırılması .....	30
Tablo 3.3. Sektör tespiti .....	34
Tablo 3.4. Sektörler için anahtarlama sırası.....	35
Tablo 5.1. Benzetimi yapılan D-STATCOM’da kullanılan parametreler.....	58
Tablo 6.1. D-STATCOM’un sisteme olan etkisi .....	76



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. IEEE Std. 1159-2019'a göre gerilim azaltma standardı .....	10
Şekil 2.2. Güç üçgeni .....	15
Şekil 2.3. Endüktif yük için güç üçgeni .....	15
Şekil 2.4. Kapasitif yük için güç üçgeni .....	16
Şekil 2.5. AA sisteminde şönt kompanzasyonunun temel prensipleri (a) kompanzasyonsuz radyal sistem (b) kompanzasyonsuz sistem fazör diyagramı (c) akım kaynağı ile şönt kompanzasyonlu radyal sistem (d) kompanzasyonlu sistem fazör diyagramı .....	17
Şekil 2.6. AA sisteminde seri kompanzasyonunun temel prensipleri (a) kompanzasyonsuz radyal sistem (b) kompanzasyonsuz sistem fazör diyagramı (c) gerilim kaynağı ile seri kompanzasyonlu radyal sistem (d) kompanzasyonlu sistem fazör diyagramı .....	19
Şekil 2.7. FACTS kullanılan GKK topolojileri (a) iki seviyeli altı darbeli VAR kompansatör (b) üç seviyeli VAR kompansatör .....	21
Şekil 3.1. Üç fazlı evirici .....	24
Şekil 3.2. Üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici .....	27
Şekil 3.3. Üç seviyeli kondansatörlü evirici .....	28
Şekil 3.4. H-köprülü kaskad evirici .....	29
Şekil 3.5. SDGM modülatörünün çıkış işaretleri (a) taşıyıcı ve modüle edici işaretler (b) pozitif anahtarlama DGM işareti (c) negatif anahtarlama DGM işareti .....	32
Şekil 3.6. Gerilim uzay vektörü ve bileşenleri .....	33
Şekil 4.1. D-STATCOM blok diyagramı .....	37
Şekil 4.2. GKK'nin dört bölgedeki çalışması .....	38
Şekil 4.3. D-STATCOM çalışma durumları .....	40
Şekil 4.4. D-STATCOM V-I karakteristiği .....	41
Şekil 4.5. GKK gerçekleşen D-STATCOM yapısı .....	42
Şekil 4.6. D-STATCOM'un tek faz eşdeğer devresi .....	42
Şekil 4.7. Sürekli durumda D-STATCOM'un fazör diyagramları (a) endüktif çalışma (b) kapasitif çalışma .....	44
Şekil 4.8. İdeal durum için D-STATCOM'un fazör diyagramları (a) kapasitif durum (b) endüktif durum .....	45

Şekil 4.9. Şebekeye bağlı eviricilerde kullanılan çıkış filtreleri (a) L filtre (b) LC filtre (c) LCL filtre (d) LLCL filtre .....	48
Şekil 4.10. IGBT'nin (a) sembolü (b) eşdeğer devresi (c) sadeleştirilmiş devresi .....	49
Şekil 4.11. Faz kaydırma kontrolü blok diyagramı.....	51
Şekil 4.12. D-STATCOM'un ayrıştırılmış teori tabanlı kontrol blok şeması.....	53
Şekil 4.13. Senkron referans yöntemi blok şeması .....	54
Şekil 4.14. Şebeke ve DA bağlantı geriliminin düzenlenmesi blok şeması.....	57
Şekil 5.1. Benzetimi yapılan güç sistemi .....	59
Şekil 5.2. D-STATCOM ölçüm ünitesi blok diyagramı .....	60
Şekil 5.3. D-STATCOM kontrol blok diyagramı .....	61
Şekil 5.4. D-STATCOM UVDGM simulink kontrolcü modeli.....	62
Şekil 5.5. D-STATCOM UVDGM sektör tespiti simulink modeli .....	63
Şekil 5.6. D-STATCOM UVDGM anahtarlanma sırası simulink modeli.....	64
Şekil 5.7. D-STATCOM kontrol bloğu .....	65
Şekil 5.8. D-STATCOM devre dışındayken gerilim değişimi.....	66
Şekil 5.9. D-STATCOM aktif iken gerilim değişimi.....	66
Şekil 5.10. Gerilimdeki THD analizi (a) D-STATCOM kontrolü olmadan gerilimdeki THD oranı (b) D-STATCOM kontrolü varken gerilimdeki THD oranı (c) THD analizi anındaki gerilim dalga şekli .....	67
Şekil 5.11. Akımdaki THD analizi (a) D-STATCOM kontrolü olmadan akımdaki THD oranı (b) D-STATCOM kontrolü varken akımdaki THD oranı (c) THD analizi anındaki akım dalga şekli .....	68
Şekil 5.12. Aktif güç akışının değişimi.....	69
Şekil 5.13. Reaktif güç akışının değişimi .....	70
Şekil 5.14. D-STATCOM aktif iken reaktif güç akışının değişimi .....	71
Şekil 5.15. Faz Açısı Değişimi.....	71
Şekil 5.16. D-STATCOM devre dışındayken gerilim değişimi.....	72
Şekil 5.17. D-STATCOM aktif iken gerilim değişimi.....	72
Şekil 5.18. D-STATCOM'un reaktif güç değişimi .....	73
Şekil 5.19. Evirici kondansatör gerilimi $V_{dc}$ değişimi.....	73

## SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ

<b>AA</b>	Alternatif akım
<b>A<sub>ü</sub></b>	Üçgen kontrol dalga şekli genliği
<b>C<sub>DA</sub></b>	Doğru akım hat kondansatör büyüklüğü
<b>DA</b>	Doğru akım
<b>DGM</b>	Darbe genişlik modülasyonu
<b>D-STATCOM</b>	Dağıtım statik senkron kompensatör
<b>EPDK</b>	Enerji Piyasa Düzenleme Kurulu
<b>FACTS</b>	Esnek alternatif akım iletim sistemi
<b>f<sub>m</sub></b>	Modülasyon dalga frekansı
<b>f<sub>t</sub></b>	Üçgen dalga şekli frekansı
<b>IGBT</b>	Yalıtılmış kapılı bipolar transistör
<b>I<sub>L</sub></b>	Maksimum yük akımı
<b>I<sub>sc</sub></b>	Maksimum kısa devre akımı
<b>KGK</b>	Kesintisiz güç kaynağı
<b>m<sub>a</sub></b>	Modülasyon oranı
<b>N<sub>c</sub></b>	Faz başına gerekli olan kondansatör sayısı
<b>P</b>	Aktif güç
<b>PI</b>	Oransal integral
<b>Q</b>	Reaktif güç
<b>R</b>	Direnç
<b>RMS</b>	Etkin değer
<b>S</b>	Görünür güç

<b>SDGM</b>	Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu
<b>STATCOM</b>	Statik senkron kompensatör
<b>SVC</b>	Statik var kompensatör
<b>TCR</b>	Tristör kontrollü reaktör
<b>TCSC</b>	Tristör kontrollü seri kapasitör
<b>THD</b>	Toplam harmonik bozulma
<b>T<sub>s</sub></b>	Anahtarlama periyodu
<b>TSC</b>	Tristör anahtarlama kapasitör
<b>UVDGM</b>	Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu
<b>X</b>	Reaktans
<b>V<sub>DA</sub></b>	Doğru akım hat gerilimi
<b>V<sub>o</sub></b>	Çıkış gerilimi
<b>V<sub>ref</sub></b>	Referans vektör
<b>V<sub>t</sub></b>	Kaynak gerilim büyüklüğü

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Günümüz dünyasının enerji iletiminde, yüksek reaktif güç tüketiminden dolayı gerilim dalgalanması ve güç sınırlaması gibi sorunlar sürekli artmaktadır. Reaktif güç tüketimi arttıkça sistemin güç faktörü azalır, güç kalitesi bozulur ve sistemin verimliliği düşer. Ayrıca artan iletim kayıpları aşırı ısınmaya, gerilim düşmesine ve yüksek işletme maliyetlerine neden olur. Tüm bu sorunları gidermek için tüketilen reaktif güç kontrol edilmelidir. Reaktif güç kontrolü, yeni iletim hatlarının yapımındaki zorluklar nedeniyle özellikle iletim ve dağıtım sistemlerinde daha önemli hale gelmiştir [1]. Dolayısıyla reaktif gücün kontrolü için endüstriyel ve aydınlatma yüklerinin çekmiş olduğu reaktif gücün bu yüklerin buldukları noktadan veya bunlara en yakın yerden beslenmesi gerekir. Yüklerin şebekeden talep ettikleri reaktif gücün yük noktasında veya yüke yakın noktalarda reaktif güç üreten elektriksel elemanlar tarafından karşılanması olayına kompanzasyon denir. Başka bir ifade ile elektrik sisteminde endüktif yüklerin mıknatıslanma etkisi ile elektrik enerjisini yine elektrik enerjisine veya farklı bir enerjiye çeviren cihazların faz akımını geri kaydırmasından dolayı, şebeke üzerinde yaratmış oldukları endüktif reaktif gücü dengeleme ve fazın akımını olması gereken konuma geri getirme işlemine kompanzasyon denir.

Güç sistemlerinde güç kalitesinin sağlanabilmesi için gerilim ve akımın saf sinüs dalga şekline sahip olması, frekansın nominal değerinde (50Hz) sabit olması ve yük üzerindeki gerilim değerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olması gerekir. Güç sistemi kalitesinin korunması reaktif güç kompanzasyonu ile gerçekleştirilebilir. Reaktif güç kompanzasyonu, güç iletim sistemlerinin denetlemede önemli bir sorun olmuştur. Reaktif güç, iletim sistemlerinde kayıpları artırır ve hat sonunda gerilimin genliğinde değişmelere neden olur. Dolayısıyla alternatif akımlı (AA) güç sistemlerinde iletilebilir gücü arttırmak ve kayıpları azaltmak için reaktif güç kompanzasyonu yapmak gerekir. Ayrıca, uzun iletim hatlarında hat endüktansının ve kapasitesinin etkisi, az yüklü durumlarda gerilimin yükselmesine ve çok yüklü durumlarda ise gerilimin düşmesine neden olur. Bu nedenle iletim hattı geriliminin de kontrol edilmesi gerekmektedir. Gerilimin kontrolü hattın belirli noktalarında güç akış kontrolcülerini ile kompanzasyon yapılarak gerçekleştirilir. Bara gerilimi ile baranın reaktif gücü kontrol edilerek kararlılık

sınırları artırılır ve iletim kapasitesinin etkili kullanımı sağlanarak gerilim düşümü azaltılır [2].

Güç sistemlerinde, mekanik anahtarlama reaktörü ve kondansatör grupları reaktif gücü kontrol etmek için yıllardır kullanılmaktadır. Ancak, mevcut grupların anlık olaylara karşı yavaş tepki gösterme süreleri ve gerekli düzeltmeyi sağlayamamaları önemli bir sorun olmuştur. İletim ve dağıtım sistemlerinde, sistemin kararlılığını sağlamak için reaktif güç kontrolü çok hızlı olmalıdır. Dağıtım sistemlerinde güç kalitesini iyileştirmek için hızlı tepkileri, küçük boyutları ve düşük kayıpları nedeniyle evirici tabanlı güç kalitesi şartlandırıcısı kullanılmaktadır [1].

Güç elektroniğindeki teknolojik gelişmeler sayesinde, mekanik anahtarlama reaktörlerine ve kondansatör gruplarına çeşitli alternatifler sunulmaktadır. 1990'lı yılların başından itibaren iletim sistemlerinde kullanılmaya başlanılan ve güç elektroniğinde kullanılan çeşitli anahtarlama elemanlarını içeren kontrol cihazlarına Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) adı verilmektedir. FACTS cihazları yüksek gerilim ve dağıtım sistemlerinde gerilim, faz açısı ve empedans kontrolü yapmaktadırlar. FACTS cihazları sayesinde mevcut sistemin güvenliği, kararlılığı ve kalitesi artırılır. Ayrıca uzun vadede geçici çözüm sağlayacak iletim ve dağıtım yatırımlarına göre daha ekonomik çözümler sunar [3].

1990'lı yılların öncesinde iletim ve dağıtım sistemlerinde reaktör, kondansatör ve tristörler kullanılarak tasarlanan cihazlar sisteme reaktif güç enjekte ederek alternatif sistemde gerilim düzenleme amacıyla kullanılmıştır. Statik VAR Kompanzator (SVC), Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC), Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) ve Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) bu sınıfta yer almaktadır.

Gelişen güç elektroniği elemanları sayesinde ortaya çıkan 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 kompanzatör (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 kontrol etmesidir. Bunun yanında D-STATCOM birçok farklı uygulama alanına da sahiptir. Bunlar güç faktörünün düzeltilmesi, harmonik filtreleme, çökme ya da yükselmeye karşı dağıtım barasının geriliminin düzenlenmesi ve reaktif güç kompanzasyonudur.

Dağıtım sistemlerinde yapılan kompanzasyonda, kompanzatörün sistemde meydana gelen güç kalitesi problemlerine en fazla birkaç periyot gibi bir sürede çok hızlı cevap vermesi gerekir. Aksi halde dağıtım şebekesinden beslenen hassas yükler zarar görebilirler. Kompanzatörün hızlı cevap vermesi, D-STATCOM'daki eviricinin anahtarlanmasında yüksek anahtarlama frekansında kullanılan sinüoidal darbe genişlik modülasyonu (SDGM) veya uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UVDGM) gibi tekniklerin kullanılmasıyla sağlanabilir.

### **1.1. Literatür Taraması**

Son zamanlarda, güç elektroniğinde gelişmelere bağlı olarak elektrik iletim ve dağıtım ile ilgili yapılan araştırmaların çoğu iletim ve dağıtım hattındaki gerilim dalgalanmalarının önlenmesi, toplam harmonik distorsiyonunun (THD) azaltılması ve güç faktörünün düzeltilmesi üzerine yapılmıştır. Güç elektroniği teknolojisindeki bu gelişmeler, elektrik güç şebekelerini her yönüyle etkilemiş ve FACTS cihazları iletim sistemlerinde kullanım alanı bulmuşlardır. Dağıtım sistemlerinde ise evirici tabanlı Özel Güç Cihazları (Custom Power Device) kullanılmaya başlanmıştır.

Zin vd. tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada, statik gerilim kararlılığı için FACTS cihazları karşılaştırılarak, STATCOM ve SVC'nin şebekenin gerilim dengesini, güç taşıma kapasitesini arttırdığı gösterilmiştir [4]. Buna paralel olarak dağıtım noktalarında ise gerilimin dengesini ve güç kalitesini arttırmak için özel bir güç cihazı olan D-STATCOM kullanım alanı bulmuştur. Pattathurani vd. tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada, D-STATCOM gibi özel güç aygıtları kullanılarak gerilim çökme problemlerinin çözümü gösterilmiştir. Gerilim bozukluklarında yük geriliminin ani bir şekilde düzeltilmesi için D-STATCOM 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 sağladığı ortaya koyulmuştur [5]. İletim ve dağıtım sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu, gerilim regülasyonu ya da yük kompanzasyonu için yapılmaktadır. Yük kompanzasyonu ile güç faktörü düzeltilir ve şebekeden çekilen aktif güç dengelenir.

Awasthi ve Huchche tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada, sistemdeki doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu güç kalitesi problemlerin çözümü için düşük gerilimle çalışan özel güç cihazı D-STATCOM ile hatta reaktif güç enjekte ederek reaktif gücü telafi etmenin ne kadar faydalı olduğu belirtilmiştir [6]. Mokhtari vd. tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada, D-STATCOM'un kritik şartlarda ve kısa devre anında, enerji sistemlerinin kararlılığını arttırdığı belirtilmiştir. Bu bağlamda, bulanık mantık denetleyicisi, akım kontrolü ve adaptif bulanık kontrolcü gibi diğer gelişmiş kontrol cihazlarının D-STATCOM'un etkinliğini arttırmak için kullanabileceği gösterilmiştir [7]. D-STATCOM bağlı bulunduğu noktada gerilim regülasyonu ile gerilim dalgalanmasını azalttığı gibi doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu akım harmoniklerini de yok eder.

Sirjani ve Jordehi tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada, D-STATCOM'un güç sistemlerinde kullanılma hedeflerinin, güç kaybının azaltılması, gerilim kalitesinin ve sistem güvenilirliğinin artırılması olarak belirtilmiştir [8]. Rohouma vd. tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, D-STATCOM'un şebekeye bağlandığı noktada güç kalitesini artırdığını ve doğrusal olmayan yüklerin sebebiyet verdiği harmonik bileşenleri azalttığı belirtilmiştir [9]. Gencer tarafından 2018 yılında yapılan yüksek lisans tezi çalışmasında, D-STATCOM'un orta gerilim şebekesinde güç kalitesi problemlerinden, gerilim çökmesi veya yükselmesinin azalmasında büyük rol oynadığı ortaya koyulmuştur [10]. D-STATCOM'un etkinliği bünyesinde bulunan evirici için anahtarlama sinyalleri üreten kontrol algoritmasına bağlıdır. D-STATCOM'un kontrol algoritması için bir çok farklı matematiksel modellere dayalı kontrol algoritmaları önerilmiştir. Kontrol algoritmalarında kullanılan denetleyicilerinde D-STATCOM'un performansı üzerinde büyük bir önemi vardır.

Çakmak tarafından 2018 yılında yapılan yüksek lisans tezi çalışmasında, şebekeye paralel olarak bağlanan D-STATCOM'un hem PI hem de PR yöntemi ile sistemde arızaya veya herhangi bir sebepten oluşan kısa süreli gerilim çökmelerine çok kısa sürede tepki verdiğini ve bara gerilimini anma değerlerine yakın değerlere çıktığı gösterilmiştir [11].

1990'ların başından itibaren gelişen yarı iletken teknolojisi ile birlikte DGM teknikleri ve çok seviyeli eviriciler birçok güç elektroniği uygulamalarında olduğu gibi STATCOM ve D-STATCOM uygulamalarında da kullanılmaya başlanmıştır. Ahemad ve Naimuddin tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada, gerilim düşümü gibi güç kalitesi problemleri için D-STATCOM modeli ortaya koyulmuştur. Hata sinyallerini kapalı döngü tekniği kullanarak kontrol edilmiştir ve sadece gerilim ölçümü gerektiren DGM tekniği D-STATCOM'da kullanılmıştır [12].

Gupta ve Kumar tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada, her bir fazın kritik reaktif yüklenme kapasitesini geliştirmek ve dengesiz dağıtım sistemleri için D-STATCOM tasarlanmıştır. Tüm yükleme koşullarında D-STATCOM ile birlikte her fazın reaktif yükleme kapasitesinin arttığını ve dağıtım sistemlerinin gerek duyduğu reaktif gücün D-STATCOM tarafından karşılandığı gözlemlenmiştir [13]. Evirici çıkışında daha düşük THD'li ve daha yüksek gerilim elde edilmesini sağlayan UVDGM tekniği D-STATCOM uygulamalarında son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemde kompanze akımları doğrusal olmayan yükün ani aktif ve reaktif akımı bileşenleri ile elde edilir.

Fazeli vd. tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada, 3 fazlı 4 hatlı gerilim kaynaklı dönüştürücülerin, ayrıştırılmış P-Q kontrolüne dayanan yöntem ortaya koyulmuştur. D-STATCOM'un bireysel faz kontrolü ile dengesiz 3 faz yüklerinin neden olduğu gerilim dalgalanmalarını düzelttiğini ve ortak bağlantı noktasındaki AA gerilimlerinin açılarını dengelediği gösterilmiştir [14]. Yükteki herhangi bir değişiklik doğrudan DA bara gerilimini etkilediğini ve yükün ani çıkışı, referans değerinin üzerinde DA bara geriliminin artmasına neden olacaktır. Yükteki ani bir artış ise referans değerinin altında DA bara gerilimini azaltacaktır. D-STATCOM'un doğru çalışması belirli sınırlar içinde DA bara geriliminin değişimini gerektirir.

Khoshooei vd. tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, şebekeye bağlı çalışan D-STATCOM'un güvenli çalışması için pik akımlarının ve DA gerilim salınımlarının belirli oranlarda sınırlanması gerektiği ortaya koyulmuştur. DA gerilim salınımlarına neden olan aktif güç dalgalanmalarını düzenlemek için de analitik ifadeler kullanılmıştır [15].

## **1.2. Tezin Amacı ve Önemi**

STATCOM sistemlerinin geleneksel kompanzasyon sistemlerine göre en büyük avantajları, çok hızlı tepki göstermeleri ve her fazı ayrı ayrı kontrol etmeleridir.

STATCOM sistemlerinin diğeri bir üstünlüğü ise değışik gerilim aralıklarında maksimum reaktif güç üretiminin hemen hemen sabit kalmasıdır. Dolayısıyla, STATCOM sistemleri dağıtım ve iletim sistemlerinin güç kalitesi problemlerinin çözümünde kullanılabilecek en etkili yöntem olarak gözükmektedir. STATCOM sistemleri iletim hatlarında daha çok gerilim düzenlenmesi ve sistem kararlılık parametrelerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Dağıtım sistemlerinde ise reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, D-STATCOM'un endüktif yükler ve şebeke kaynağı arasındaki bara bağlantı noktasına paralel bağlanarak gerilimde meydana gelen gerilim düşümlerinin düzeltilmesi, reaktif güç kompanzasyonu yaparak güç faktörünün düzeltilmesi, mevcut harmoniklerin yok edilerek akımdaki ve gerilimdeki THD'nin azaltılması ve gerilim ile akım arasındaki faz açısının minimuma indirgenmesi için kullanılması hedeflenmiştir. Alçak gerilimde (400V kullanılarak) devreye alınan endüktif yükün sebep olduğu gerilim çukurları ve diğeri güç kalitesi problemleri için D-STATCOM'un sisteme olan katkısını incelemek üzere benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmasında modülasyon tekniğı olarak, D-STATCOM'un reaktif akım verebilme kapasitesini arttırmak ya da aynı reaktif akım değeri için DA hat kondansatörünün gerilim, boyut ve maliyetini düşürmek için UVDGM tekniğı kullanılmıştır. Benzetim çalışması ise Matlab/Simulink (R2018a) programı kullanılarak yapılmıştır.

### 1.3. Tezin İçeriğı ve Bölümleri

Bu tez çalışması, giriş bölümünün yanı sıra altı bölümden oluşmaktadır. Tezin giriş bölümünün dışındaki ana başlıklarının içeriğı aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

- **Bölüm 2:** Bu bölümde, güç kalitesi ile ilgili problemler ele alınmış ve güç kalitesi problemlerin çözümü için reaktif güç kompanzasyonu ve FACTS incelenmiştir.
- **Bölüm 3:** Eviriciler, evirici çeşitleri ve eviricilerde kullanılan modülasyon yöntemleri ile ilgili detaylı bilgilere bu bölümde yer verilmiştir.
- **Bölüm 4:** Bu bölümde, D-STATCOM'un yapısı ve çalışma prensipleri detaylı olarak incelenmiştir. Buna bağlı olarakta, benzetimi yapılacak olan D-STATCOM'un tasarım ilkelerine ve kontrol tekniklerine yer verilmiştir.

- **Bölüm 5:** Bu bölümde, D-STATCOM'un benzetim çalışması anlatılmaktadır. Benzetimi yapılan D-STATCOM'un kontrol bloğu ve sisteme olan etkileri bu bölümde incelenmiştir. Ayrıca D-STATCOM'un gerilim düzenlenmesine, akım ve gerilimdeki THD oranına, reaktif güç kompanzasyonuna ve gerilim ile akım arasındaki faz açısına olan etkileri ayrı ayrı analiz edilmiş olup grafikler halinde verilmiştir.
- **Bölüm 6:** Tasarlanan D-STATCOM sisteminin şebekeye olan etkilerinin sonuçları değerlendirilmiştir.



## BÖLÜM 2

### GÜÇ KALİTESİ

Son yıllarda, hassas yüklerin artması üzerine, elektrik güç kalitesi üzerine yapılan çalışmalarda hız 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 olmasıdır. Ancak sisteme bağlı yüklerin güç kalitesini etkileyen birçok problemler neticesinde ideal sinüs dalgalarından sapmalarından dolayı pratikte ideal sinüs olması gereken dalga şekli korunamamaktadır. Güç kalitesi, sadece dağıtım sistemlerinin problemi gibi görünse de iletim sistemlerinin de güç kalitesi üzerinde etkisi vardır. Bununla birlikte, iletim ve dağıtım sistemlerinin kalite problemleri farklı konuları içerir. İletim sistemi, aktif ve reaktif güç akışının denetlenmesiyle ilgilenir. Dağıtım sistemi ise, her bir yüke yaklaşık sinüzoidal bir gerilim sağlamak için güç faktörü, yükteki harmonikler, dengesiz yükler, gerilim düşmesi veya gerilim yükselmesi gibi problemlerle ilgilenir [16].

#### 2.1. Güç Kalitesi Problemleri

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 kriterlerin her koşulda sağlanması ile orantılıdır. Güç kalitesi problemleri, hassas endüstriyel yüklerin çalışmasını bozacak ve üretim kayıplarına sebep olacak bozulmaları kapsamaktadır. Güç kalitesi problemlerinde farklı sınıflandırmalar mevcut olsa da IEEE 1159:2019 standardı, enerji kalitesi problemlerini 7 başlık altında toplamaktadır [17].

- Geçici Olaylar
- Kısa Süreli Gerilim Değişimleri
- Uzun Süreli Değişimler
- Gerilim Dengesizliği
- Güç Frekans Değişimleri

- Dalga Formu Bozukluğu
- Gerilim Dalgalanmaları

Tablo 2.1’de IEEE 1159:2019 standartına göre enerji kalitesi problemleri, süreleri ve büyüklükleri gösterilmiştir.

Tablo 2.1. IEEE 1159:2019 standartına göre enerji kalitesi problemleri

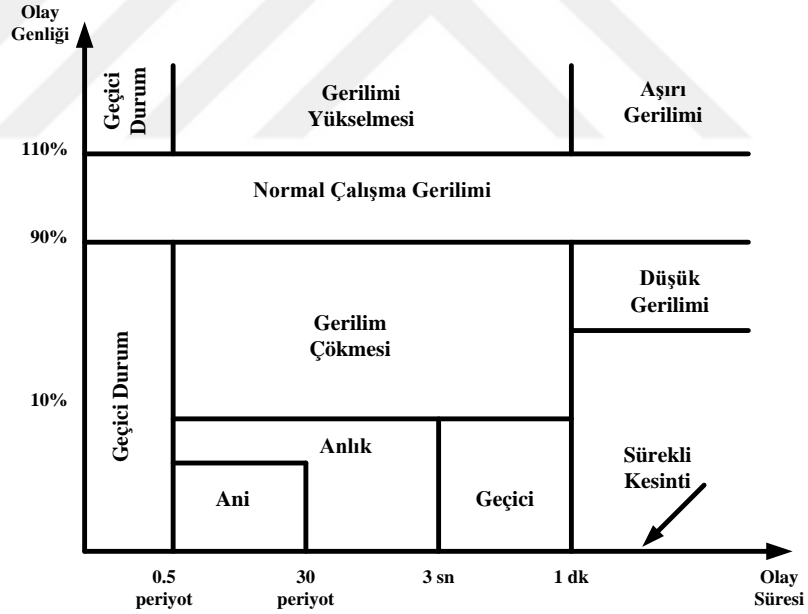
Kategori		Tipik Spektral İçerik	Tipik Süre	Tipik Genlik		
Geçici Olaylar	Darbeli	Nanosaniye	5 ns artış	<50 ns		
		Mikrosaniye	1 µs artış	50 ns - 1 ms		
		Milisaniye	0.1 ms artış	>1 ms		
	Salınımlı	Düşük Frekans	<5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu	
		Orta Frekans	5-500 kHz	20 µs	0-8 pu	
		Yüksek Frekans	0.5-5 MHz	5 µs	0-4 pu	
Kısa Süreli Değişimler	Ani Değişimler	Çökme		0.5 – 30 periyot	0.1-0.9 pu	
		Yükselme		0.5 - 30 periyot	1.1-1.8 pu	
	Geçici Değişimler	Kesinti		0.5 periyot - 3 s	< 0.1 pu	
		Çökme		30 periyot - 3 s	0.1-0.9 pu	
		Yükselme		30 periyot - 3 s	1.1-1.4 pu	
		Gerilim Dengesizliği		30 periyot - 3 s	2-15 %	
		Uzun Geçici Değişimler	Kesinti		>3 s - 1 dak.	< 0,1 pu
			Çökme		>3 s - 1 dak.	0.1-0.9 pu
	Yükselme			>3 s - 1 dak.	1.1-1.2 pu	
	Gerilim Dengesizliği			>3 s - 1 dak.	2-15 %	
	Uzun Süreli Değişimler	Kesinti		> 1 dak.	0.0 pu	
		Gerilim Düşmesi		> 1 dak.	0.8-0.9 pu	
Gerilim Yükselmesi			> 1 dak.	1.1-1.2 pu		
Aşırı Akım			> 1 dak.			
Gerilim Dengesizliği Akım Dengesizliği			Kararlı Durum	0.5-5 %		
			Kararlı Durum	1.0-3.0 %		
Dalga Formu Bozukluğu		DC Ofset		Kararlı Durum	0-0.1 %	
		Harmonik	0-9 kHz	Kararlı Durum	0-20 %	
		Gizli Harmonikler	0-9 kHz	Kararlı Durum	0-2 %	
		Çentikler		Kararlı Durum		
		Gürültü	Geniş bant	Kararlı Durum	0-1 %	
Gerilim Dalgalanmaları		< 25 Hz	Aralıklı	0.1-7 %		
Frekans Değişimleri			< 10 s	± 0.10 Hz		

### 2.1.1. Geçici olaylar

Herhangi bir sistem değişkeninde bir sürekli durum çalışmasından diğer bir sürekli durum çalışmasına geçiş sırasında görülen değişimler olarak tanımlanır. Bu değişimler darbeli ve salınımlı geçici durumlar olmak üzere ikiye ayrılır. Yıldırımların güç sistemine etkisi darbeli geçici duruma, transformatörlerin ve kondansatörlerin enerjilenmesi ise salınımlı geçici durumlara neden olur.

### 2.1.2. Kısa süreli gerilim değişimleri

Yarım periyottan uzun ve bir dakikayı aşmayan süreler için kaynak geriliminde meydana gelen değişimler kısa süreli olarak tanımlanır. Bu değişimler, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi ani, anlık ve geçici olarak tanımlanan gerilim çökmesi, gerilim yükselmesi ve anlık gerilim kesintisi olarak sınıflandırılır [18]. Gerilim çökmesi, hat geriliminin nominal değerinin %90’ından daha düşük gerilimleri tanımlarken gerilim yükselmesi nominal değerinin %110’unu aşan yüksek değerleri ifade etmektedir.



Şekil 2.1. IEEE Std. 1159-2019’a göre gerilim azaltma standardı

### 2.1.3. Uzun süreli değişimler

Bir dakikayı aşan süreler için temel frekanstaki kaynak geriliminde, aşırı gerilim, düşük gerilim ve uzun süreli kesinti gibi değişimlerdir. Bir dakikayı aşan süreler için nominal geriliminin etkin (rms) değerinin, %110’dan fazla artış göstermesi aşırı gerilim, %90’ın altına düştüğü durum düşük gerilim ve sıfır olduğu durum uzun süreli kesinti olarak



tanımlanır [19]. Düşük güç faktörlü büyük bir yükün devreye girip çıkması, aşırı gerilime veya düşük gerilime neden olur.

#### **2.1.4. Gerilim dengesizliği**

Kaynağın üç faz gerilim büyüklüklerinin eşit olmadığı durum olarak tanımlanır. Başlıca sebebi tek fazlı yüklerdir. Üç faz geriliminin ortalamasından elde edilen maksimum sapma olarak da tanımlanır [19]. Üç fazlı sistemlerdeki tek fazlı yükler düşük gerilim dengesizliklerine neden olurlar. Bunun yanında üç fazlı yüklerin tek faza kaldığı durumlarda, çok daha büyük problemlere neden olan büyük gerilim dengesizliği meydana gelir.

#### **2.1.5. Güç frekans değişimleri**

Sisteme bağlı yüklerdeki hızlı değişimlerin neden olduğu güç kalitesi problemidir. Güç sisteminin temel frekansının nominal değerinden saptması olarak tanımlanır. Güç sistem frekansı, sistemi besleyen generatörlerin devir hızıyla ilgilidir. Üretim ve yük değişimleri arasında dinamik bir denge olarak frekansta küçük değişimler olabilir. Frekans kaymasının süresi ve genişliği üretim kontrol sisteminin yük değişimlerine tepkisine ve yük karakteristiklerine bağlıdır. Güç sisteminde, normal kararlı çalışma için frekans değişimlerinin limitlerin dışına çıkması, geniş bir üretim kaynağının sistem dışında kalmasından, büyük bir yükün sistemden çıkmasından veya yüklü güç iletim sistemlerindeki hatalardan kaynaklanır [20].

#### **2.1.6. Dalga şekli bozukluğu**

Sürekli durumda gücün frekansının ideal bir sinüs dalgasından saptması olarak tanımlanır. Bu bozulmalar doğru akım bileşeni, harmonikler, ara harmonikler, çentikler ve gürültü olarak sınıflandırılır [18]. Güç sisteminde meydana gelen gerilim veya akım dalga şeklinin saf sinüzoidal halden saptması harmonik olarak tanımlanır. Harmonikler güç frekansının tam katları (100 Hz, 150 Hz gibi) olabileceği gibi interharmonik şeklinde kesirli katları da (125 Hz, 175 Hz) olabilir. Harmonik içeren dalga şekli de periyodiktir. Temel bileşen olan 50 Hz'lik bileşen dışında kalan tüm harmonik bileşenler elektrik sistemlerinde artan güç kayıplarına, gerilim düşümlerine ve elektrik sisteminin veriminin düşmesine neden olur. Harmoniklerin olumsuz etkileri harmonik filtrelerin kullanılmasıyla azaltılabilir. Güç sistemlerinde dengesiz çalışan güç konvertörleri veya yarım dalga doğrultucuları DA bileşenine neden olurlar. Sistemdeki DA bileşeni güç

transformatörlerini doyuma götürebilir. Ayrıca DA ve AA motor sürücülerinde, kesintisiz güç kaynaklarında (KGK) yer alan, akım komütasyonu yapan doğrultucu devreleri güç sistemlerinde çentik oluşmasına sebebiyet verirler. Gerilim çentiklerinin süre ve derinliklerinin artması aynı gerilim kaynağından beslenen diğer yüklere zarar verebilir.

### **2.1.7. Gerilim dalgalanmaları**

Kaynak geriliminde, genliği nominal gerilimin %90 ve %110 değerleri arasında olan hızlı ve sistematik değişimler olarak tanımlanırlar. Bunlar gerilim kırışması olarak da bilinirler. Düşük güç faktörlü yüklerin, akımın genliğinde meydana getirdikleri hızlı ve büyük değişimler tarafından oluşurlar [19]. Yük akımında meydana gelen büyük ve hızlı değişimler, kaynak gerilimde ani düşüslere neden olmaktadır.

Gelişen teknoloji ile yüklerin çoğunlukla endüktif olması ve yarı iletken güç elemanlarının kullanımının artmasıyla şebekeden farklı fazda ve lineer olmayan akımlar çekilmektedir. 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 [21]. 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 Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Yukarıda bahsedilen güç kalitesi problemlerinin çoğu reaktif gücün uygun bir denetimi ile yani reaktif güç kompanzasyonu ile zayıflatılabilir. İletim ve dağıtım sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu ise gerilim regülasyonu veya yük kompanzasyonu için yapılmaktadır.

Tablo 2.2. EPDK tarafından yürürlüğe konulan reaktif enerji sınırlamaları

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

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 kontrol edilmek istenen 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 aygıtları ideal çözümlerdir. FACTS ve Özel Güç cihazları evirici tabanlı kompensatörler olup günümüzde 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 [22].

## 2.2. Reaktif Güç Kompanzasyonu

Bir devre indüktör, kondansatör veya her ikisini birden içeriyorsa bir periyot boyunca devreye giren enerjinin bir kısmı depo edilir ve sonrasında kaynağa geri gönderilir. AA gerilim bir indüktöre uygulandığında, indüktör gerilimin pozitif periyodunda enerjiyi manyetik alanında depolar. Depolanan bu enerji gerilimin negatif periyodunda kaynağa geri verilir. Bu periyot kaynak devrede olduğu sürece devam eder [23].

Sadece kondansatör içeren bir AA devrede kaynaktan çekilen enerji yarım periyotluk zaman diliminde kondansatörün plakaları arasında elektrik alanında depolanır. Diğer yarım periyotluk süre içerisinde ise depolanan enerji tekrar kaynağa verilir.

İndüktör ve kondansatör birbirleriyle eşlenik çalışan iki devre elemanıdır. Bu iki devre elemanı seri bağlı olarak aynı devrede bulduklarında üzerlerindeki gerilimlerin faz farkı  $180^\circ$  dir. Dolayısıyla indüktör kaynaktan güç çekerken kondansatör daha önce

depoladığı gücü geri verir. Sonrasında ise kondansatör güç çekerken, indüktör daha önce depoladığı gücü geri verir [23].

Bir periyot boyunca akım ve gerilim değerlerinin işaretleri aynı veya farklı olabilir. Gerilim ve akım işaretlerinin farklı olduğu noktalarda güç negatiftir ve güç akışı kullanıcıdan şebekeye doğrudur. Şebekeden çekilen bu enerji kullanılmadan şebekeye tekrar verilir. Bu durum ise iletim hatlarının gereksiz yere yüklenmesine ve kayıpların artmasına neden olur. Şebekeden çekilip kullanılmadan tekrar şebekeye verilen bu güce reaktif güç denir ve Q ile gösterilir. Reaktif güç;

$$Q = V.I.\sin\Phi \quad (2.1)$$

olarak ifade edilir. Yukarıdaki eşitikte  $\sin\Phi$  çarpanı reaktif güç katsayısı olarak adlandırılır. Reaktif güç enerji kaybını göstermez ancak indüktörün veya kondansatörün aldığı ve verdiği anlık gücün tepe değerini gösterir. Reaktif güç gereksiz yere iletim hattını ve iletim aygıtlarını yükleyerek gerilim azalmasına ve kayıplara yol açacağı için şebekeden çekilen reaktif gücün minimum olması istenir [23].

AA devrelerde aktif gücü dirençler, reaktif gücü indüktör ve kondansatörler çeker. Bir AA devresinde direnç ve reaktanslar bulunuyor ise aktif ve reaktif güç de bulunacaktır ve her ikisi birlikte görünür gücü (S) oluştururlar.

Endüktif bir yük için görünür güç fazörü;

$$S = P + jQ_L \quad (2.2)$$

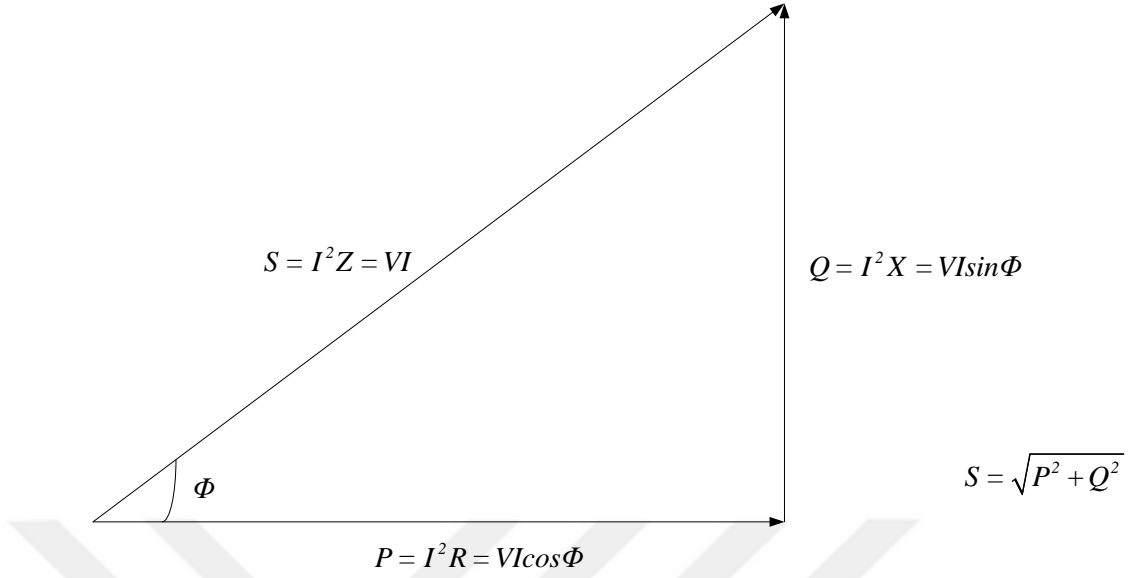
Kapasitif bir yük için görünür güç fazörü;

$$S = P - jQ_C \quad (2.3)$$

olarak tanımlanırken görünür güç S;

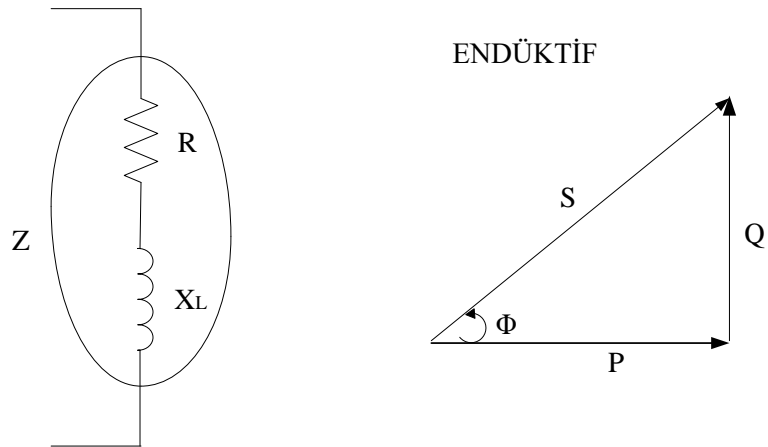
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.4)$$

ile ifade edilir. Aktif güç P, reaktif güç Q ve iki gücün birlikte oluşturduğu görünür güç S'nin skaler nicelikleri geometrik olarak Şekil 2.2'de görüldüğü gibi bir dik üçgenin sırasıyla yatay kenarı, düşey kenarı ve hipotenüsü olarak gösterilebilir. Bu üçgen, güç üçgeni olarak bilinir. Güç üçgeni, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi  $I^2$  çarpanı ile ölçeklendirilmiş Z empedans üçgenidir.

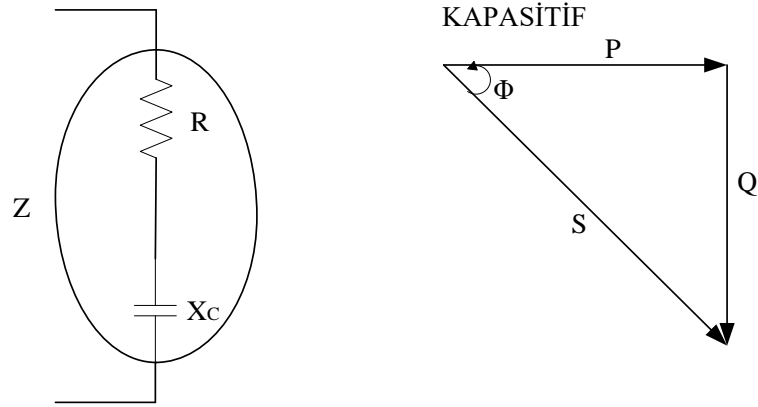


Şekil 2.2. Güç üçgeni

Bir endüktif yük ve bir kapasitif yük için güç üçgenleri sırasıyla Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Elektrik devrelerinde işi gerçekleştiren güç aktif güç olarak tanımlanır. Reaktif güç ise elektrik devrelerinde karşılaşılan ve istenmeyen bir güçtür. Bu sebeple aktif gücün en yüksek, reaktif gücün sifıra yakın olacak şekilde reaktif güç kompanzasyonu yapılması gerekmektedir. Reaktif güç kompanzasyonu seri veya paralel bağlı olan reaktif güç üreten kompanzatorler ile yapılabileceği gibi güç elektroniğine dayalı FACTS ile de yapılabilir [23].



Şekil 2.3. Endüktif yük için güç üçgeni



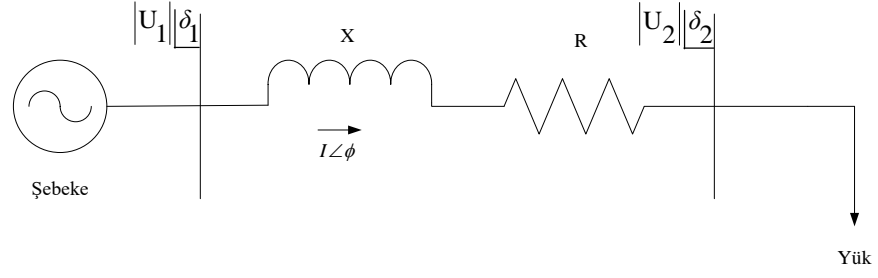
Şekil 2.4. Kapasitif yük için güç üçgeni

### 2.2.1. Şönt kompanzasyon

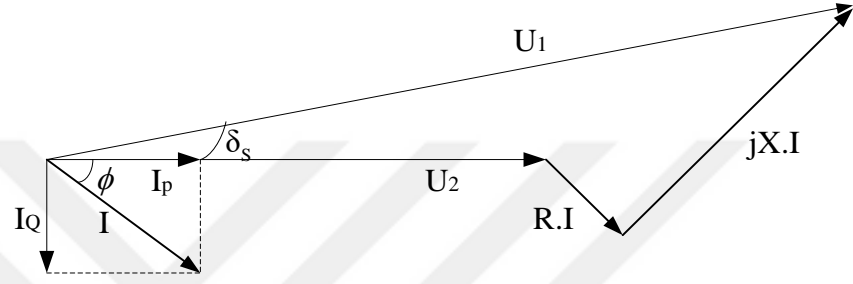
Bir radyal dağıtım sisteminde şönt kompanzasyonunun temel prensibi Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Şekil 2.5 (a) ve (b)’de,  $U_1$  kaynak bara gerilimini,  $U_2$  yük bara gerilimini,  $X$  ve  $R$  güç sisteminin sırasıyla reaktansını ve direncini,  $I_p$  ve  $I_Q$  akımın aktif ve reaktif bileşenlerini,  $\Phi$  akım ve yük barası gerilimi arasındaki açıyı,  $\delta_s$  ise  $U_1$  ve  $U_2$  gerilimleri arasındaki açıyı temsil etmektedir.

Sistemdeki yükün endüktif bir yük olduğunu kabul edersek, uygun bir çalışma için reaktif güç gereklidir. Gerekli olan bu reaktif güç kaynak tarafından iletim hatları vasıtasıyla sağlanır ancak reaktif güç yüke yakın bir yerde sağlanırsa hat akımı azaltılabilir ve bu da iletim hattının gereksiz yere yüklenmesini engeller. Bu düzeltme işlemi kondansatör, gerilim kaynağı veya akım kaynağı kullanılarak yapılır.

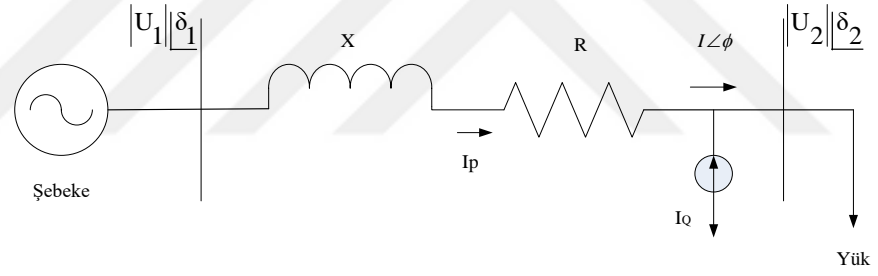
Şekil 2.5 (c)’de yük akımının reaktif bileşeni  $I_Q$ , bir akım kaynağı kullanarak kompanze edilmektedir. Böylece Şekil 2.5 (b) ve (d) fazör diyagramlarında görüldüğü gibi sistem gerilim regülasyonu düzelmekte ve reaktif akım bileşeni azalmakta ya da hemen hemen yok edilmektedir.



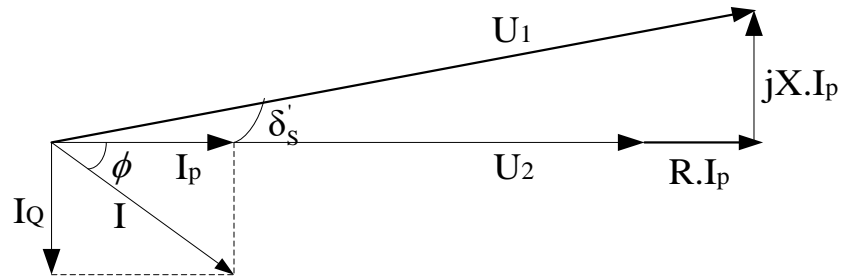
(a)



(b)



(c)



(d)

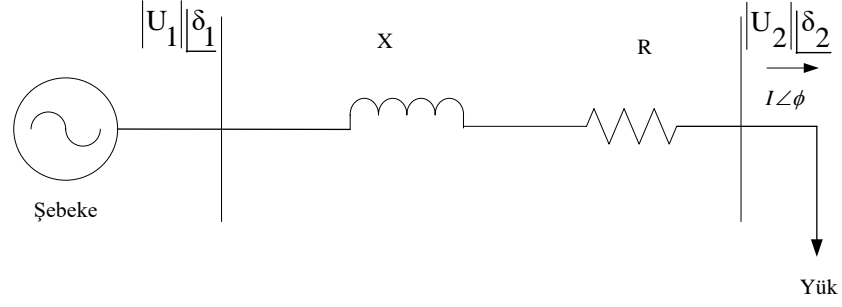
Şekil 2.5. AA sisteminde şönt kompozasyonunun temel prensipleri (a) kompozasyonsuz radyal sistem (b) kompozasyonsuz sistem fazör diyagramı (c) akım kaynağı ile şönt kompozasyonlu radyal sistem (d) kompozasyonlu sistem fazör diyagramı

### 2.2.2. Seri kompanzasyon

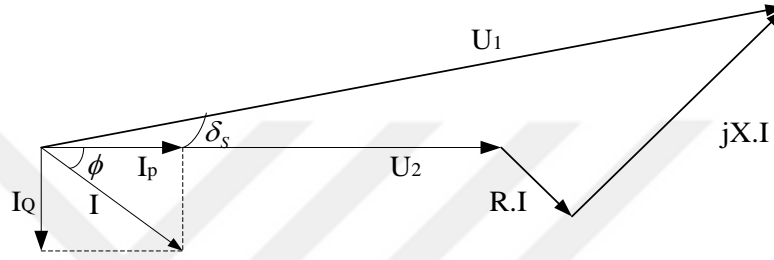
Seri kompanzasyon sistemlerinde güç hattının reaktansını azaltmak için anma frekansın da kondansatörler kullanılır. Seri kondansatörler sisteme bağlanmasıyla kendinden reaktif güç üretir ve hat reaktansının belirli bir bölümünü dengeler.

Şönt kompanzasyon gibi seri kompanzasyonda Şekil 2.6'da görüldüğü gibi akım ve gerilim kaynakları ile uygulanabilir. Şönt kompanzasyondaki kısaltmalara ek olarak,  $U_K$  sisteme verilen kompanzasyon gerilimini,  $U_2$  ' ise kompanzasyon sonrası yük bara gerilimini ifade etmektedir. Şekil 2.6 (b) ve (d) fazör diyagramlarına göre seri kondansatör sisteme bağlanmasıyla düzenli olarak reaktif güç üretir ve hattın reaktansı azalır. Böylece güç sisteminin geçici kararlılığı ve gerilim regülasyonu artar.

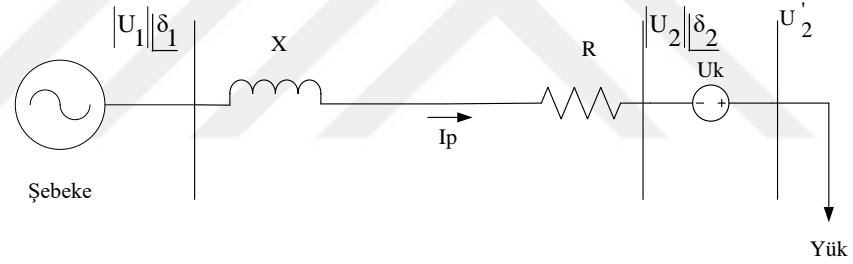




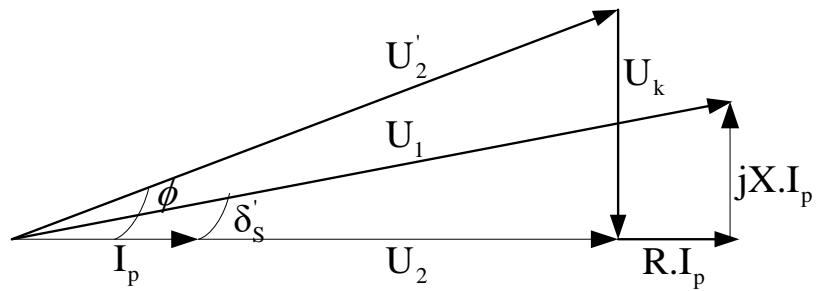
(a)



(b)



(c)



(d)

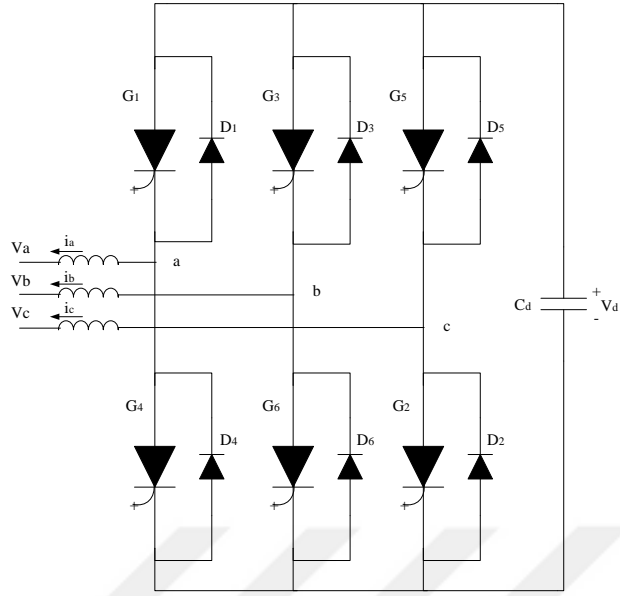
Şekil 2.6. AA sisteminde seri kompanzasyonunun temel prensipleri (a) kompanzasyonsuz radyal sistem (b) kompanzasyonsuz sistem fazör diyagramı (c) gerilim kaynağı ile seri kompanzasyonlu radyal sistem (d) kompanzasyonlu sistem fazör diyagramı

### 2.3. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS)

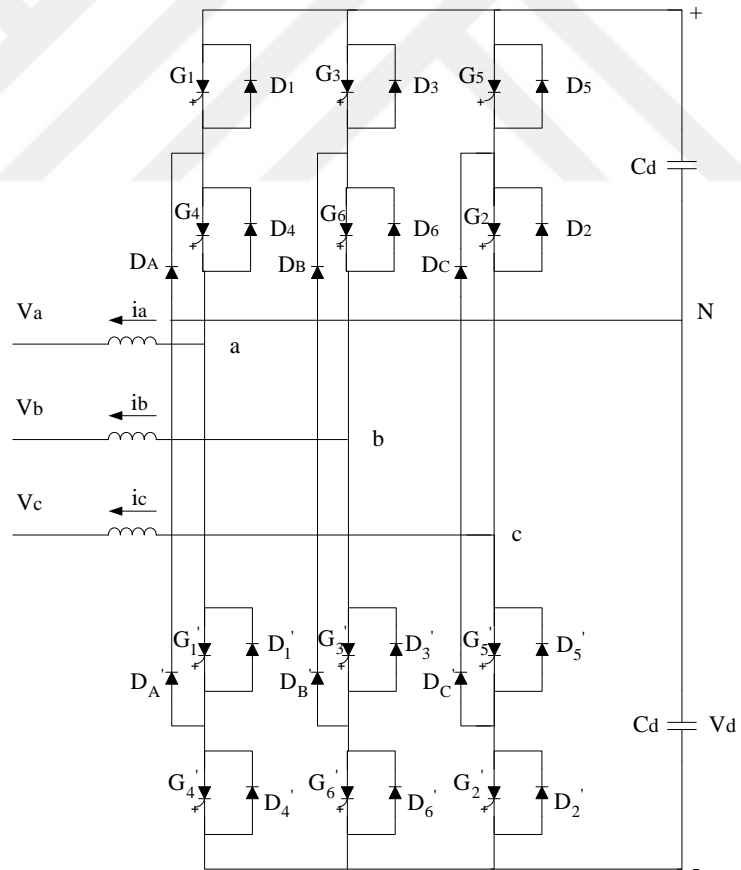
FACTS, geleneksel kompensatörler ve SVC'ler olarak şönt, seri veya şönt serisi bağlantılarındaki simetrik sistemlere entegre edilmiştir. Gerilimi dengelemek ve sistem kararlılığını arttırmak için kullanılan gerilim kaynaklı konvertör (GKK) tabanlı en yaygın FACTS cihazları STATCOM'dur. FACTS'ın sistem üzerindeki olumlu etkisini arttırmak amacıyla GTO, IGBT, ve IGCT gibi yarı iletken teknolojisinin geliştirilmesiyle yüksek güçlü GKK'ler daha da geliştirilmiştir [24].

Ayrıca zorlamalı komütasyonlu veya doğal komütasyonlu kompensatörler, konvansiyonel hat komütasyonlu kompensatörlere kıyasla daha esnek ve kararlı kompanzasyon sağlamak amacıyla GKK kullanılarak uygulanır [24].

Şekil 2.7 (a)'da iki seviyeli altı darbeli GKK topolojisi ve Şekil 2.7 (b)'de üç seviyeli diyot kenetlemeli GKK topolojisi gösterilmiştir. GKK'ler, IGBT ve IGCT anahtarlarının iki yönlü akım akışını sağlayabilmek için GTO'lar ve karşıt paralel diyotlarla yapılandırılırlar.



(a)



(b)

Şekil 2.7. FACTS kullanılan GKK topolojileri (a) iki seviyeli altı darbeli VAR kompensatör (b) üç seviyeli VAR kompensatör

GKK'nin düzenli çalışması DA kaynağını bir kondansatör ile değiştirerek sadece reaktif güç dengelenmesine izin veren DA tarafına bağlı bir gerilim kaynağı ile sağlanır. Ayrıca aktif güç yönetiminde gerekli olması halinde devredeki ani akımları ve akım yükselmelerini önlemek için kompensatörün AA tarafında küçük bir reaktör kullanılır. Ortaya çıkan güç sistemleri ve FACTS'larda da STATCOM (SSSC, UPFC), fazlar arası güç kontrolü (IPC), tristör kontrollü fren direnci (TCBR), tristör kontrollü gerilim sınırlayıcı (TCVC), batarya enerji depolama sistemi (BEDS) ve süper iletken manyetik enerji depolama (SMED) sistemleri gibi daha etkili kontroller gerektirir [24].



## BÖLÜM 3

### EVİRİCİLER

Günümüzde elektrik enerji tüketiminin artması ve fosil enerji kaynaklarının azalması, bilim insanlarını alternatif enerji kaynaklarını geliştirmesine ve mevcut enerjinin daha verimli nasıl kullanılabileceği konularında araştırmaya yöneltmektedir. Bu doğrultuda aküler, rüzgar türbinleri, güneş panelleri, biyolojik atıklar, dalga enerjisi gibi alternatif enerji kaynakları daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak alternatif enerji kaynakları kullanılarak üretilen ya da doğrultucular kullanılarak elde edilen DA gücün endüstride kullanılabilmesi için AA dalga şekline dönüştürülmesi gerekir. Bu amaçla evirici olarak adlandırılan güç elektroniği devreleri kullanılır. Eviriciler en genel anlamıyla doğru gerilimi, istenilen genlik ve frekansa sahip bir alternatif gerilim üretmek amacıyla kullanılan güç elektroniği dönüştürücüleridir [25].

Çıkış gerilimi, değişken veya sabit frekansta olacak şekilde belirlenebilir. Değişken bir çıkış gerilimi, DA giriş gerilimi değiştirilerek ve evirici kazancı sabit tutularak elde edilir. Diğer bir ifadeyle, DA giriş gerilimi sabitse ve kontrol edilemiyorsa, değişken bir çıkış gerilimi elde etmek için eviricinin kazancı değiştirilebilir. Bu da eviricide darbe genişlik modülasyonu (DGM) kontrolü yapılarak gerçekleştirilir. AA çıkış geriliminin, DA giriş gerilimine oranı evirici kazancı olarak tanımlanır [26].

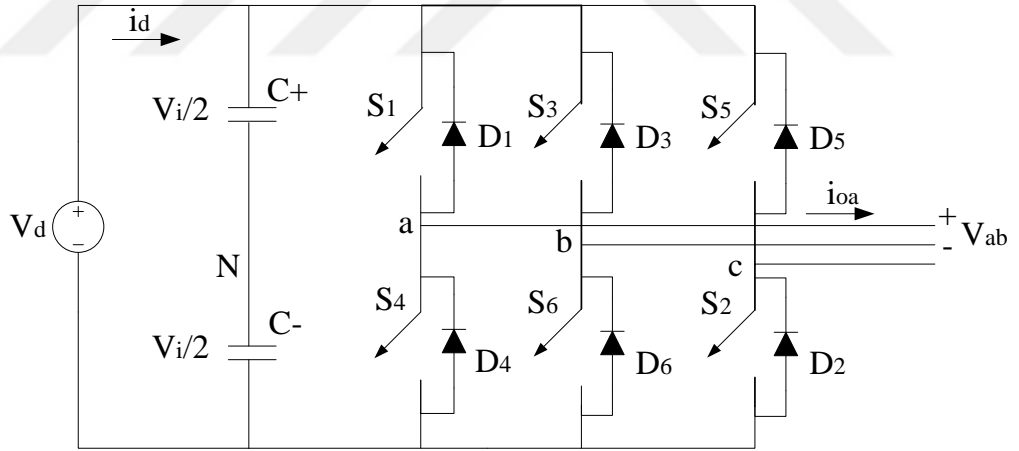
İdeal eviricilerin çıkış gerilim dalga şekilleri sinüzoidal olmalıdır ancak pratikte eviricilerin dalga şekilleri sinüzoidal değildir ve harmonikler içermektedirler. Düşük ve orta güç uygulamalarında, kare-dalga ve kısmi-kare-dalga gerilimler kullanılabilir olarak kabul edilir. Yüksek güç uygulamalarında ise düşük THD oranına sahip sinüzoidal dalga şekilleri gereklidir. Yarı iletken teknolojisinde gelişmeler neticesinde, çıkış geriliminde oluşan harmonik bileşenler farklı anahtarlama teknikleri kullanılarak önemli ölçüde azaltılmıştır [26].

Evirciler çoğunlukla endüstriyel uygulamalarda, kesintisiz güç kaynaklarında (KGK), AA motor sürücülerinde yaygın olarak kullanılırlar. Genelde tek-fazlı çıkışlar; 120 V-60 Hz, 220 V-50 Hz ve 115 V-400 Hz'dir. Yüksek güçlü üç fazlı sistemlerde ise genel çıkışlar; 220 V-380 V/50 Hz, 120 V-208 V/60 Hz ve 115 V-200 V/400 Hz'dir.

Evirici devreler, güç ihtiyaçlarına ve çıkış gerilimlerine göre tek fazlı ya da üç fazlı olarak tasarlanırlar. Her bir evirici, mosfet ya da IGBT gibi kontrollü olarak iletme ve kesime geçen anahtarlama elemanı kullanabilir. Eviriciler bir AA çıkış gerilimini üretebilmek için genellikle DGM kontrol işaretlerini kullanırlar. Bir evirici, giriş gerilimi sabit ise gerilim kaynaklı evirici (GKE), giriş akımı sabit ise akım kaynaklı evirici (AKE) olarak adlandırılır [26].

### 3.1. Üç Fazlı Eviriciler

Üç fazlı eviriciler, tek fazlı eviricilerden farklı olarak orta ve yüksek güç sınıflarında yer alan AA motor sürücülerinde ve güç kaynaklarında yaygın olarak kullanılır. Üç fazlı evirici topolojisi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Üç fazlı evirici devrede, çıkışta üç faz gerilim dalgalarını elde etmek için karşılıklı olarak 120 derece faz farkı olan üç adet yarım köprüden oluşmaktadır. Girişteki DA kaynağı genellikle tek faz ya da üç faz köprü doğrultucularından elde edilir. DA merkez üzerinde yer alan kare dalga faz gerilimleri Fourier serileri kullanılarak Denklem 3.1-3.3’teki gibi belirlenir [27].



Şekil 3.1. Üç fazlı evirici

$$V_{a0} = \frac{2V_d}{\pi} \left[ \cos wt - \frac{1}{3} \cos 3wt + \frac{1}{5} \cos 5wt - \dots \right] \quad (3.1)$$

$$V_{b0} = \frac{2V_d}{\pi} \left[ \cos \left( wt - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{3} \cos 3 \left( wt - \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{1}{5} \cos 5 \left( wt - \frac{2\pi}{3} \right) - \dots \right] \quad (3.2)$$

$$V_{c0} = \frac{2V_d}{\pi} \left[ \cos\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{3}\cos 3\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{5}\cos 5\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right) - \dots \right] \quad (3.3)$$

Denklemlerdeki faz gerilimleri kullanılarak hat gerilimleri aşağıdaki gibi belirlenir.

$$V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \quad (3.4)$$

$$V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \quad (3.5)$$

$$V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \quad (3.6)$$

Eviricinin kontrolünde belirsiz durumları ortadan kaldırmak için her bir yarım köprünün kontrolü DGM ile 8 ayrı durumda gerçekleşir. AA hat gerilimi üretilirken, eviriciye uygulanan 8 ayrı anahtarlama durumlarından, ikisinden sıfır değerinde hat gerilimi üretilirken diğer 6 durumda hat gerilimleri DA gerilimine göre değişmektedir. Üretilen bu çıkış gerilimleri, modülasyon oranına ve DGM sinyallerine göre belirlenir [27].

Tablo 3.1. Üç faz eviricinin anahtarlama durumları

Durum	Anahtarlama Durumu	$V_{AB}$	$V_B$	$V_A$
1	$S_1, S_2$ ve $S_6$ iletimde	$V_d$	0	$-V_d$
2	$S_2, S_3$ ve $S_1$ iletimde	0	$V_d$	$-V_d$
3	$S_3, S_4$ ve $S_2$ iletimde	$-V_d$	$V_d$	0
4	$S_4, S_5$ ve $S_3$ iletimde	$-V_d$	0	$V_d$
5	$S_5, S_6$ ve $S_4$ iletimde	0	$-V_d$	$V_d$
6	$S_6, S_1$ ve $S_5$ iletimde	$V_d$	$-V_d$	0
7	$S_1, S_3$ ve $S_5$ iletimde	0	0	0
8	$S_4, S_6$ ve $S_2$ iletimde	0	0	0

Tablo 3.1'e göre herhangi bir çıkış hat gerilimi, modülasyon oranının doğrusal alanında;

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = m_a \frac{\sqrt{3}V_d}{2} \quad 0 < m_a \leq 1 \quad (3.7)$$

Aşırı modülasyon alanında;

$$\frac{\sqrt{3}V_d}{2} < V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} < \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{3}V_d}{2} \quad m_a \geq 1 \quad (3.8)$$

### 3.2. Çok Seviyeli Eviriciler

Gerilim kaynaklı eviriciler 0,  $+V_{dc}$  ve  $-V_{dc}$  seviyelerinde çıkış gerilimi veya akımı üretirler. Bunlar iki seviyeli evirici olarak bilinirler. Kaliteli bir çıkış gerilim veya akım dalga şeklini elde etmek için bu eviriciler çeşitli darbe DGM yöntemleri kullanırlar. Ancak yüksek güç ve yüksek gerilim uygulamalarında, iki seviyeli eviricilerin yüksek frekansta çalışması konusunda bazı kısıtlamalar vardır. Bu kısıtlamalar genelde anahtarlama kayıpları ve elemanların anma değerlerinden kaynaklanmaktadır. Bunların yanında, yüksek gerilim ve akım değerlerine ulaşmak için çok sayıda yarıiletken anahtarlama elemanı paralel ve seri olarak bağlandığından, bu bağlantılarda meydana gelebilecek sorunlarında çözülmesi gerekir [26].

Çok seviyeli evirici ile elemanlar üzerindeki gerilim baskısı kontrol edilebildiğinden, yüksek güçlü ve yüksek gerilimli bir evirici üretmek daha kolaydır. Daha yüksek anma değerli eleman kullanmaya gerek kalmadan gerilim seviyesi sayısının artırılması, eviricinin güç değerini yükseltir. Çok seviyeli eviricilerde, düşük harmonik içerikli yüksek gerilimlere ulaşılabilir ve gerilim seviyesi sayısı arttıkça çıkış gerilimi dalga şeklindeki harmonik bileşenler büyük miktarda azalır [26]. Çok seviyeli eviriciler, yaygın olarak kondansatörlerden oluşan gerilim kaynaklarından elde edilen farklı DA gerilim seviyelerini kullanarak sinüzoidale yakın bir gerilim üretmek için tasarlanmıştır. Gerilim seviyesi sayısı arttıkça üretilen çıkış dalga şeklindeki adımların sayısı da artar ve istenilen dalga biçimine yaklaşan basamak şeklinde bir dalga şekli üretilir. Dalga şekline daha fazla adım eklendikçe, çıkış dalga şeklindeki harmonik bozulma oranı azalır [26]. Çok seviyeli eviriciler üç grupta sınıflandırılır;

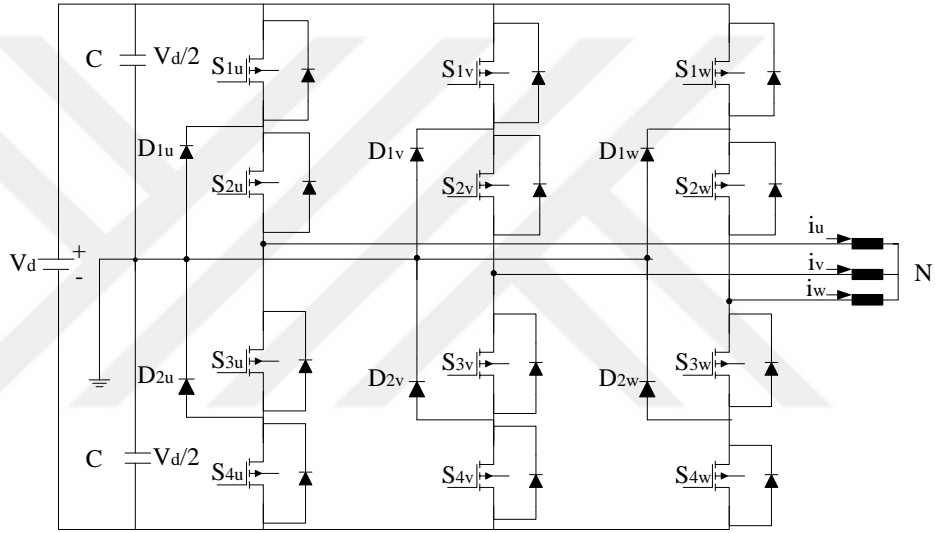
- Diyot kenetlemeli çok seviyeli evirici
- Kapasitör kenetlemeli çok seviyeli evirici
- Kaskat çok seviyeli evirici

Diyot kenetlemeli eviricide her bir faz için kullanılan anahtarların değişik anahtarlama sırasıyla çıkış gerilimi elde edilir. Çıkış faz gerilimleri  $+V_d/2$ , 0,  $-V_d/2$  olarak elde edilir. Diyot kenetlemeli eviricilerde kenetleme diyotları olarak adlandırılan ( $D_{1u}$ ,  $D_{1v}$ ,  $D_{1w}$ ,  $D_{2u}$ ,  $D_{2v}$ ,  $D_{2w}$ ) ve her faz için çıkış gerilimi elde etmek için kullanılan kenetleme diyotları bulunur. Diyot kenetlemeli çok seviyeli (m seviyeli) evirici genel olarak DA barasına bağlı (m-1) adet kondansatörden meydana gelmektedir. Şekil 3.2'ye göre DA bara



gerilimi  $V_d$  olmak üzere her bir kondansatör üzerindeki gerilim değeri  $V_d/2$ 'ye eşittir. Ayrıca  $m$  seviyeli bir evirici için  $(m-1)$  adet kondansatör,  $2(m-1)$  adet yarıiletken anahtar ve  $(m-1) \cdot (m-2)$  adet kenetleme diyotu gereklidir.

Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricilerde her bir evirici kolunda kullanılan anahtarlama eleman sayısı eşittir. Bu eviricide az sayıda kapasite elemanı kullanılmasına karşılık ekstradan kenetleme diyotları kullanılmaktadır. Yüksek gerilim değerleri ve düşük THD değerleri avantaj olarak gözükse de bu eviricide anahtarlama sırasında oluşan gerilim dengesizlikleri dezavantaj olarak görülebilir [28].



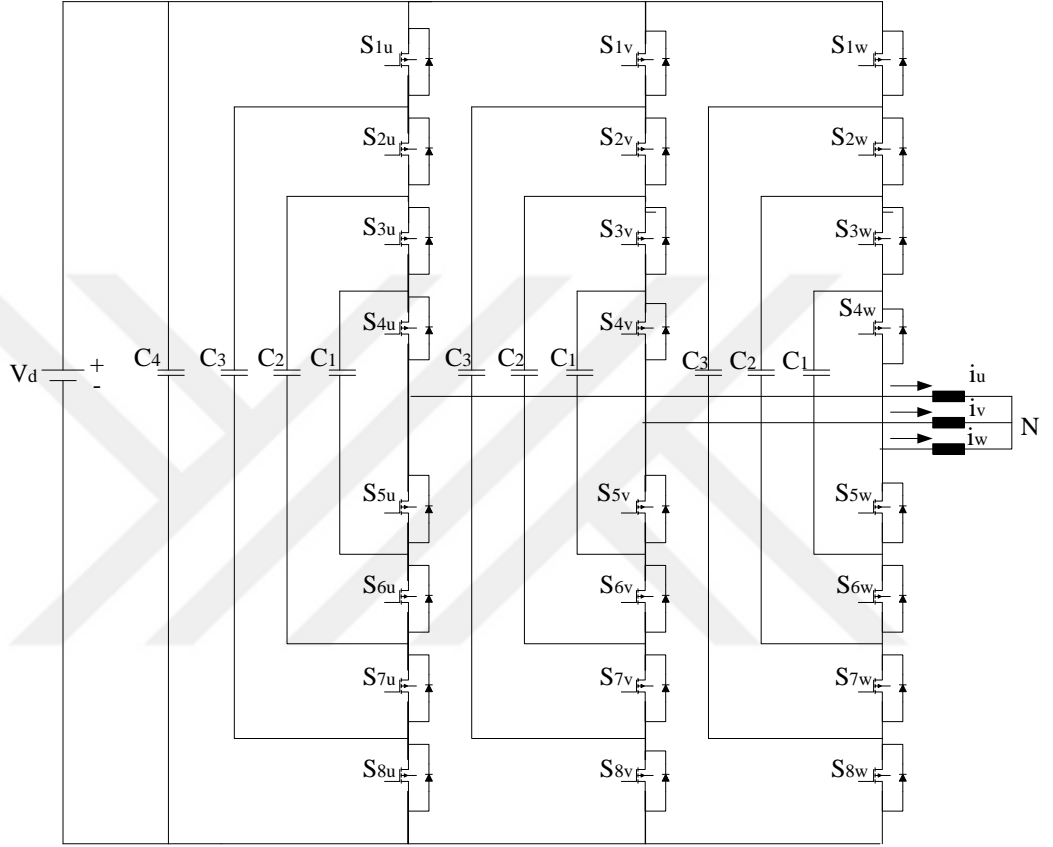
Şekil 3.2. Üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici

Kondansatör kenetlemeli çok seviyeli evirici için gerilim seviyeleri diyot kenetlemeli evirici ile benzerdir. Şekil 3.3'te verilen üç seviyeli kondansatör evirici modeline göre,  $m$  seviyeli eviricinin  $V_{a0}$  faz gerilimi,  $m$  seviyeli ve hat gerilimi  $V_{ab}$  ise  $(2m-1)$  seviyelidir. Anahtarların ve kondansatörlerin eşit gerilim değerinde olduğunu kabul edersek  $m$  seviyeli evirici için  $DA$  baraya  $(m-1)$  adet kondansatör bağlanmalıdır. Faz başına gerekli olan kondansatör sayısı  $N_c$  Denklem 3.9'e göre hesaplanır.

$$N_c = \sum_{i=1}^m (m-i) \quad (3.9)$$

Diyot kenetlemeli eviriciler gibi seviye sayısının yeterince yüksek olması durumunda harmonik bileşenleri oldukça düşüktür. Dolayısıyla filtreye ihtiyaçları yoktur ve hem aktif hem de reaktif güç akışlarını kontrol edebilirler. Kondansatör kenetlemeli çok

seviyeli eviricinin en önemli dezavantajı ise; seviye sayısının yüksek olması durumunda çok fazla sayıda depolama kondansatörüne ihtiyaç vardır. Büyük boyutlu güç kondansatörlerinin kullanılmasından dolayı eviricinin tasarımı daha zordur. Dolayısıyla maliyetleri de daha yüksektir [26].

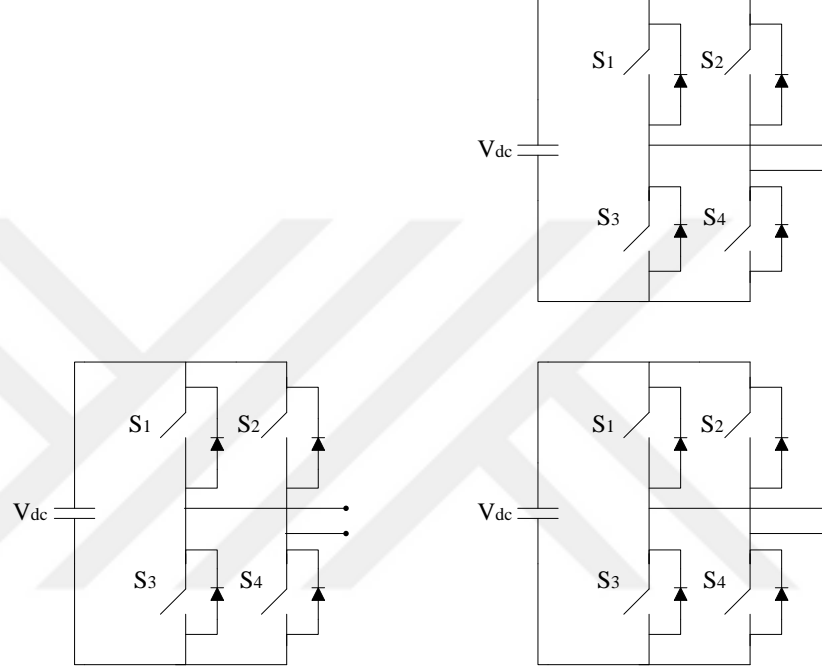


Şekil 3.3. Üç seviyeli kondansatörlü evirici

Kaskad çok seviyeli eviriciler, bir dizi seri bağlı H köprüsü evirici ünitesinden oluşmaktadır. Şekil 3.4’de her faz için iki adet olmak üzere H-köprülül çok seviyeli bir eviricinin güç devresi görülmektedir. Her H-köprünün ayrı bir DA güç kaynağı vardır. Faz gerilimi farklı H-köprüler tarafından üretilen gerilimlerin toplamıyla oluşur. DA bağlantı gerilimleri aynı olan H-köprülül çok seviyeli eviriciye kaskad çok seviyeli evirici denir. DA bağlantı gerilimleri birbirinden farklı olan H-köprülül çok seviyeli eviriciye ise hibrit çok seviyeli evirici olarak bilinir [29].

Bu eviricinin genel özelliği yakıt hücrelerinden, bataryalardan ve solar hücrelerden oluşan bağımsız DA kaynaktan (BDAK) istenilen gerilimi üretmektir. Her BDAK, bir H köprü eviriciye bağlanmaktadır. Diyot kenetlemeli veya kondansatör kenetlemeli

eviricilerden farklı olarak, kaskad çok seviyeli eviricilerde gerilim dengeleme kondansatörü veya gerilim kenetleme diyotu bulunmamaktadır. Kaskad bağlı eviricinin en önemli avantajı, optimum devre tasarımına sahip olmasıdır. Dezavantajı ise, güç dönüşümü için BDAK'na ihtiyaç duymaktadır ve bundan dolayı uygulama alanları sınırlıdır [26].



Şekil 3.4. H-köprülü kaskad evirici

Düşük güç uygulamalarında tek fazlı eviriciler, orta ve yüksek güç uygulamalarında ise üç fazlı eviriciler kullanılır. Üç fazlı eviriciler içerisinde, diyot kenetlemeli eviricilerin harmonik bileşenleri yok etmede zayıf olması, kondansatör kenetlemeli devrenin ise evirici seviyesinin arttığında kontrolünün zor olmasından, kaskad bağlı eviriciler en az sayıda yardımcı elamana sahip topolojiyle oluşturulur. Tablo 3.2'de eviricilerin topolojilerine göre karşılaştırılması verilmiştir.

### 3.3. Eviricilerde Kullanılan Modülasyon Yöntemleri

Eviricinin temel görevi DA giriş gerilimini, istenilen genlikte ve frekansta AA çıkış gerilimine çevirmektir. İdealde eviricinin çıkış gerilimi dalga şeklinin sinüzoidal olması beklenir ancak bu dalga şekli sinüzoidal olmayıp harmonikler içerir. Bu kapsamda, eviricinin çıkış gerilimini kontrol etmek ve çıkış gerilimindeki harmonikleri azaltmak için

DGM tekniği kullanılır. DGM tekniği ile faz açısı ve modülasyon oranı kontrol edilerek eviricinin çıkış gerilimi değiştirilir.

Tablo 3.2. m seviyeli eviricinin topolojilerine göre karşılaştırılması

	Tek Fazlı Eviriciler		Üç Fazlı Eviriciler		
	Yarım Dalga	Tam Dalga	Diyot Kenetlemeli	Kapasitör Kenetlemeli	Kaskad Bağlı
THD <sub>v</sub> (%)	163	156	36.9	33.1	32.4
Anahtarlama Eleman Sayısı	2	4	2(m-1)	2(m-1)	2(m-1)
Kenetli Diyot Sayısı	0	0	(m-1)(m-2)	0	0
DA Kondansatör Sayısı	2	2	(m-1)	(m-1)	(m-1)/2
Yardımcı Kondansatör Sayısı	0	0	0	(m-1)(m-2)/2	0
m=5 Örneği İçin Eleman Sayısı (Faz Başına)	-	-	24	18	10
Kullanım Alanları	< 2kV	< 2kV	Motor Sürme, STATCOM	Motor Sürme, STATCOM	Motor Sürme, PV, Batarya

Eviricinin verimi, harmoniklerin ve anahtarlama kayıplarının azaltılması için kullanılan modülasyon tekniğine bağlıdır. DGM'lerde çok çeşitli uygulamalar için farklı teknikler önerilmektedir. Bu tez çalışmasında ise en yaygın kullanılan DGM yöntemlerinden SDGM ve UVDGM incelenmiştir.

### 3.3.1. Sinüzoidal DGM yöntemi

SDGM yönteminde, üç adet sinüs dalgası ve yüksek frekanslı üçgen taşıyıcı dalga, DGM sinyalini üretmek için kullanılır. Sinüs dalgaları, referans dalgaları olarak adlandırılır ve birbirleri arasındaki faz farkı 120°'dir. Taşıyıcı olarak kullanılan üçgen dalga genelde yüksek frekanslıdır. Sinüs dalgaları ile üçgen dalgası karşılaştırılarak anahtarlama sinyali elde edilir. Sinüs gerilimi üçgen sinyal geriliminden büyük olduğunda, karşılaştırıcı tarafından darbeler oluşturulur. Elde edilen bu darbeler dönüştürücü anahtarlarını tetiklemek için kullanılır. Sinüs dalgası ile üçgen dalgasının geçiş noktalarına göre anahtarların iletme girmesi veya kesime gitmesi için gerekli darbeler üretilir [10].

SDGM’de çıkış geriliminin frekansını sinüs işaretinin frekansı, anahtarlama frekansını ise üçgen işaretinin frekansı belirlemektedir. Eviricinin çıkışında elde edilen gerilim Denklem 3.10 ile ifade edilir.  $V_o(t)$  işareti, modülasyon oranı  $m_a$  ve DA besleme gerilimi  $V_i$  ile doğru orantılıdır.

$$V_o(t) = \frac{m_a \cdot V_i}{2} \cos(\omega_r t) \quad (3.10)$$

Denklem 3.1’deki;

$V_i$  = DA besleme gerilimi,

$\omega_r$  = sinüzoidal referans frekansı,

$m_a$  = modülasyon oranıdır.

Anahtarlama frekansını belirlemede, üçgen dalga sinyalin frekansı ( $f_T$ ) etkilidir. Çıkış sinyallerinin frekansını, genliğini ve faz açısını, taşıyıcı ve modülasyon sinyallerinin frekansı, genliği ve faz açısı belirler. Üçgen dalga frekansının, modülasyon dalgasının frekansına oranı frekans modülasyon oranını verir. Frekans modülasyon oranı ise Denklem 3.11 ile elde edilir.

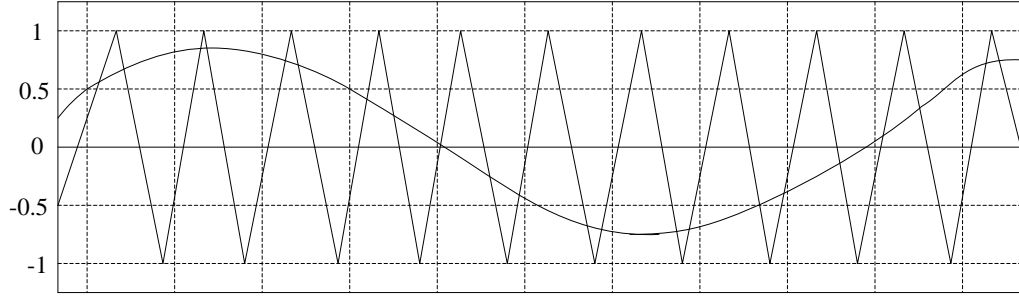
$$m_f = \frac{f_T}{f_m} \quad (3.11)$$

Burada;  $m_f$ , frekans modülasyonu,  $f_T$  üçgen dalga frekansı ve  $f_m$  modülasyon dalgasının frekansıdır. Frekans modülasyonu tek tamsayı seçildiğinde faz-faz gerilimleri ve faz-nötr gerilimi tek simetrilere oluşur. Dolayısıyla, faz-faz gerilimleri ve faz-nötr gerilimlerinde tek sayılı harmonikler bulunurken, çift harmonikler bulunmaz.

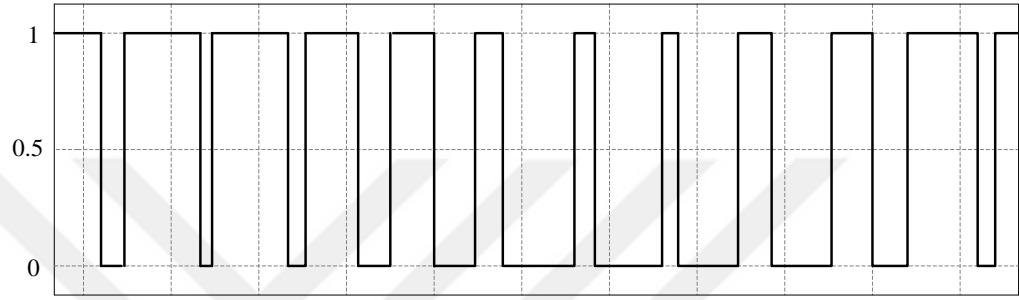
SDGM yönteminde eviricinin çıkışındaki gerilimin genliği, genlik modülasyon oranına bağlıdır. Modülasyon oranı  $m_a$ , Denklem 3.12 ile ifade edilir.

$$m_a = \frac{V_{\sinüs}}{V_{\text{üçgen}}} \quad (3.12)$$

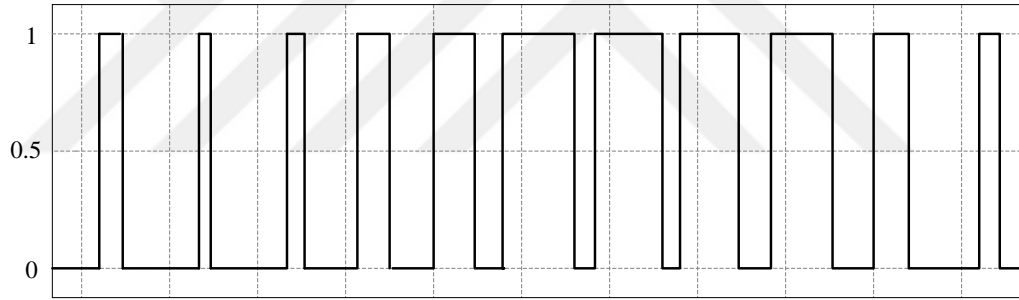
Burada;  $V_{\sinüs}$  modülasyon gerilim tepe değeri,  $V_{\text{üçgen}}$  üçgen gerilim tepe değerine karşılık gelmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.5. SDGM modülatörünün çıkış işaretleri (a) taşıyıcı ve modüle edici işaretler (b) pozitif anahtarlama DGM işareti (c) negatif anahtarlama DGM işareti

SDGM modülatörünün üç faz için ürettiği sinyaller tam köprü evirici devresine uygulanmaktadır. Eviricinin her bir ayağındaki anahtarlama elemanlarının aynı anda iletimde olmaması için Şekil 3.5'deki gibi DGM işaretleri pozitif ve negatif çiftler olarak üretilmelidir. Modülasyon oranının 1'den küçük olduğunda eviricinin çıkış hat gerilimleri Denklem 3.13 ile elde edilir [30].

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = m_a \frac{\sqrt{3} \cdot V_d}{2} \quad 0 < m_a \leq 1 \quad (3.13)$$

Aşırı modülasyon alanında ise çıkış gerilimleri Denklem 3.14 ile elde edilir.

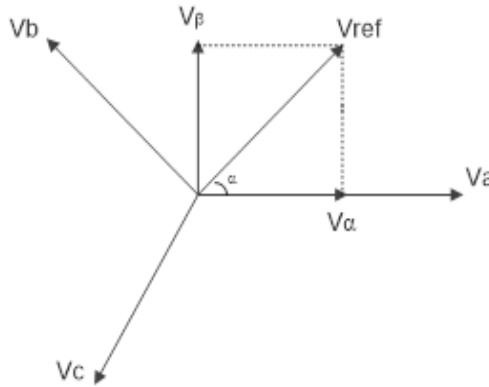
$$\frac{\sqrt{3}.V_d}{2} < V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} < \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{3}.V_d}{2} \quad (3.14)$$

Denklem 3.13 ve Denklem 3.14'e göre, modülasyon oranının 1'den küçük olduğu durumda hat gerilimi eviriciye uygulanan DA giriş geriliminin maksimum %86'sı kadar olacaktır. SDGM işaretleri, aşırı modülasyon aralığında üretilirse, hat gerilimleri giriş geriliminin %86 ile %109'u aralığında olacaktır. Ancak aşırı modülasyonda sinüzoidal DGM çıkışı bozulacaktır. Bunun için modülasyon oranının seçimi önemlidir [30].

### 3.3.2. Uzak vektör DGM yöntemi

Alternatif akım makinalarının analizinde kullanılan uzak vektör modülasyonu D-STATCOM için de kullanılmıştır. Uzak 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  $\alpha$  ve  $\beta$  uzayında temsil edilir. Bu değerlerin elde edilmesi için Denklem 3.15 eşitliği 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 [31].

Eviricinin üretmesi gereken  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  referans gerilimler Clarke dönüşümü kullanılarak Şekil 3.6'da gösterildiği gibi  $V_\alpha$  ve  $V_\beta$  bileşenlerine dönüştürülür. Referans gerilim vektörünün genliği ve açısı ise sırasıyla aşağıdaki Denklem 3.16 ve 3.17 ile hesaplanır.



Şekil 3.6. Gerilim uzak vektörü ve bileşenleri

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Referans vektörünün genliği ( $V_{ref}$ );

$$|V_{ref}| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (3.16)$$

Vektörün hangi bölgede olduğunu belirlemek için  $\alpha$  açısı ise aşağıda verilen eşitlikte hesaplanır.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V_\alpha}{V_\beta} = \omega t = 2\pi f t \quad (3.17)$$

Referans gerilim vektörü  $V_{ref}$ 'in hangi sektörde yer aldığını tespit etmek için  $\alpha$  açısına bakılır. Açı değerine göre  $V_{ref}$ 'in hangi sektörde yer aldığı Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Sektör tespiti

$\alpha$ 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 [31].

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

$$V_{ref} \cdot T_s = V_1 \cdot T_a + V_2 \cdot T_b + V_0 \cdot T_0 \quad (3.18)$$



$$T_s = T_a + T_b + T_0 \quad (3.19)$$

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

$$T_a = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{ref}}{V_{da}} T_s \sin\left(k \frac{\pi}{3} - \alpha\right) \quad (3.20)$$

$$T_b = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{ref}}{V_{da}} T_s \sin\left(\alpha - \frac{(k-1)\pi}{3}\right) \quad (3.21)$$

$$T_0 = T_s - T_a - T_b \quad (3.22)$$

Verilen  $V_{ref}$  için anahtarlama işaretleri üretilirken öncelikle uzay vektörlerin uygulama sırasının belirlenmesi gerekir. Sektörler için anahtarlama sırası Tablo 3.4'de verilmiştir. Bu uygulama sırası birçok şekilde uygulanabilir ancak minimum anahtarlama frekansının ve optimum harmonik performansının 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 [31].

Tablo 3.4. Sektörler için anahtarlama sırası

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	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_0$

## BÖLÜM 4

### DAĞITIM STATİK SENKRON KOMPANSATÖR

Elektrik enerji sistemlerinde, reaktif güç kompanzasyonunun kontrolü büyük bir problemdir. Reaktif güç, iletim hattının güç iletim kapasitesini azaltır ve hat sonunda gerilim genliğinde değişimlere neden olur. Dolayısıyla, AA güç sistemlerinde kayıpları azaltmak ve taşınabilecek gücü arttırmak için reaktif güç kompanzasyonu yapılmalıdır. Uzun yıllardır reaktif güç kontrolü için geleneksel kompanzasyon sistemleri kullanılmıştır ancak iletim hattındaki ani değişimlere karşı cevap hızının düşük olması ve düşük kısa devre empedansı gibi birçok eksikliğinin olması, son zamanlarda yapılan çalışmaları başka bir boyuta taşımış ve iletim hattının reaktif güç kompanzasyonunun güç elektroniği tabanlı cihazlarla daha verimli yapılabileceğini göstermiştir [32].

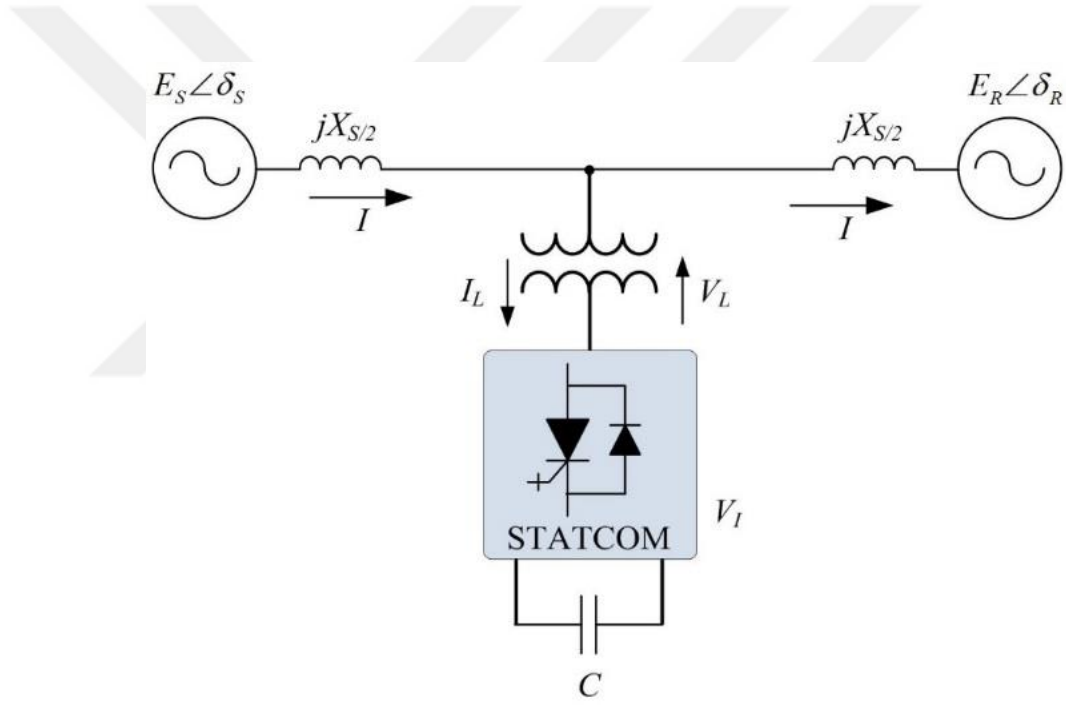
Evirici tabanlı, güç sistemi ile reaktif güç alışverişinde bulunan ve sisteme paralel bağlanan FACTS cihazları olan STATCOM'lar, enerji depolama cihazlarından direkt olarak reaktif güç üretmek yerine bağlı oldukları şebeke ile güç alışverişi yaparlar. Dolayısıyla kullanılan enerji depolama elemanı, SVC'de 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 anahtarlama sırasında 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 [31].

Şebekeye paralel bağlı D-STATCOM, alternatif enerji iletim hattı ile aynı frekansta çalışarak faz açısı ve genliği kontrol edilebilir, üç fazlı sinüzoidal gerilim üretir. GKK, D-STATCOM'un temel yapısını oluşturmaktadır. GKK'ler girişteki doğru akımı şebekeyle aynı frekansta, genliği ve faz açısı kontrol edilebilir, üç fazlı alternatif bir gerilime dönüştürürler. GKK ve AA sistem gerilimleri arasındaki genlik farkı ile reaktif güç kontrolü, bu gerilimler arasındaki faz farkı ile de aktif güç kontrolü yapılır.

Temel olarak GKK DA enerji depolama cihazı ve bağlantı transformatöründen oluşan örnek bir D-STATCOM sistemi Şekil 4.1'de gösterilmiştir [21]. 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 [33]:

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

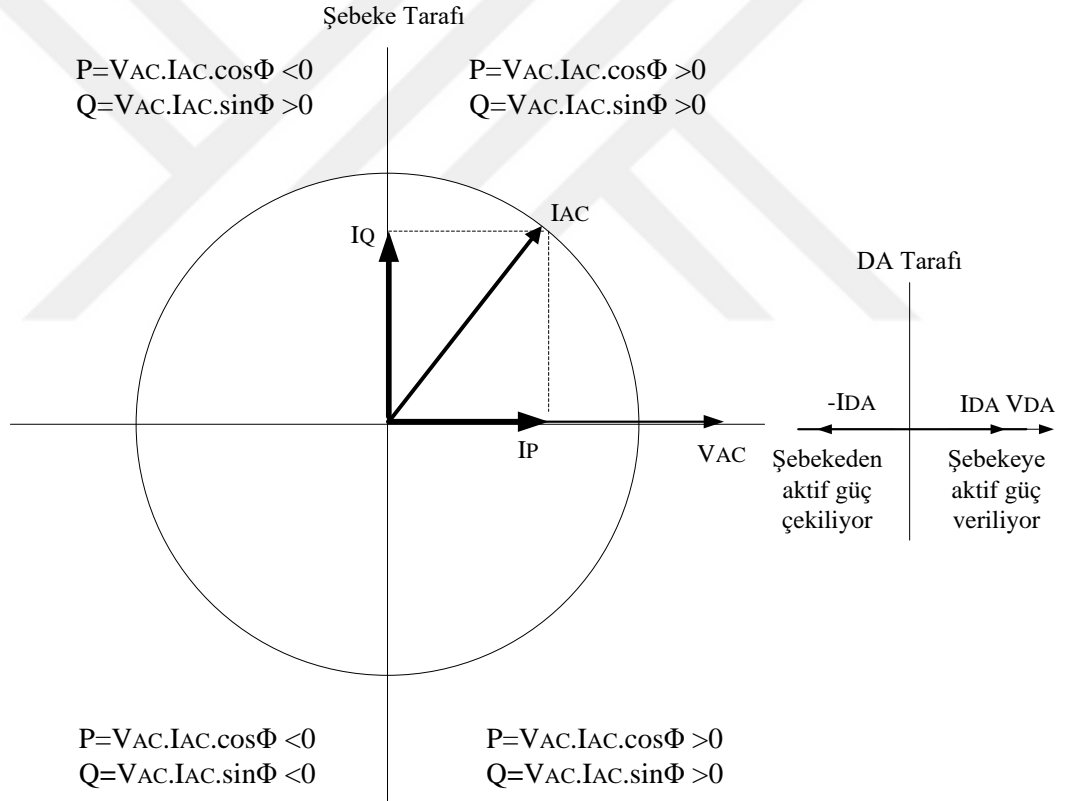


Şekil 4.1. D-STATCOM blok diyagramı

Sistemde kondansatöre duyulan ihtiyaç, gerilim kaynağına duyulan ihtiyaç ve anlık giriş-çıkış güçlerinin sürekli eşit olmasından kaynaklıdır. GKK'nin çıkış geriliminin dalga şekli tam sinüs değildir. Dolayısıyla GKK, anlık giriş ve çıkış güçleri arasındaki eşitliğin bozulmaması için girişte sabit bir gerilim çıkışı sağlayan kondansatörden bir dalgalanma akımı çekmelidir [2].

Şekil 4.2'de D-STATCOM'un alternatif geriliminin ve akımının fazör diyagramı verilmiştir. Şekilde bara akımı  $I$ 'nin faz akım vektörleri  $I_p$  ve  $I_q$  ile şebeke gerilimi gösterilmiştir. Eğer D-STATCOM ile sistem arasındaki aktif güç alışverişi devre

kayıpları ihmal edilerek sıfır olarak kabul edilirse aktif akım bileşeni  $I_p$  ve doğru akım sıfır olur. Bu durumda alternatif akım,  $I$ 'nin reaktif bileşeni  $I_q$  ya eşit olur. Şekil 4.2'ye göre, aktif ve reaktif güç akışı negatifken, güç D-STATCOM'dan sisteme doğru, pozitif iken sistemden D-STATCOM'a doğru akar. Yani, D-STATCOM'un ürettiği çıkış gerilimi ile şebeke geriliminin genliği arasındaki fark reaktif güç alışverişini belirler. D-STATCOM tarafından üretilen çıkış geriliminin genliği, bara geriliminin genliğinden fazla ise D-STATCOM sistem için kapasitif reaktif güç üretir. D-STATCOM tarafından üretilen çıkış geriliminin genliği, bara geriliminin genliğinden az ise o zaman D-STATCOM endüktif reaktif güç tüketir.



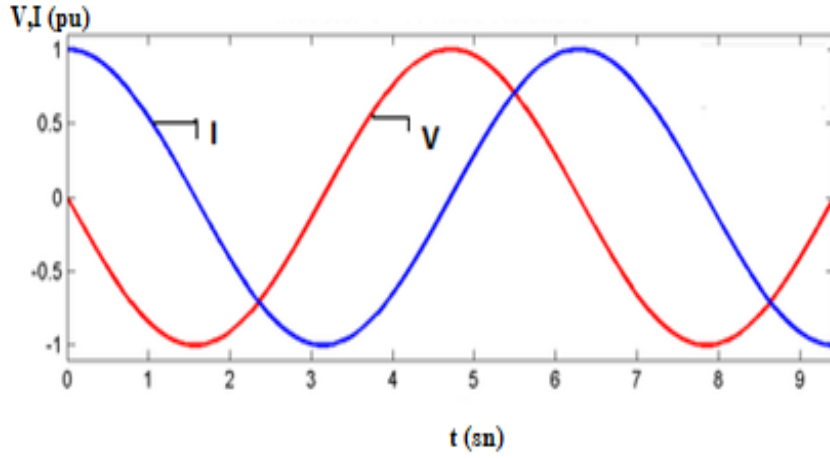
Şekil 4.2. GKK'nin dört bölgedeki çalışması

Güç sistemi ile D-STATCOM arasındaki aktif güç alışverişi GKK'nin çıkış gerilimi ile güç sisteminin gerilimi arasındaki faz farkı ayarlanarak yapılır. Sistemin bara gerilimi, GKK'nin çıkış gerilimine göre ileri fazda tutulursa, şebekeden GKK'ye doğru aktif güç

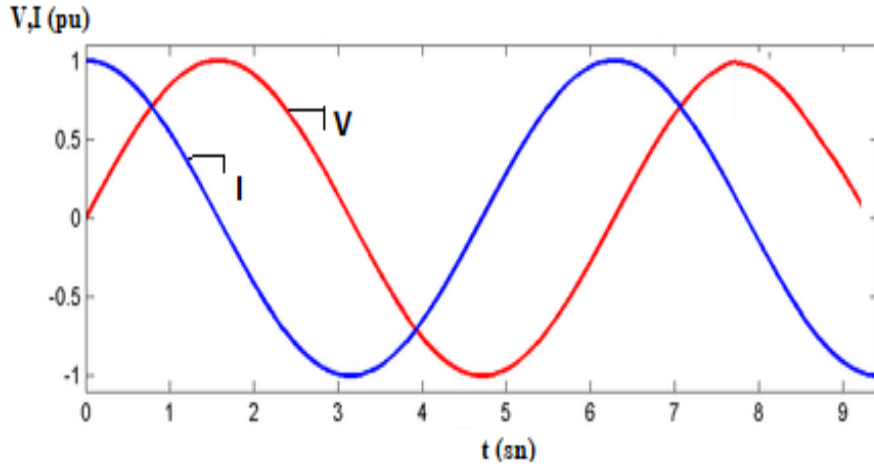
akar. Eğer bara gerilimi GKK'nin çıkış gerilimine göre geri fazda ise GKK güç sistemine aktif güç sağlar.

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 [5]. Dönüştürücü için gerekli olan DA gerilim, kondansatör tarafından karşılanır. AA sistem ile dönüştürücü çıkış gerilimi arasındaki faz farkına göre de kondansatörün 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 4.3 (a)'da gösterilirken kapasitif çalışma modu durumunda akım ve gerilim arasındaki faz farkı Şekil 4.3 (b)'de gösterilmiştir. Kapasitif çalışmada gösterildiği gibi dönüştürücü çıkış akımı (I), şebeke geriliminden (V)  $90^\circ$  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 4.3 (a)'da gösterildiği gibi endüktif modda çalışır. Endüktif çalışma durumunda I akımı, şebeke geriliminden  $90^\circ$  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.

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, kondansatör 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 [10].



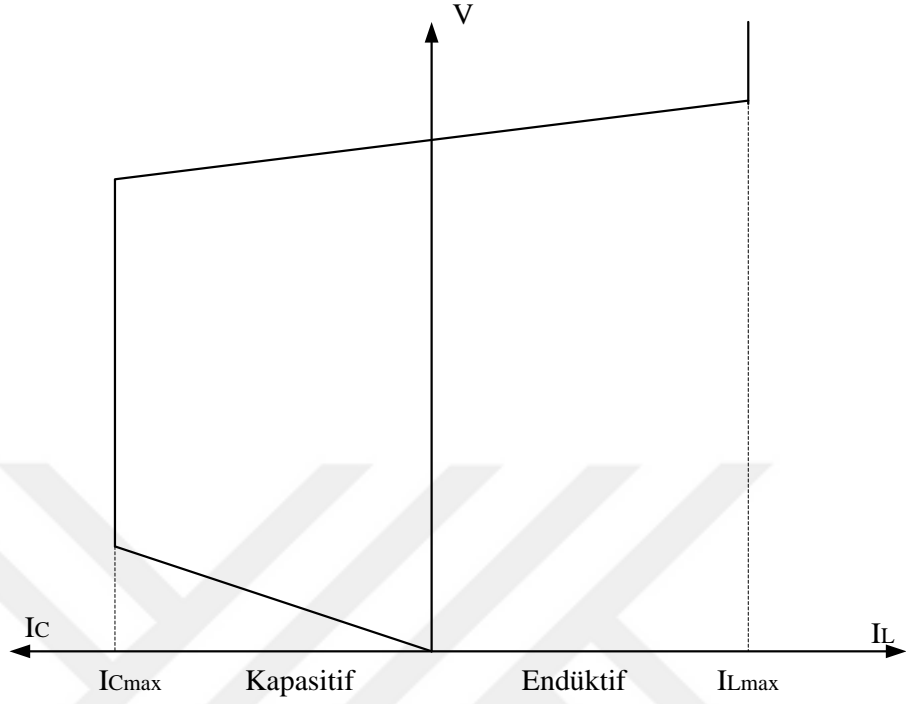
a) Endüktif durum



b) Kapasitif durum

Şekil 4.3. D-STATCOM çalışma durumları

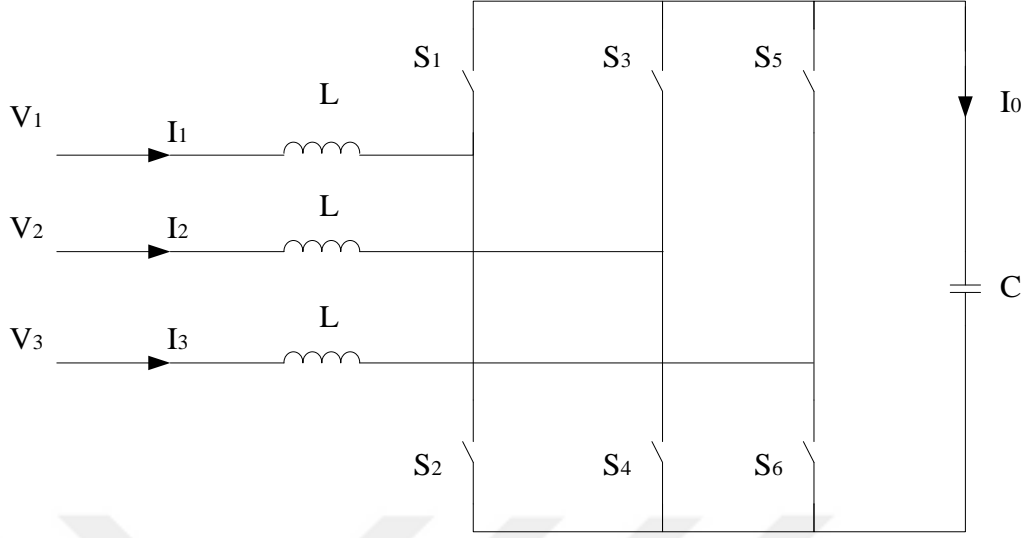
D-STATCOM'un geçici bozulmalara karşı cevabı çok hızlıdır. Bunun yanında, D-STATCOM'da reaktör ve kondansatör grupları kullanılmadığı için rezonans noktası oluşturma potansiyelleri yoktur. D-STATCOM'da reaktör ve kondansatör grupları olmadığından küçük bir kurulum alanı gerektirirler. Şekil 4.4'de D-STATCOM'un V-I karakteristiği verilmiştir. Şekil 4.4'e göre, D-STATCOM'un düşük gerilimlerde dahi akım sağlama kapasitesinin iyi olduğu ve D-STATCOM'un belirli aralıklarda güç sistemine hem endüktif hem de kapasitif akım sağlayacağı görülmektedir. Ayrıca D-STATCOM endüktif ve kapasitif çalışma bölgelerinin her ikisinde de arttırılmış geçici bir orana sahiptir. Kapasitif bölgede maksimum ulaşılabilir geçici aşırı akım GKK'de kullanılan anahtarlama elemanlarının maksimum akım kesme yetenekleri ile tanımlanır [2].



Şekil 4.4. D-STATCOM V-I karakteristiği

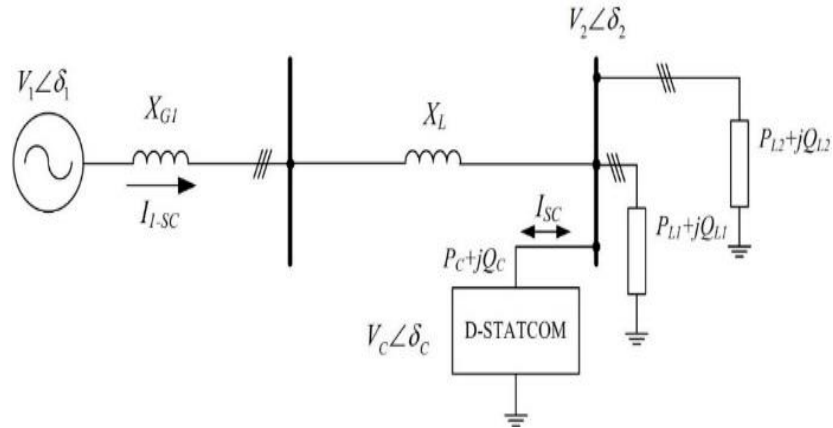
#### 4.1. D-STATCOM'un Çalışma Prensibi

D-STATCOM genel olarak kondansatör kullanılan gerilim kaynaklı eviriciden oluşmaktadır. Şekil 4.5'de GKK ile gerçekleştirilen D-STATCOM'un yapısı verilmiştir. GKK DA gerilimindeki dalgalanmaları düzenlemek ve enerji depolamak için DA kondansatörü kullanmaktadır. Evirici kısmındaki S anahtarlama elemanları DGM sayesinde istenilen frekansta çıkış gerilimi elde edilir. Konvertör kısmı ise kondansatörün şarj olması için AA gerilimi doğrultarak kondansatörün şarj olmasını sağlar [34].



Şekil 4.5. GKK gerçekleşen D-STATCOM yapısı

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 hattınının sonunda dağıtım barasına eklenmiştir. Bununla ilgili D-STATCOM'un eşdeğer devresi Şekil 4.6'da 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 [7].



Şekil 4.6. D-STATCOM'un tek faz eşdeğer devresi



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 alışverişi 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 [5]. 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 [35]. Şekil 4.7'de verilen fazör diyagramlarını kullanarak kaynak gerilimi aşağıdaki gibi yazılır;

$$\vec{V}_s = \vec{V}_c + \vec{V}_r + \vec{V}_x \quad (4.1)$$

$$\vec{V}_x = jXI \quad (4.2)$$

$$\vec{V}_r = RI \quad (4.3)$$

$$V_s - V_c \cos \delta = I(R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (4.4)$$

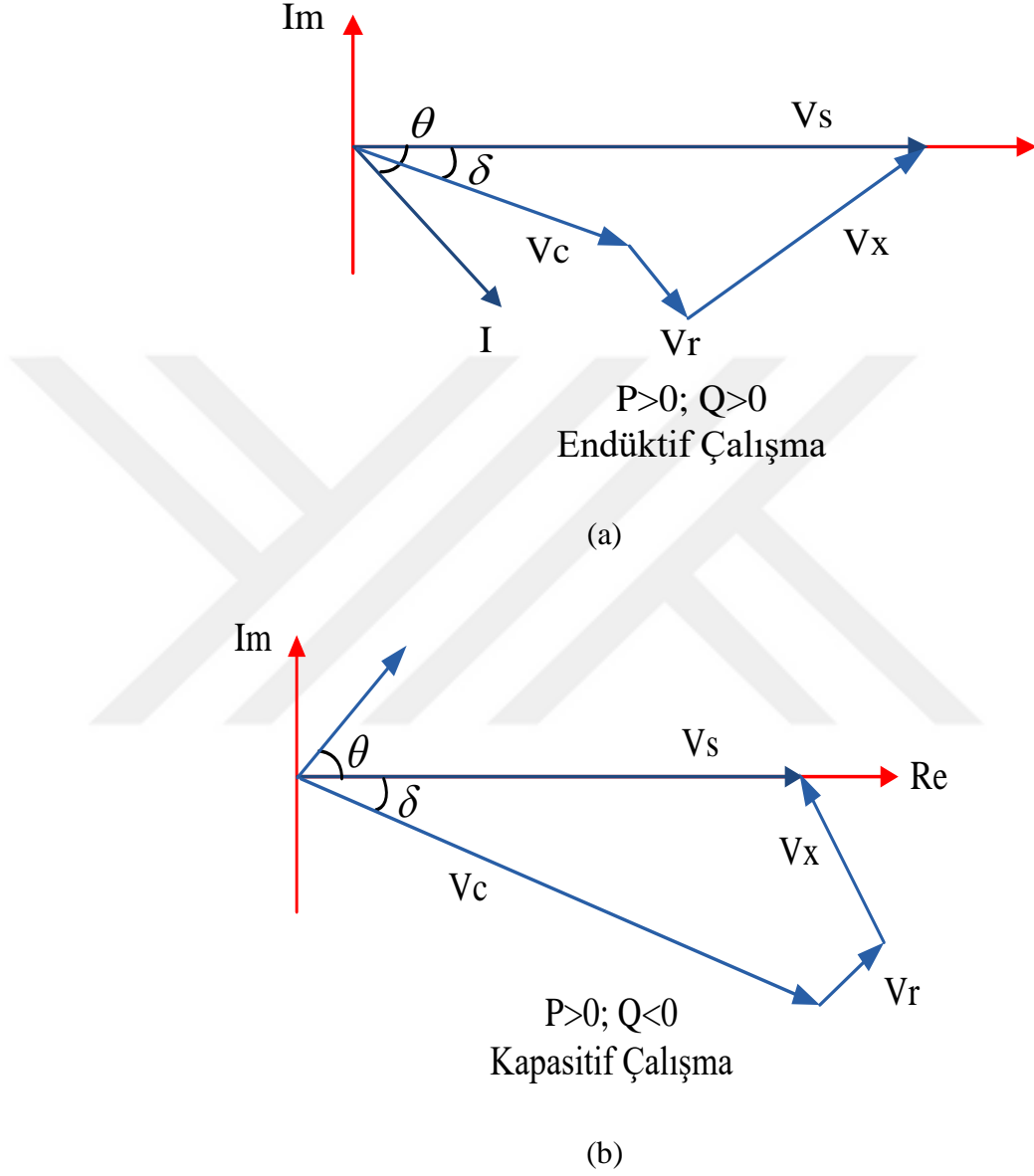
$$V_c \sin \delta = I(X \cos \theta - R \sin \theta) \quad (4.5)$$

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 endüktansı ve evirici kayıplarını temsil eden direnci,  $L$  bağlantı endüktansının kaçak endüktansını,  $V_c$  evirici faz nötr gerilimini,  $\delta$  ise  $V_s$  ile  $V_c$  gerilimleri arasındaki faz açısını ifade etmektedir. D-STATCOM'un aktif ve reaktif gücü ise;

$$P = V_s I \cos \theta \quad (4.6)$$

$$Q = V_s I \sin\theta \quad (4.7)$$

eşitlikleri ile hesaplanır.



Şekil 4.7. Sürekli durumda D-STATCOM'un fazör diyagramları (a) endüktif çalışma (b) kapasitif çalışma

Reaktif güç X ve R cinsinden yazıldığında;

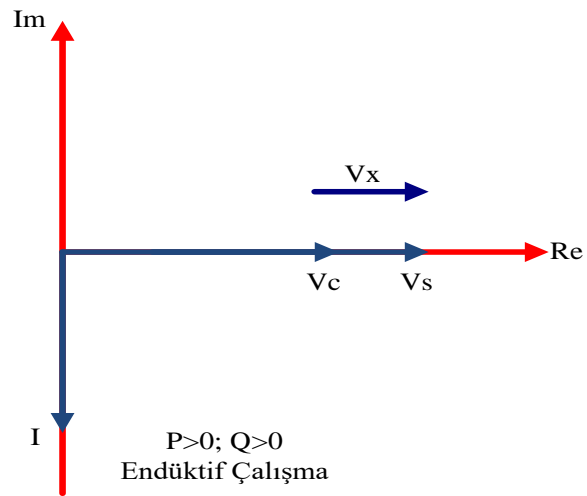
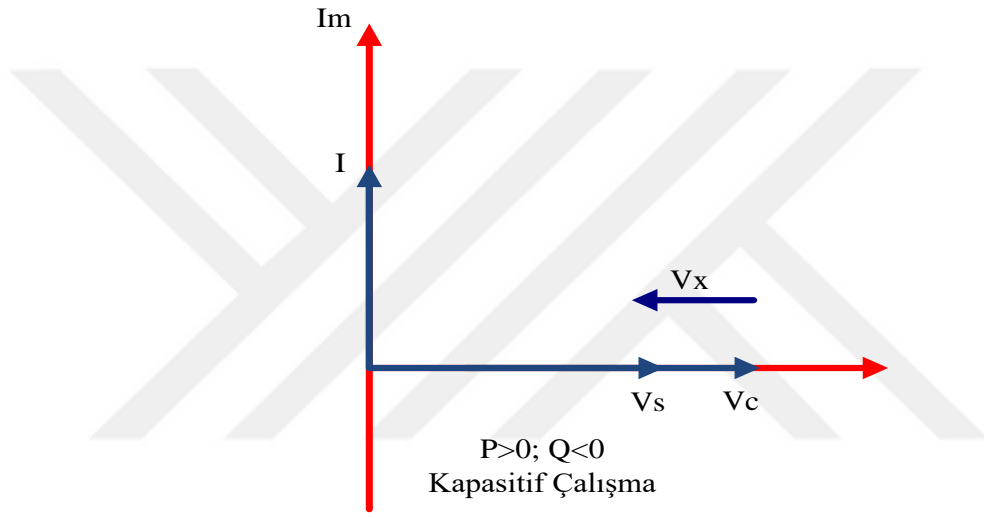
$$Q = V_s \frac{V_s - V_c \cos\delta}{R \cos\theta + X \sin\theta} \sin\theta \quad (4.8)$$

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.

$$P = 0 \quad (4.9)$$

$$Q \cong V_s \frac{V_s - V_c}{X} \quad (4.10)$$

İdeal durumda ( $R=0$ ) fazör diyagramları Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. İdeal durum için D-STATCOM’un fazör diyagramları (a) kapasitif durum (b) endüktif durum

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

- Modülasyon oranını 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.

## 4.2. D-STATCOM Tasarım İlkeleri

### 4.2.1. DA hat kondansatör büyüklüğünün hesabı

DA hat kondansatörünün görevi, DA hat geriliminin kontrolcü tarafından belirlenen referans değerinde, sabit ve eşit kalmasını sağlamaktır. Kondansatör büyüklüğünün hesaplanmasında, gerilim düşümünün azaltılabilmesi için uygun bir DA kondansatör aralığı gereklidir. Gerilim düşümünde, D-STATCOM'a reaktif güç enjekte edebilmek için DA kondansatörü kullanılır. Benzetim çalışmasındaki yüklerin endüktif olmasından dolayı  $C_{DA}$ 'nın değerini değiştirebileceğinden harmonik etkiler hesaba katılmalıdır [11].

Üç fazlı sistemde harmonik oranı azaltmak için gerekli DA kondansatör değeri Denklem 4.11 kullanılarak bulunur.

$$C_{DA} = 3 \frac{V_S \cdot \Delta I_L \cdot T}{V_{CMAX}^2 - V_{DA}^2} \quad (4.11)$$

Burada;  $V_S$  faz tepe gerilimi,  $T$  bir çevrim akım ve gerilim periyodu,  $V_{CMAX}$  kondansatörün tepe gerilimi,  $V_{DA}$  kondansatör gerilimi ve  $\Delta I_L$  gerilim değişim anındaki yük akımıdır.  $V_{CMAX}$  değeri  $C_{DA}$ 'nın üst sınırıdır ve  $V_{DA}$ 'nın iki veya üç katıdır. Sistemdeki gerilim düşmesi veya yükselmesi ve bu şartlar altında DA bağlantı gerilimini kontrol etmek adına da DA kondansatörünün büyüklüğü seçilebilir. Kontrolcünün  $n$  periyottan sonra çalıştığını kabul edersek, bu durumda DA kondansatörünün büyüklüğü Denklem 4.12'ye göre hesaplanır [11].

$$\frac{1}{2} C_{DA} [V_{CMAX}^2 - V_{DA}^2] = n \cdot S \cdot T \quad (4.12)$$

Başka bir ifadeyle;

$$C_{DA} = \frac{2.n.S.T}{\left[ V_{CMAX} - V_{DA}^2 \right]} \quad (4.13)$$

Burada;  $V_{DA}$ ,  $V$  geçişleri sırasında maksimum gerilim değişimi,  $T$  sistem zaman periyodu ve  $S$  yük derecelendirilmesidir.

#### 4.2.2. Bağlantı reaktörü büyüklüğünün hesabı

Şebeke bağlantılı eviricilerde, çıkış filtreleri önemli ve temel bir bileşen olmuştur. Bu filtreleri kullanmadan şebekeye güç aktarmak mümkün değildir. Şebekeye bağlı eviricilerde, şebekeye aktarılan akımların THD oranları %5'in altında olması gerekir. Bu amaç için Şekil 4.9'da verilen çıkış filtrelerinden L, LC, LCL ve LLCL çıkış filtreleri kullanılır [36]. Filtre tasarımlarında, literatürde kabul görmüş kriterler ortaktır ve aşağıdaki gibidir.

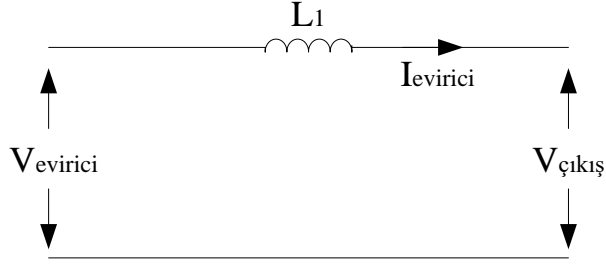
1. DA bara geriliminin çok artmasını önlemek ve anahtarlama kayıplarını düşük tutmak için filtrede düşen gerilimin şebeke faz geriliminin %10'dan fazla olmamalıdır.
2. Güç faktörü %99,5'den fazla olmalıdır.
3. "IEEE STD 519-1992 akım harmonikleri standardı olan %5 THD sağlanmalıdır. Bu standart yüksek güç değerleri için  $I_{SC} / I_L < 20$  ( $I_{SC}$ , maksimum kısa devre akımının,  $I_L$  maksimum yük akımı değerinin 20 katından düşük olduğu) durumlarda sağlanmalıdır [36].

Bağlantı reaktörü büyüklüğü hesaplanırken iki önemli parametre dikkate alınır. Birincisi, bağlantı reaktörü üzerine düşmesi istenilen gerilim değeridir. İkincisi ise giriş akımında izin verilen maksimum harmonik akımdır.

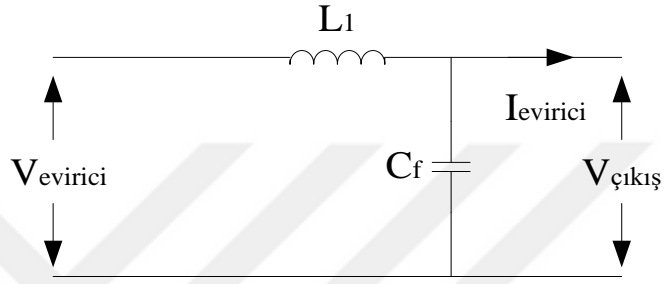
İlk durum için reaktör büyüklüğünün endüktans değeri Denklem 4.14'e göre hesaplanır.

$$L_R = \Delta V_R \frac{I}{4.A_{\dot{U}}.f_t} \quad (4.14)$$

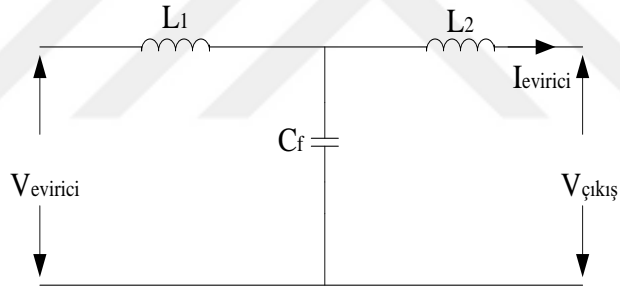
Burada;  $\Delta V_R$ , reaktör üzerinde beklenen maksimum gerilim düşümü,  $A_{\dot{U}}$  üçgen kontrol dalga şeklinin genliği ve  $f_t$  ise üçgen dalga şeklinin frekansdır.



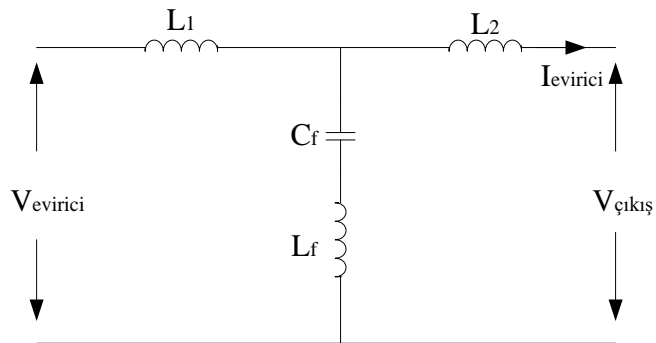
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.9. Şebekeye bağlı eviricilerde kullanılan çıkış filtreleri (a) L filtre (b) LC filtre (c) LCL filtre (d) LLCL filtre

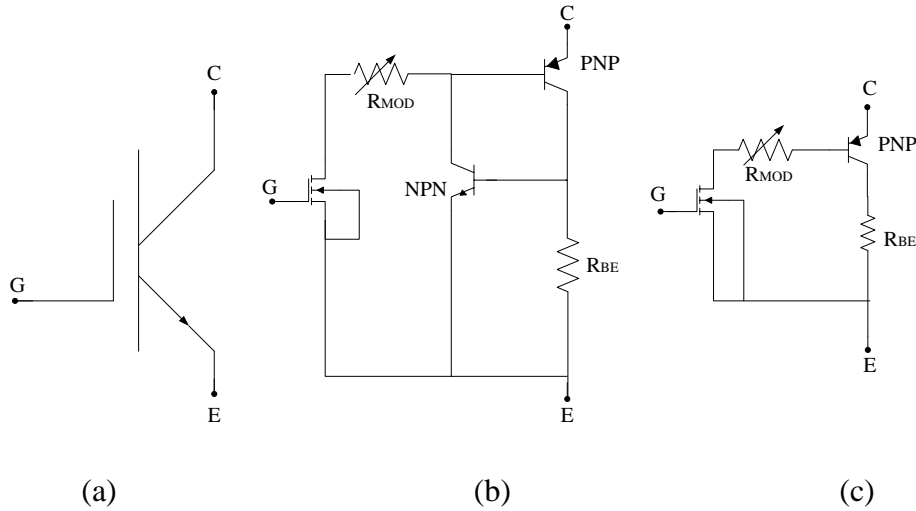
İkinci durum için reaktörün büyüklüğü ise Denklem 4.15'e göre hesaplanır.

$$X_R = \frac{I}{THD_i} \sqrt{\sum_{k \neq 1}^{\infty} \frac{(V_{ak})^2}{k^2}} \quad (4.15)$$

Burada;  $THD_i$ , evirici giriş akımında izin verilen maksimum harmonik bozulma,  $V_{ak}$  evirici giriş gerilimi harmonik bileşeni ve  $k$  ise harmonik bileşenin derecesidir.

#### 4.2.3. Anahtarlama elemanı (IGBT)

IGBT'ler, MOSFET'lerin ve BJT'lerin avantajlı özelliklerini birleştiren anahtarlama elemanlardır. IGBT'ler, BJT'ler gibi düşük iletim durumu kayıplarına, MOSFET'ler gibi yüksek giriş empedansına sahiptirler. IGBT'nin yapısı, bir MOSFET yapısını andırır. Tek farkı  $p^+$  taban katmanıdır. IGBT'nin sembolü, eşdeğer devresi ve sadeleştirilmiş devresi Şekil 4.10'da verilmiştir. IGBT'nin yapısında PNPN şeklinde dört katman vardır. MOSFET'ler de olduğu gibi IGBT de bir gerilim kontrollü elemandır. Kapı gerilimi yeterince pozitif yapıldığında, elektronlar geçide doğru çekilerek  $p$  bölgesi içinde,  $n^-$  epi ve  $n^+$  bölgelerini birleştirecek bir kanal oluşturulur. Böylece eleman iletime geçer. Kapı gerilimi eşik değer altına düşürülünce kanal ortadan kalkar ve eleman kesime girer. IGBT'nin anahtarlama ve iletim kayıpları MOSFET'in kayıplarına göre çok düşüktür. Ayrıca BJT'ye göre çok daha hızlı tepki verirler. IGBT'lerin anma gerilimi ve akımı 6500V, 2400A, anahtarlama hızı da 20kHz gibi olabilir [26].



Şekil 4.10. IGBT'nin (a) sembolü (b) eşdeğer devresi (c) sadeleştirilmiş devresi

#### 4.2.4. DA hat gerilim değerinin hesabı

Ortak bağlantı noktasındaki, gerilim değerine bağlı olarak DA hat gerilimi değişir. DA hat geriliminin genliği, şebeke geriliminin genliğinden daha büyük olmalıdır. Aksi halde eviricinin DGM bölümü başarısız olur [37]. DA hat gerilimi üç fazlı bir evirici için Denklem 4.16'ya göre hesaplanır.

$$V_{DA} = 2\sqrt{2} \frac{V_{ff}}{\sqrt{3}M_{Bek}} \quad (4.16)$$

Burada;  $V_{ff}$ , D-STATCOM'un çıkış fazlar arası gerilim değeri ve  $M_{Bek}$  ise D-STATCOM'un reaktif güç alış verişi yapmadığı andaki modülasyon oranıdır.

#### 4.3. D-STATCOM Kontrol Teknikleri

D-STATCOM'un temel çalışma prensibi senkron makinanın çalışma prensibine benzer. Senkron makine uyarıldığında gecikmeli akım ve aşırı uyarıldığında önde gelen akım sağlayacaktır. Senkron makine gibi D-STATCOM'da şebekeye reaktif güç üretebilir veya şebekeden reaktif güç çekebilir. Ayrıca harici bir DA kaynağı sağlanırsa aktif güç alışverişi de yapabilir [38].

- Reaktif güç değişimi: GKK'nin çıkış gerilimi şebeke geriliminden yüksek ise D-STATCOM kondansatör olarak çalışacak ve reaktif güç üretecektir [38].
- Aktif güç değişimi: anahtarlama elamanlarında, anahtarlama kayıpları olduğu için DA kondansatörlerin anahtarlama elamanlarına gerekli aktif gücü sağlaması gerekir. Dolayısıyla, doğrudan gerilim kontrollü durumunda kondansatör geriliminin sabit olması için AA sistemi ile aktif güç değişimine ihtiyaç vardır. Dağıtım sisteminde gerilim düzenlenmesi için kullanılan D-STATCOM'un yapısında harici DA kaynağı varsa, AA sistemi ile aktif güç alışverişi yapar [38].

D-STATCOM reaktif güç kompanzasyonu için yükün gerektirdiği şekilde reaktif güç sağlar. Kaynak tarafından sadece aktif güç sağlandığından kaynak referans akımı dengelenerek yk dengelenmesi sağlanır. D-STATCOM dağıtım hattının herhangi bir yerinde veya hat sonunda kullanılarak, sistemin reaktif güç kontrolü, g faktörünün iyileştirilmesi ve gerilim regülasyonu yapılır. Ayrıca D-STATCOM, IEEE-519 standartlarına göre kaynak akımındaki veya kaynak gerilimindeki dengesizliği veya bozulmaları ortadan kaldırır. D-STATCOM çok işlevli bir cihaz olduğundan, D-



STATCOM için kullanılan kontrol tekniğinin de esnek ve kolay uygulanabilir olması gerekir [38].

Uygulanan kontrol tekniği, ortak bağlantı noktasında (OBB) üç faz dengeli gerilim dalga formunu yeterli genlik, düşük THD ile sentezlemeyi ve ayrıca DA bara kondansatörlerinin gerilimini düzenlemeyi amaçlamaktadır. D-STATCOM'un herhangi bir kontrol algoritmasının uygulanmasında ortak adımlar aşağıdaki gibidir [39];

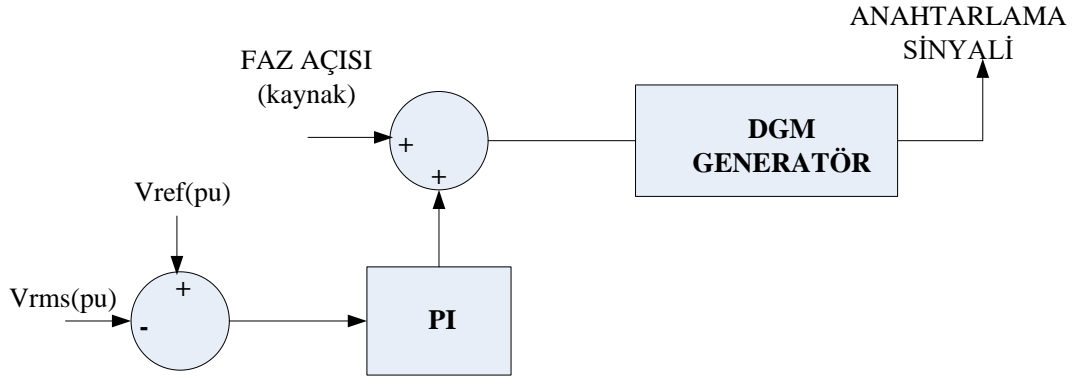
- OBB'de gerilim ve akımın ölçülmesi
- İşaret işleme
- Referans sinyallerinin hesaplanması
- GKK için kapı işaretlerinin üretimi

D-STATCOM kontrolünde DGM anahtarlama içeren kontrol algoritmaları uygulanmaktadır. Aşağıda bu kontrol metodları verilmiştir [38].

- Faz kaydırma kontrolü
- Ayrılmış akım kontrolü (p-q teorisi)
- AA bara ve DA bağlantı gerilimlerinin düzenlenmesi
- Senkron referans çerçevesi (SRF) yöntemi

#### 4.3.1. Faz kaydırma kontrolü

Bu kontrol tekniğinde, D-STATCOM'da gerilim regülasyonu yük noktasında rms geriliminin ölçülmesi ile elde edilir ve reaktif güç ölçümlerine gerek yoktur. Şekil 4.11, uygulanan şemanın blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 4.11. Faz kaydırma kontrolü blok diyagramı

Bu yöntemde, basit bir sinüzoidal DGM tekniği kullanılmıştır. Ölçülen sistem rms gerilimi ile referans gerilimi karşılaştırılarak elde edilen hata sinyali, GKK'nin çıkış gerilimi ile AA sistem gerilimi arasındaki gerekli faz kaymasına karar veren açığı üreten bir PI kontrolcüsünü besler. Bu açı DGM'nin çalışması için gerekli olan senkronizasyon sinyalini üretmek üzere 120 derecede eşit aralıklı olduğu kabul edilen dengeli kaynak gerilimlerinin faz açıları ile toplanır. Bu kontrol tekniğinde DA gerilimi ayrı bir DA kaynağı kullanılarak sabit tutulur [38].

#### 4.3.2. Ayrılmış akım kontrolü (p-q teorisi)

Bu kontrol metodunda, üç fazlı gerilim ve akımın anlık değerlerinin ölçülmesi gerekir. Şekil 4.12'de kontrol şemasının blok diyagramı gösterilmektedir. Anlık reaktif güç teorisi kullanılarak dengeli üç fazlı bir sistem için gerilimin dörtlü bileşeni her zaman sıfırdır. D-STATCOM tarafından sisteme sağlanan aktif (p) ve reaktif (q) güç d-q çerçevesinde Denklem 4.17 ile ifade edilir [38].

$$p = v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q \quad \text{ve} \quad q = v_q \cdot i_d - v_d \cdot i_q \quad (4.17)$$

$V_q=0$  olduğundan, sistem gerilimi sabit kaldığında D-STATCOM tarafından üretilen aktif ve reaktif güçlerin anlık değerleri  $i_d$  ve  $i_q$  tarafından belirlenir. Bundan dolayı ölçülen anlık üç fazlı abc akımları dq0 eksenine dönüştürülür. Ayrılmış d eksen bileşeni  $i_d$  ve q eksen bileşeni  $i_q$ , iki ayrı PI kontrolcü tarafından düzenlenir. DA geriliminin ve ölçülen AA sistem geriliminin kontrol edilmesiyle anlık  $i_d$  referansı ve anlık  $i_q$  referansı elde edilir. Böylece, anlık akım dört PI izleme kontrolcü kullanılarak elde edilir. Ayrıca bir faz kilitli döngü (PLL), abc ile dq0 referans çerçevesinde çalışacak kontrol döngüsünü AA kaynağı ile senkronize etmek için kullanılır. Dolayısıyla anlık aktif ve reaktif güçler, bir ortalama ve bir salınım bileşenleri olmak üzere ayrılabilir. Bileşenler Denklem 4.18'de gösterildiği gibi ifade edilir [38].

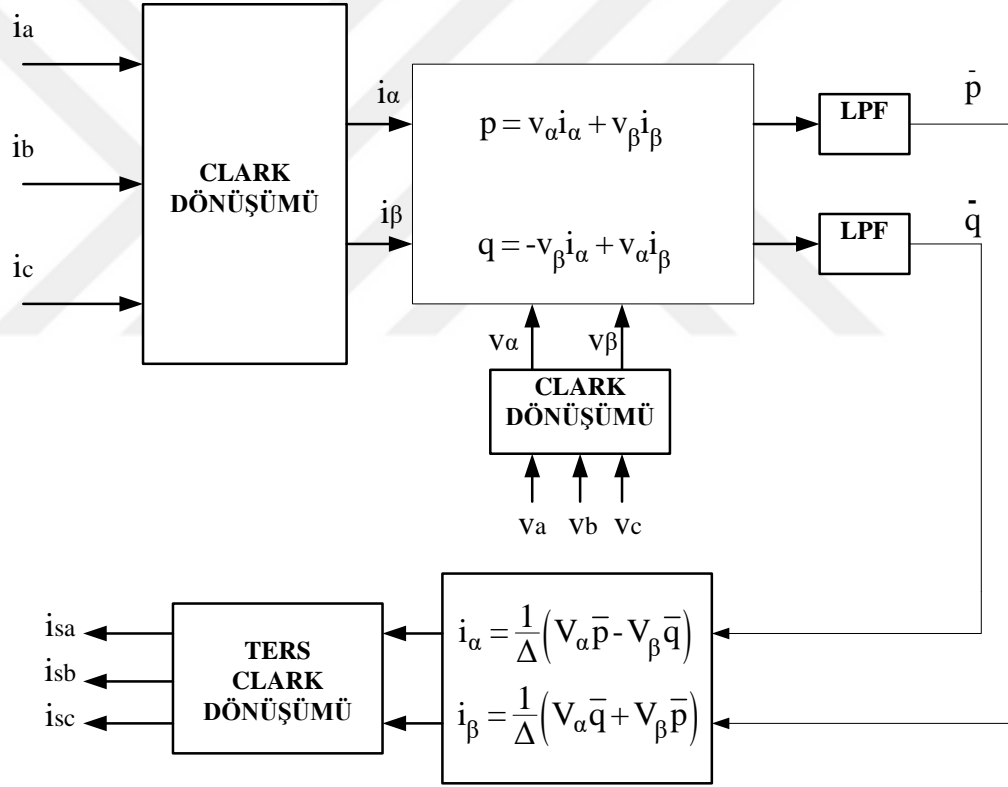
$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad \text{ve} \quad q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (4.18)$$

Burada;  $\bar{p}$  ve  $\bar{q}$  anlık aktif ve reaktif gücün ortalama,  $\tilde{p}$  ve  $\tilde{q}$  ise salınımsal bileşenleridir. Anlık reaktif gücün ve anlık aktif gücün salınım bileşenini telafi etmek için dengeleme akımları hesaplanır. Bu durumda kaynak sadece aktif gücün ortalama bileşenini iletir. Sonuç olarak referans kaynak akımları  $i_{s\alpha}$  ve  $i_{s\beta}$ ,  $\alpha$ - $\beta$  koordinat sisteminde Denklem 4.19 elde edilir [38].

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Bu akımların a-b-c koordinatlarındaki referans akımlarını bulmak içinde Denklem 4.20 kullanılır.

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

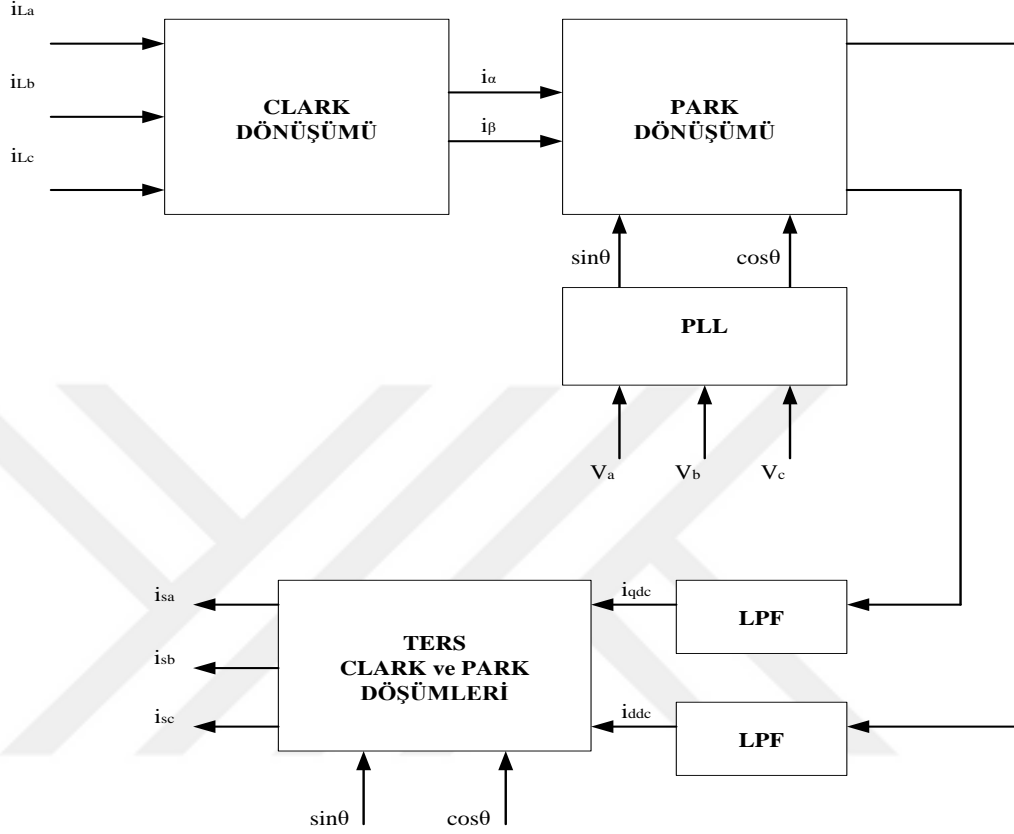


Şekil 4.12. D-STATCOM'un ayrıştırılmış teori tabanlı kontrol blok şeması

### 4.3.3. Senkron referans çerçevesi (SRF) yöntemi

Senkron referans çerçeve yöntemi, akımların senkron olarak dönen d-q çerçevesinde dönüştürülmesine dayanır. Şekil 4.13'te yöntemin temel yapısını açıklamaktadır. Eğer dönüşüm açısı  $\theta$  ise,  $\alpha$ - $\beta$ 'dan d-q'ya akım dönüşümü Denklem 4.21 ile hesaplanır [38].

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.21)$$



Şekil 4.13. Senkron referans yöntemi blok şeması

SRF izolatörü, ortalama 100 Hz’de düşük geçiş filtreler (LPF) ile her  $i_d$  ve  $i_q$  için DA bileşenlerini çıkarır. Elde edilen DA bileşenleri  $i_{dda}$  ve  $i_{qda}$ , Denklem 4.22’de gösterildiği gibi  $\alpha$ - $\beta$  formuna geri dönüştürülür. Sonrasında a-b-c koordinatlarında üç fazlı referans akımları elde etmek için dönüşüm yapılır. Ayrıca reaktif güç telafisi, referans akımları hesaplamak için  $i_q$  bileşeni sıfır kabul edilerek de sağlanabilir [38].

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha da} \\ i_{\beta da} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dda} \\ i_{qda} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

#### 4.3.4 Şebeke ve DA bağlantı geriliminin düzenlenmesi

Bu kontrol metodu çok kullanışlı olup güç faktörünün düzeltilmesi, gerilim düzenlenmesine ek olarak yük dengeleme ve harmonik bastırma için etkili bir şekilde kullanılabilir. Üç fazlı AA sistem gerilimleri ve DA bağlantı gerilimleri algılanır ve bu

gerilimler, çıkışları D-STATCOM tarafından üretilecek referans reaktif ve aktif akımın genliğine karar veren iki PI kontrolcüsünü besler. Sistemin blok şeması Şekil 4.14'de gösterilmiştir [38].

Kaynak gerilim büyüklüğü ( $V_t$ ), Denklem 4.23 şeklinde hesaplanır.

$$V_t = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2)} \quad (4.23)$$

Burada;  $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  kaynak gerilim değerleridir.

Kaynak geriliminin faz bileşenleri Denklem 4.24 ile ifade edilir.

$$V_{da} = \frac{V_a}{V_t} \quad V_{db} = \frac{V_b}{V_t} \quad V_{dc} = \frac{V_c}{V_t} \quad (4.24)$$

Kaynak geriliminin karesel bileşenleri her faz için sırasıyla Denklem 4.25, Denklem 4.26 ve Denklem 4.27 ile elde edilir [40].

$$V_{qa} = \frac{-V_{db}}{\sqrt{3}} + \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (4.25)$$

$$V_{qb} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{da} + \frac{V_{db} - V_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (4.26)$$

$$V_{qc} = -\frac{\sqrt{3}}{2} V_{da} + \frac{V_{db} - V_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (4.27)$$

Burada;  $V_{da}$ ,  $V_{db}$  ve  $V_{dc}$  kaynak geriliminin faz bileşenleri olup,  $V_{qa}$ ,  $V_{qb}$  ve  $V_{qc}$  ise kaynak geriliminin karesel bileşenleridir.

Bir oransal integral (PI) kontrolcü kullanılarak referans yük akımlarının faz bileşenlerinin anlık değerleri DA geriliminin ( $V_{da}$ ), D-STATCOM ve referans DA geriliminin ( $V_{daRef}$ ) ortalama değeri üzerinden hesaplanır. Referans yük akımlarının faz bileşenleri sırasıyla Denklem 4.29, Denklem 4.30 ve Denklem 4.31 ile ifade edilir [40].

$$I_{sd} = K_{pd} (V_{daRef} - V_{da}) + K_{id} V_{daer} \quad (4.28)$$

$$I_{sad} = I_{sd} V_{da} \quad (4.29)$$

$$I_{sbd} = I_{sd} V_{db} \quad (4.30)$$

$$I_{scd} = I_{sd} V_{dc} \quad (4.31)$$

Burada;  $I_{sad}$ ,  $I_{sbd}$  ve  $I_{scd}$  referans yük akımlarının faz bileşenlerinin anlık değerleri olup,  $V_{da}$  DA gerilimini,  $V_{daRef}$  ise DA geriliminin referans değerini ifade etmektedir.

PI kontrolcü kullanılarak referans yük akımlarının karesel bileşenlerinin büyüklüğü, kaynak gerilim genliği ( $V_t$ ) ve referans değeri ( $V_{tRef}$ ) üzerinden hesaplanır. Referans yük akımlarının karesel bileşenleri sırasıyla Denklem 4.33, Denklem 4.34 ve Denklem 4.35 ile elde edilir [40].

$$I_{sq} = K_{pq} (V_{tRef} - V_t) + K_{iq} V_{ter} \quad (4.32)$$

$$I_{saq} = I_{sq} V_{qa} \quad (4.33)$$

$$I_{sbq} = I_{sq} V_{qb} \quad (4.34)$$

$$I_{scq} = I_{sq} V_{qc} \quad (4.35)$$

Burada;  $I_{saq}$ ,  $I_{sbq}$  ve  $I_{scq}$  referans yük akımının karesel bileşenleridir.  $V_t$  kaynak geriliminin genliği,  $V_{tRef}$  ise kaynak geriliminin referans değeridir.

Üç faz anlık referans yük akımları ( $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$ ,  $I_{sc}$ ), yük akımlarının faz bileşenleri ( $I_{sad}$ ,  $I_{sbd}$ ,  $I_{scd}$ ) ve karesel bileşenlerinin ( $I_{saq}$ ,  $I_{sbq}$ ,  $I_{scq}$ ) toplamı ile elde edilir. Üç faz anlık referans yük akımları sırasıyla Denklem 4.36, Denklem 4.37 ve Denklem 4.38 ile ifade edilmiştir [40].

$$I_{sa} = I_{saq} + I_{sad} \quad (4.36)$$

$$I_{sb} = I_{sbq} + I_{sbd} \quad (4.37)$$

$$I_{sc} = I_{scq} + I_{scd} \quad (4.38)$$

GKK'nin anahtarlama IGBT sinyallerini üretmek için temel yük akımı histerezis akım kontrolündeki referans akımı ile karşılaştırılır ve Denklem 4.39, Denklem 4.40 ve Denklem 4.41 elde edilir [40].

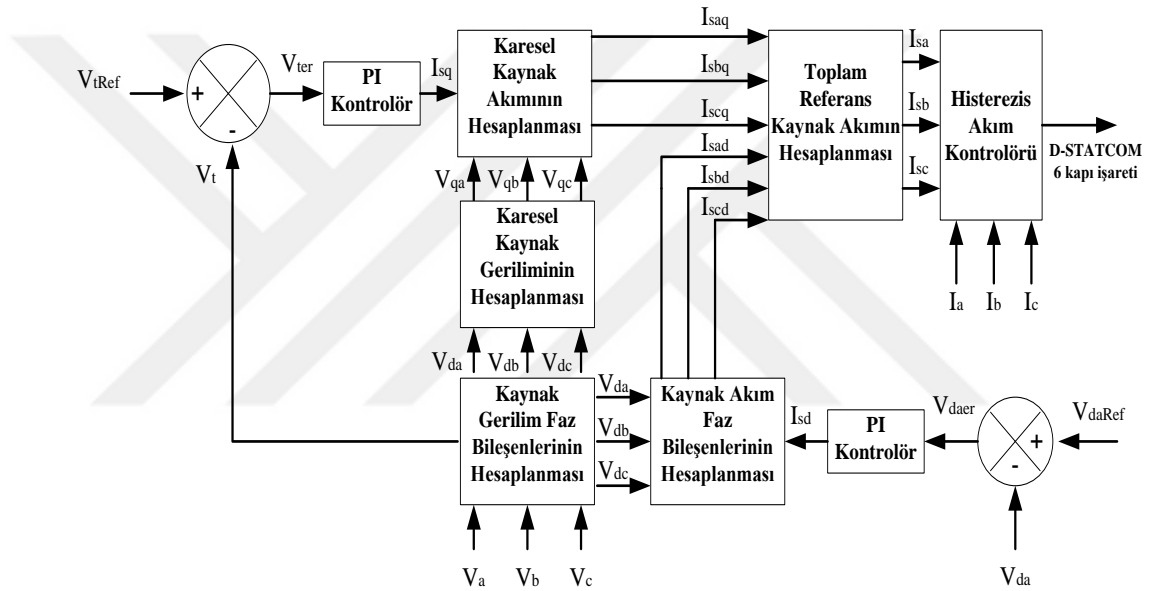
$$I_{sae} = I_{sa} - I_a \quad (4.39)$$

$$I_{sbe} = I_{sb} - I_b \quad (4.40)$$

$$I_{sce} = I_{sc} - I_c \quad (4.41)$$

Burada;  $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$  ve  $I_{sc}$  anlık referans yük akımlarıdır.  $I_a$ ,  $I_b$  ve  $I_c$  ise temel yük akımlarıdır.

Bu kontrolcü, 'h' değerine sahip histerezis band olarak adlandırılan bir battan oluşur. Referans kaynak akımı kullanılarak üretilen hata değeri '+h'yi aştığında sinyaller GKK'nin alt anahtar kümesine verilir. Benzer şekilde, üretilen hata '-h'dan daha az olduğunda ise GKK'nin üst anahtar kümesine verilir [40].



Şekil 4.14. Şebeke ve DA bağlantı geriliminin düzenlenmesi blok şeması

## BÖLÜM 5

### D-STATCOM BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu bölümde evirici tabanlı FACTS cihazlardan biri olan D-STATCOM'un benzetim çalışması yapılmıştır. Öncelikle yapılan benzetim çalışmasının kontrol bloğu tanıtılmış, sonrasında ise D-STATCOM'un şebekede meydana gelen gerilim düşümüne, THD oranına, reaktif güç kompanzasyonuna ve gerilim ile akım arasındaki faz açısına olan etkileri analiz edilmiştir. Benzetimi yapılan D-STATCOM ve dağıtım hattına ait parametreler Tablo 5.1'de verilmiştir.

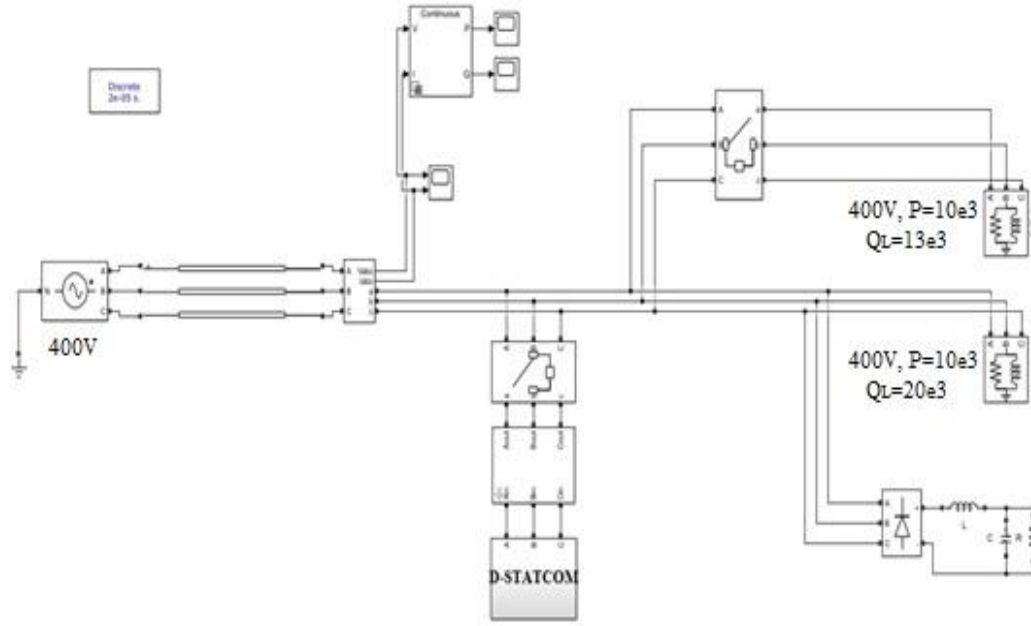
Tablo 5.1. Benzetimi yapılan D-STATCOM'da kullanılan parametreler

Parametre	Değer
Kaynak Gerilimi	400 V
Frekans	50 Hz
Hat Uzunluğu	4 km
Hat Empedansı	$1.6+j0.791$ ohm
RL Yük-1 ( $P_L$ )	10 kw
RL Yük-1 ( $Q_L$ )	20 kVAR
RL Yük-2 ( $P_L$ )	10 kw
RL Yük-2 ( $Q_L$ )	13 kVAR
Kondansatör Gerilimi	500 V
Kondansatör	700 $\mu$ F
Nonlinear Yük (R, L, C)	R=12.5 ohm, L=1 nH, C=1 nF

GKK'nin kontrolünde uzay vektör DGM modülasyon tekniği kullanılmış olup D-STATCOM'un şematik gösterimi Şekil 5.1'de verilmiştir. Burada yükler ve D-STATCOM 4 km'lik dağıtım hattının sonunda ve aynı dağıtım barasın da yer alacak şekilde bağlanmıştır. Şebekedeki gerilim dengesizliğini azaltmak için D-STATCOM şebekeye paralel bağlanmıştır. Kontrol girişi, yük tarafından ölçülen gerilim ile referans gerilim arasında tespit edilen hata sinyalidir.

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





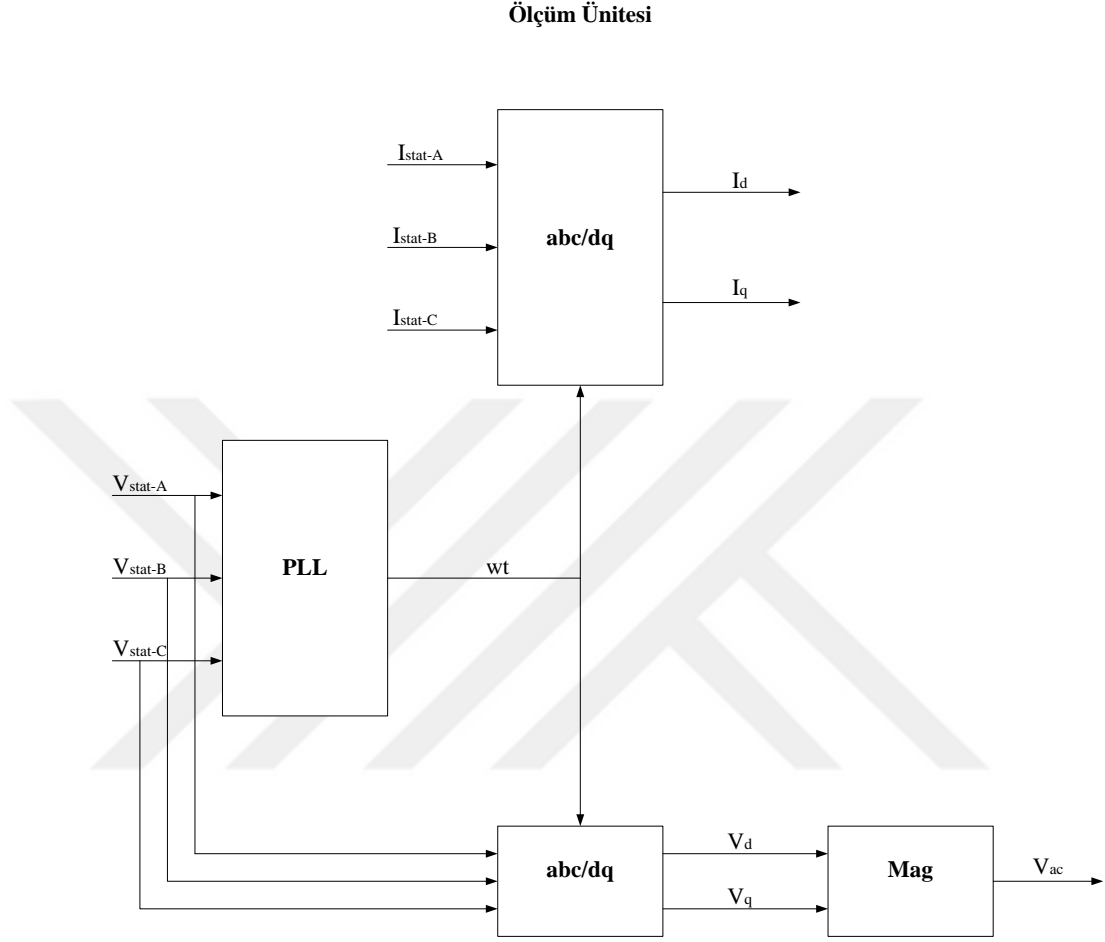
Şekil 5.1. Benzetimi yapılan güç sistemi

### 5.1. D-STATCOM'un Kontrol Bloğu

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 bağlı üç fazlı güç sisteminin devre şeması Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Şekil 5.1'e göre güç sisteminin dağıtım tarafına üç fazlı bir D-STATCOM bağlanmıştır. D-STATCOM'un bünyesinde bulunan üç fazlı evirici, D-STATCOM'da gerilim kaynağı dönüştürücüsü olarak kullanılır. D-STATCOM ve AA sistem arasındaki reaktif güç değişimi D-STATCOM çıkış gerilim büyüklüğüne bağlı olarak gerçekleşir. D-STATCOM'un çıkış gerilimi şebeke geriliminden yüksek ise D-STATCOM AA sistemine reaktif güç sağlar. D-STATCOM'un çıkış gerilimi bağlantı noktasındaki AA sistem geriliminden daha küçük ise reaktif güç AA sistemden D-STATCOM'a doğru akar [41].

D-STATCOM'un ölçüm ünitesi Şekil 5.2'de gösterilmiştir. İlk olarak her bir faz için D-STATCOM'un çıkış gerilim değerleri ölçülür. Ölçümler bir faz kilitli döngü (PLL) devresi tarafından D-STATCOM çıkış gerilimlerinin faz ve frekans değerlerini elde etmek için kullanılır. Sistemin kontrolünü kolaylaştırmak için faz bilgisi kullanılarak üç fazlı gerilim ve akım sinyalleri abc referans çerçevesinden d-q çerçevesine dönüştürülür.

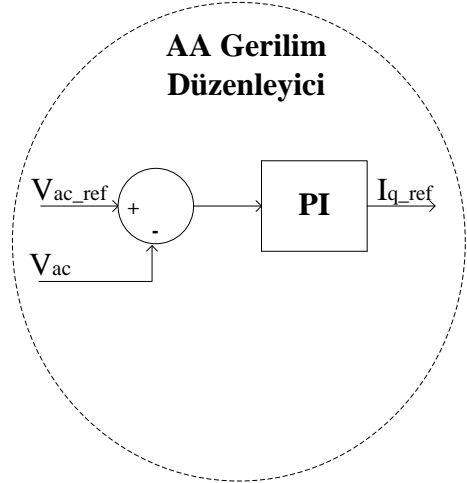
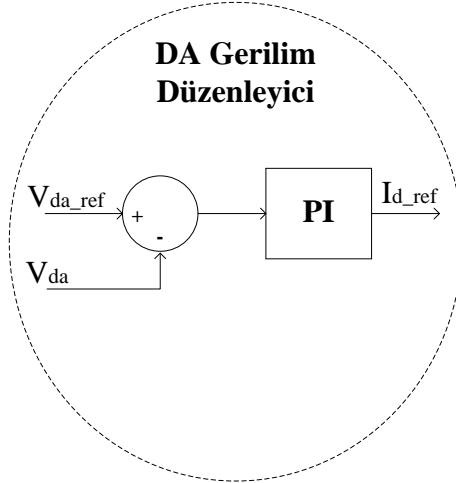
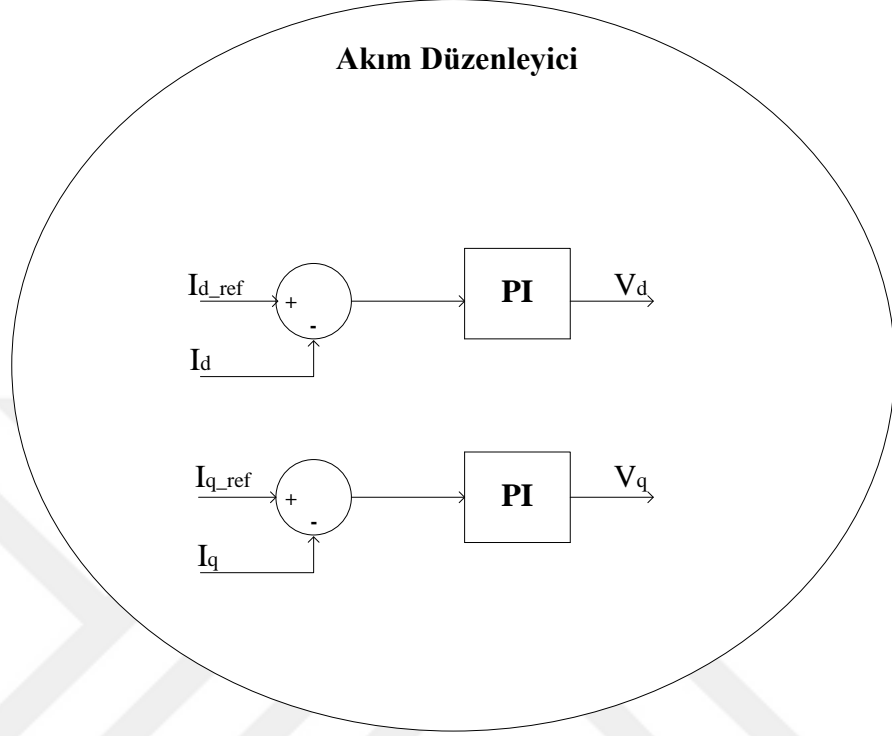
Bu dönüşüm sonrasında, d-q eksenindeki akım değerleri olan  $I_d$  ve  $I_q$  elde edilir. Ayrıca üretilen  $V_d$  ve  $V_q$  sinyalleri AA gerilimi ( $V_{ac}$ ) üretmek için kullanılır.



Şekil 5.2. D-STATCOM ölçüm ünitesi blok diyagramı

D-STATCOM'un evirici kısmında bulunan kondansatörün DA gerilimi ( $V_{da}$ ), DA gerilim düzenleme ünitesindeki bir PI kontrolcü tarafından önceden belirlenmiş bir DA gerilimiyle ( $V_{daref}$ ) karşılaştırılır ve gerekli düzenleme yapılır. Şekil 5.3'de DA gerilim düzenleyici, AA gerilim düzenleyici ve akım düzenleyici blok diyagramları verilmiştir. DA gerilim düzenlemesine benzer şekilde  $V_{ac}$ , AA gerilim düzenleyici ünitesindeki bir PI kontrolcü tarafından bir AA gerilim referansına ( $V_{acref}$ ) göre düzenlenir. DA ve AA gerilim düzenleyici üniteleri ise sırasıyla  $I_{dref}$  ve  $I_{qref}$  akım referanslarını üretirler. Önceden oluşturulan  $I_d$  ve  $I_q$  değerleri, mevcut düzenleyici birimlerinde sırasıyla  $I_{dref}$  ve  $I_{qref}$  değerleriyle düzenlenir. Sonrasında yine PI kontrolcüler kullanılarak d-q çerçevesindeki  $V_d$  ve  $V_q$  gerilimleri üretilir. Son olarak, abc çerçevesindeki gerilim

referanslarından her faz için referans sinyali elde edilerek UVDGM bloğuna işlenmek üzere gönderilir. Bu işlemin sonucunda, üç fazlı evirici için kapı sinyalleri üretilir.

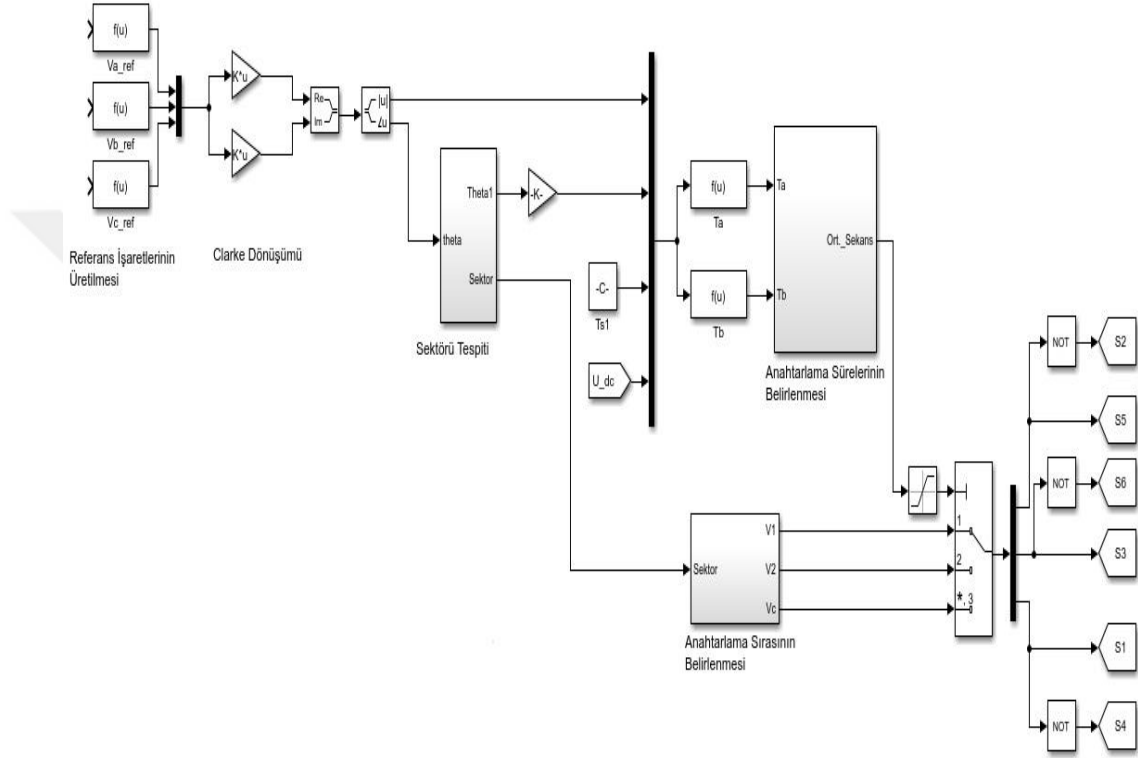


Şekil 5.3. D-STATCOM kontrol blok diyagramı

D-STATCOM'un önceki bölümde anlatılan UVDGM'ye göre geliştirilen simulink kontrol modeli Şekil 5.4'de verilmiştir. Kontrol sisteminde, üç fazlı referans gerilimleri Clarke dönüşümü kullanılarak  $\alpha$  ve  $\beta$  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 Denklem 5.1'deki gibi ifade edilir.

$$\overline{V}_{ref} = V_a + jV_b = \frac{2}{3}(V_a + V_b e^{j2\pi/3} + V_c e^{-j2\pi/3}) \quad (5.1)$$



Şekil 5.4. D-STATCOM UVDGM simulink kontrolcü modeli

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 elemanlarında kullanılacak olan referans akımlar elde edilir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da sırasıyla sektör tespiti ve herhangi bir sektör için anahtarlama sıralarının belirlenmesini gösteren simulink modeli verilmiştir. D-STATCOM'un kontrol bloğu Şekil 5.7'de 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,  $\alpha$ - $\beta$  koordinat sistemlerinde iki faza dönüştürülür. Elde edilen değerler ile anlık gerçek güç Denklem 5.2 ile reaktif güç ise Denklem 5.3 ile hesaplanır.

$$p = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta \quad (5.2)$$

$$q = -V_\beta i_\alpha + V_\alpha i_\beta \quad (5.3)$$

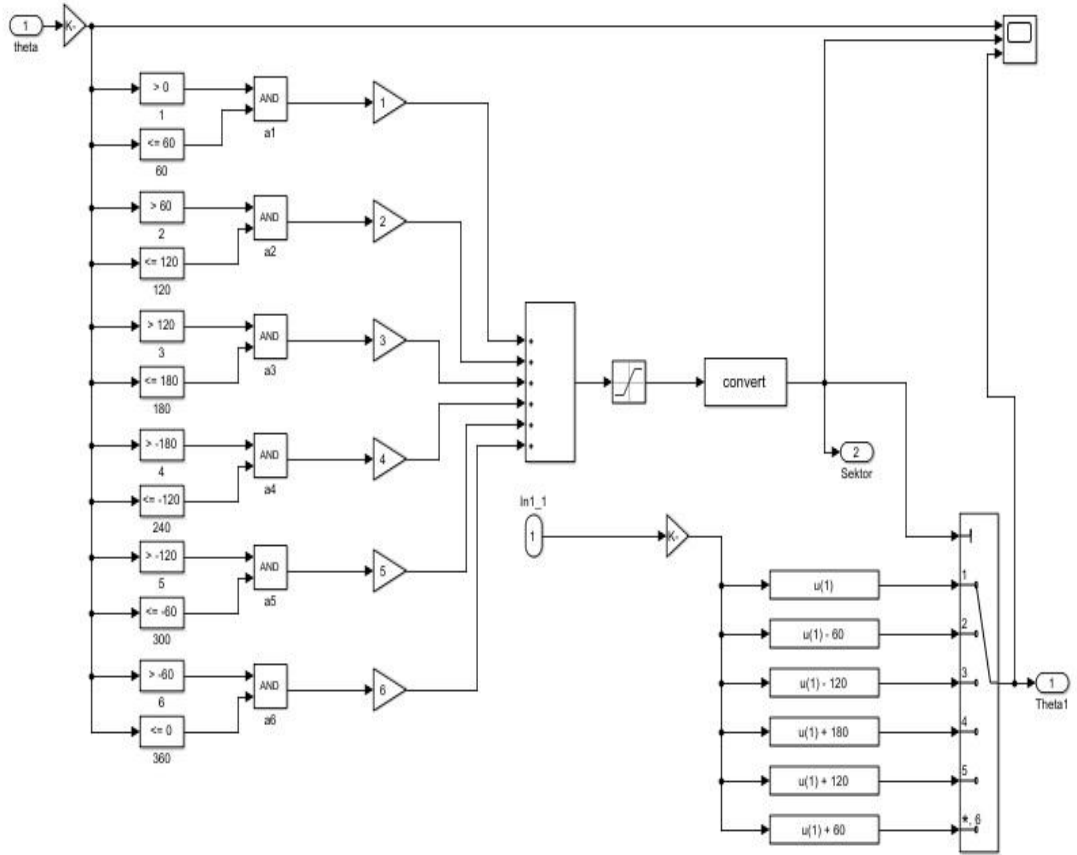
Yukarıda verilen denklemlerin matris gösterimi Denklem 5.4 ile ifade edilir.

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

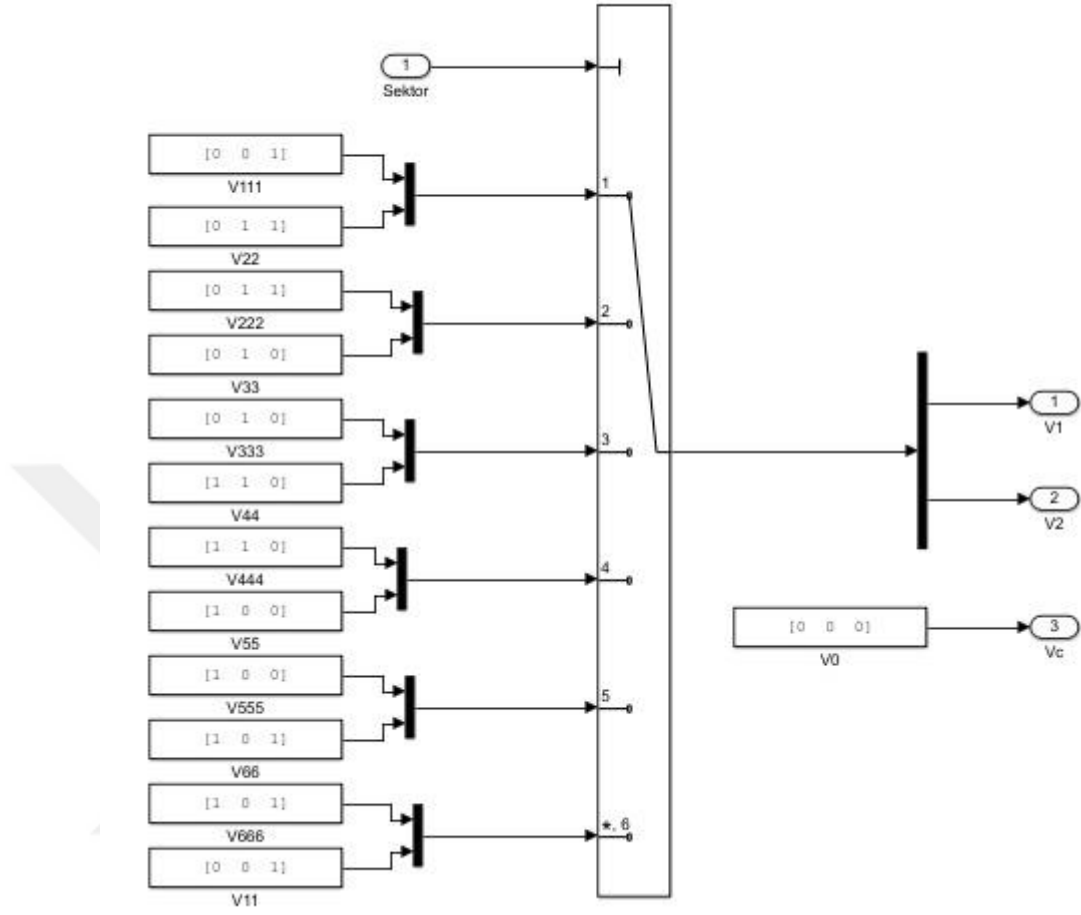
Sonrasında,  $\alpha$ - $\beta$  çerçevesinde referans kaynak akımları Denklem 5.5 ve Denklem 5.6 ile hesaplanır.

$$i_\alpha = \frac{1}{\Delta} (v_\alpha \bar{p} - v_\beta \bar{q}) \quad (5.5)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\Delta} (v_\alpha \bar{q} + v_\beta \bar{p}) \quad (5.6)$$



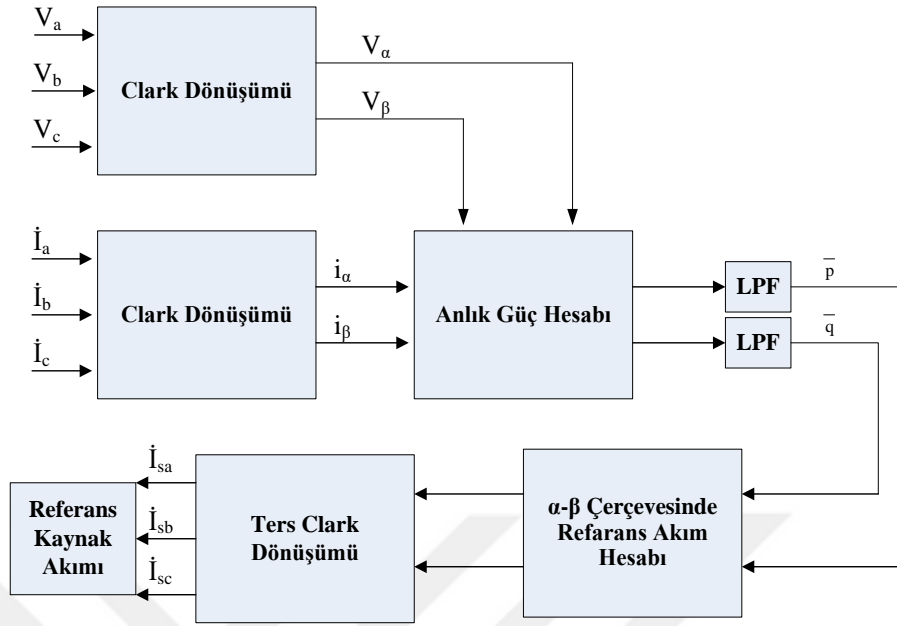
Şekil 5.5. D-STATCOM UVDGM sektör tespiti simulink modeli



Şekil 5.6. D-STATCOM UVDGM anahtarlanma sırası simulink modeli

Son olarak, abc çerçevesindeki referans kaynak akımı, Ters Clarke dönüşümü yardımıyla Denklem 5.7 ile hesaplanır.

$$\begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (5.7)$$



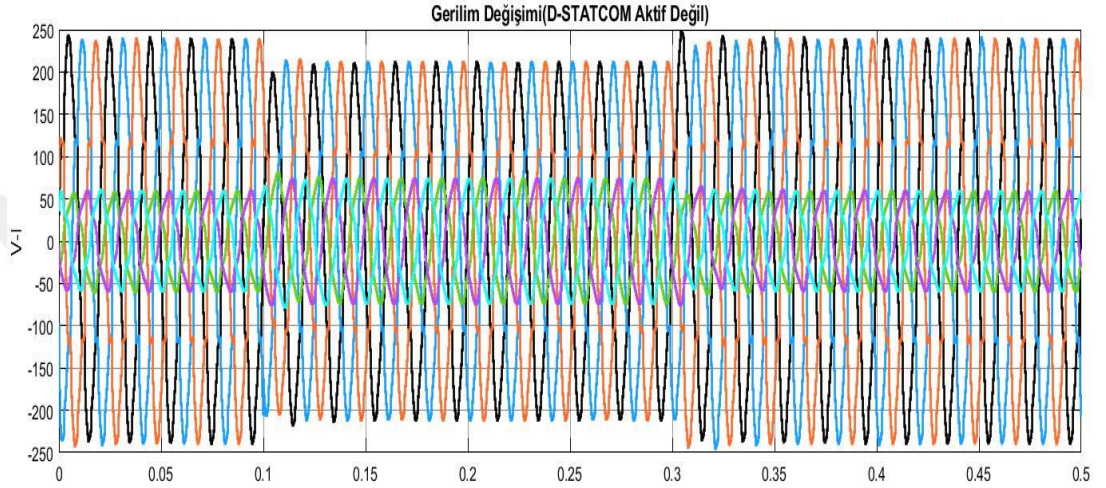
Şekil 5.7. D-STATCOM kontrol bloğu

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 iletme 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 grupları Tablo 3.5'te sıralandığı gibi anahtarlama durumlarına göre iletme 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 iletme geçirilirken diğeri kesime geçirilir. Uzay vektör kontrol diyagramında bir sektörden diğerine hareket etmek için geçiş de ya minimum ya da sıfır sayıda anahtarlama sayısına ihtiyaç duyar [42].

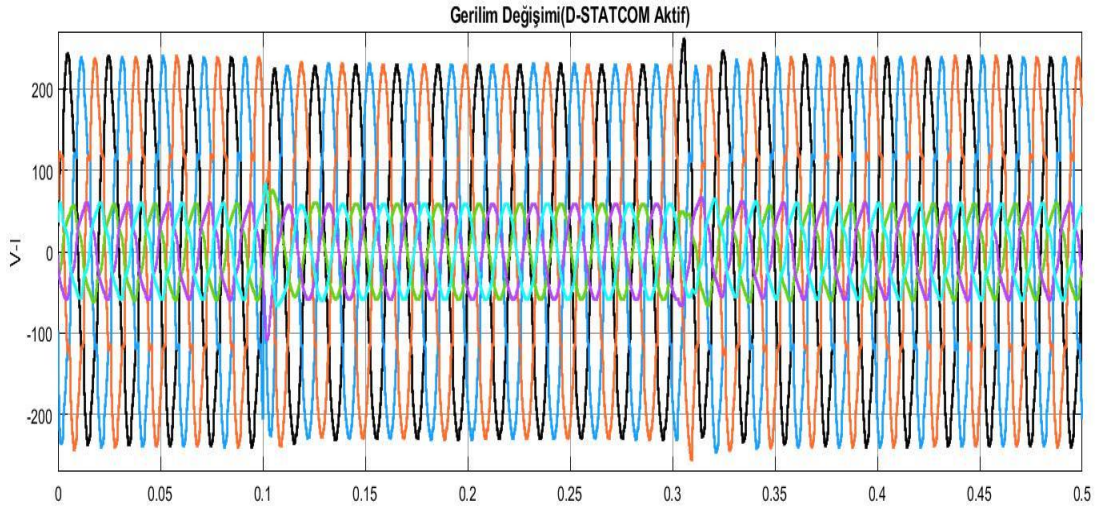
## 5.2. D-STATCOM'lu Sistemin Gerilim Analizi

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 kararlı olmadığı ancak D-STATCOM devrede iken gerilimin kararlı hale geldiği görülmüştür. D-STATCOM'un devrede

olmadığında sistemde meydana gelen gerilim değişimi Şekil 5.8’de görüldüğü gibi salınım göstermektedir. 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 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.8. D-STATCOM devre dışındayken gerilim değişimi



Şekil 5.9. D-STATCOM aktif iken gerilim değişimi

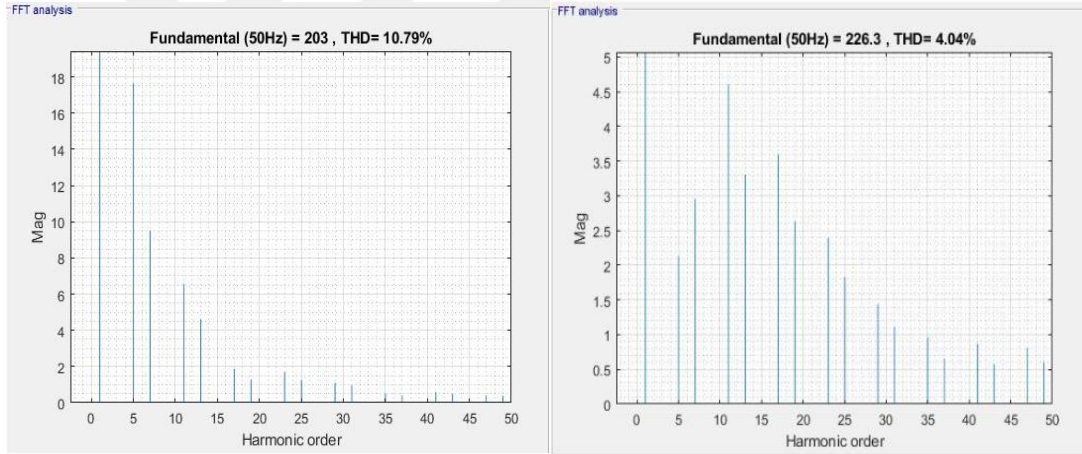
Değişken bir yükün sonucu olarak, yük kısmındaki gerilim dalgalanması kaçınılmazdır. Ancak, D-STATCOM’un devreye girmesiyle gerilimin kararlı hale geldiği Şekil 5.9’da görülmüştür. Şekil 5.8’de, D-STATCOM devrede değil iken ve 0,1-0,3 sn aralarında



devreye endüktif bir yükün girmesi sonucunda gerilim değeri 203 V'a kadar düşmüştür. Şekil 5.9'da 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 büyük ölçüde azaltılmıştır.

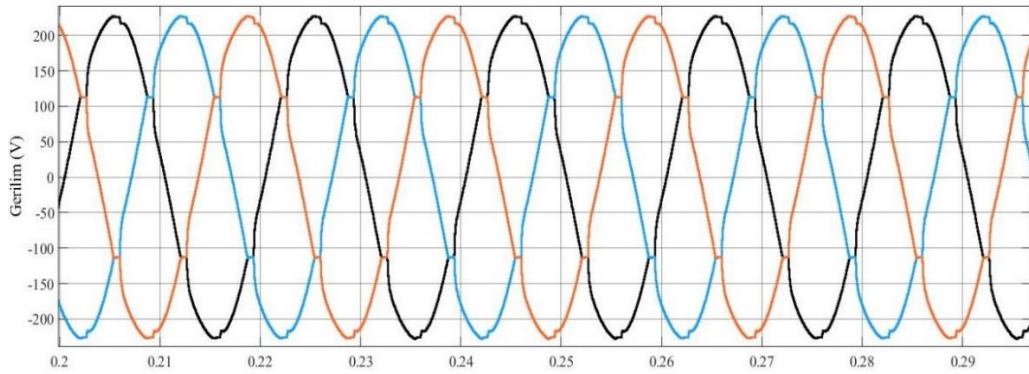
### 5.3. D-STATCOM'lu Sistemin Geriliminin ve Akımının Harmonik Analizi

D-STATCOM'un benzetim çalışmasında THD oranlarını önemli ölçüde azalttığı da görülmüştür. Şekil 5.10.a ve Şekil 5.10.b'de gösterildiği gibi, D-STATCOM'un işletmeye alınmasıyla gerilimde meydana gelen THD oranları %10,79'dan, %4,04'e kadar düşmüştür. Şekil 5.10.c'de ise D-STATCOM devrede olduğu anda, THD analizi sırasındaki gerilim dalga şekli gösterilmiştir. Bu durumda sistemin gerilimi 227 V olarak gözlemlenmiştir.



(a)

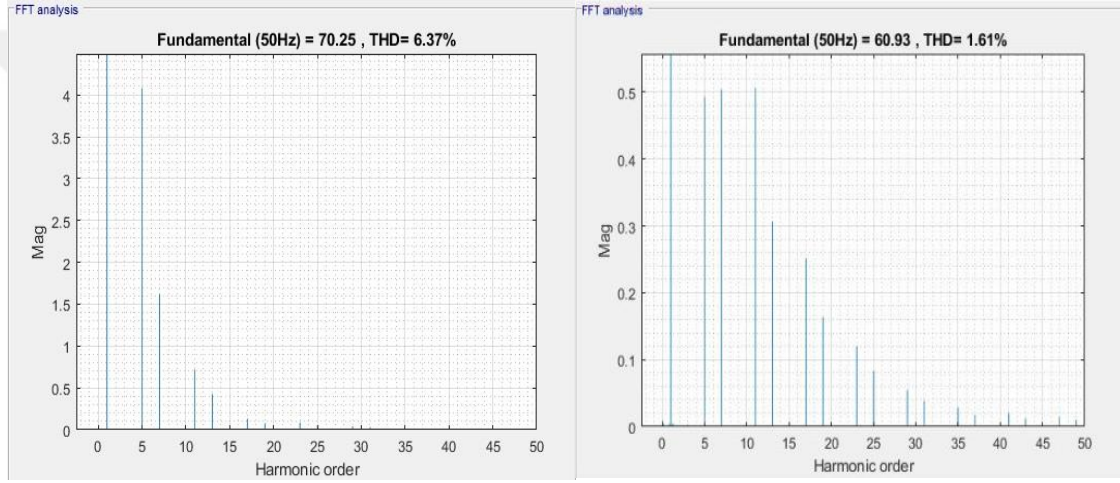
(b)



(c)

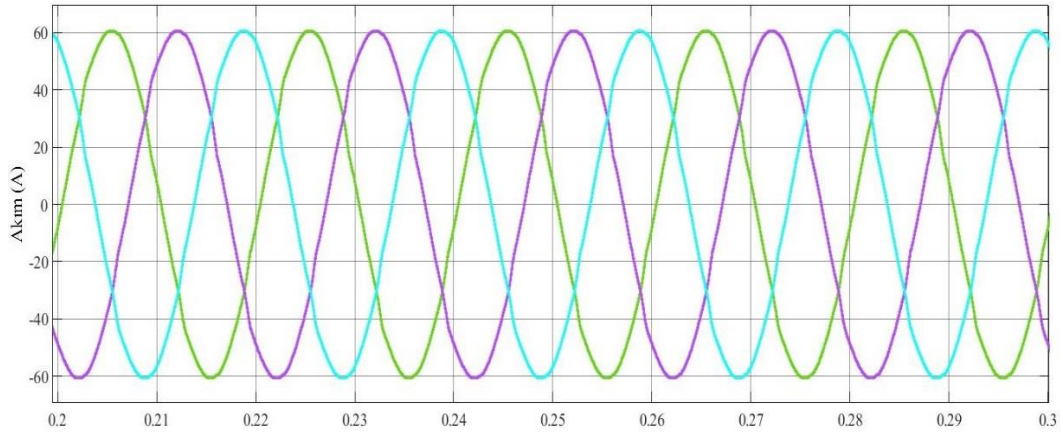
Şekil 5.10. Gerilimdeki THD analizi (a) D-STATCOM kontrolü olmadan gerilimdeki THD oranı (b) D-STATCOM kontrolü varken gerilimdeki THD oranı (c) THD analizi anındaki gerilim dalga şekli

Ayrıca, akım THD oranları ise Şekil 5.11.a ve Şekil 5.11.b’de gösterilmiştir. Bu analizlerde, D-STATCOM’un devreye alınmasıyla akımdaki THD oranları %6,37’den, %1,61’e kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 5.11.c’de ise D-STATCOM devrede olduğu anda, THD analizi sırasındaki akım dalga şekli gösterilmiştir. Bu durumda sistemin akımı 61 A olarak gözlemlenmiştir. Gerekli önlemler alınmadığı takdirde harmonikler; nötr iletkeninin aşırı ısınmasına, güç kayıplarının artmasına, rezonans riskinin artmasına, elektrik makinalarında gürültü ve sıcaklık yükselmesine, kontrol cihazlarının hatalı çalışmalarına neden olacağı bilinmektedir. D-STATCOM’un devreye girmesiyle THD’nin azaldığı, Şekil 5.10.b ve Şekil 5.11.b’de gözlemlenmiştir.



(a)

(b)



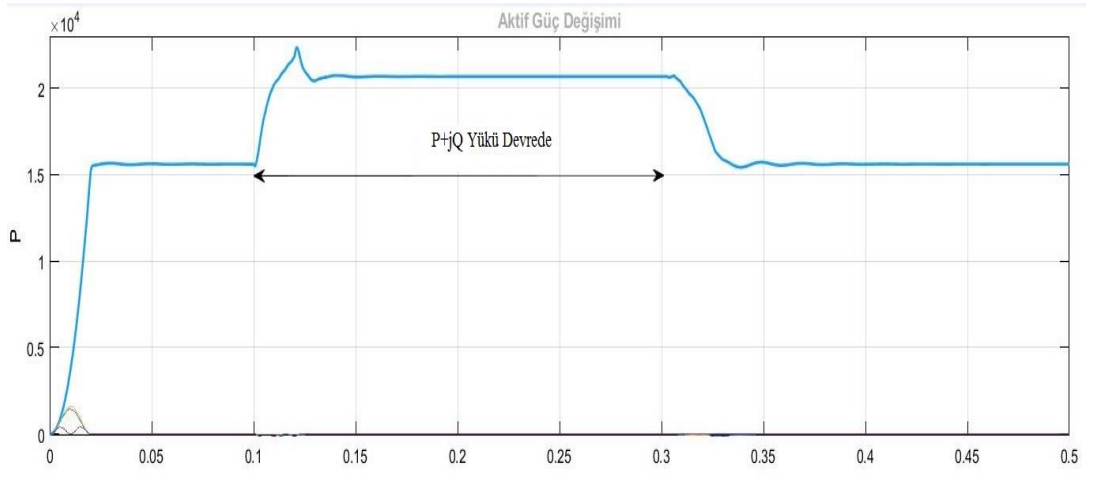
(c)

Şekil 5.11. Akımdaki THD analizi (a) D-DTATCOM kontrolü olmadan akımdaki THD oranı (b) D-STATCOM kontrolü varken akımdaki THD oranı (c) THD analizi anındaki akım dalga şekli

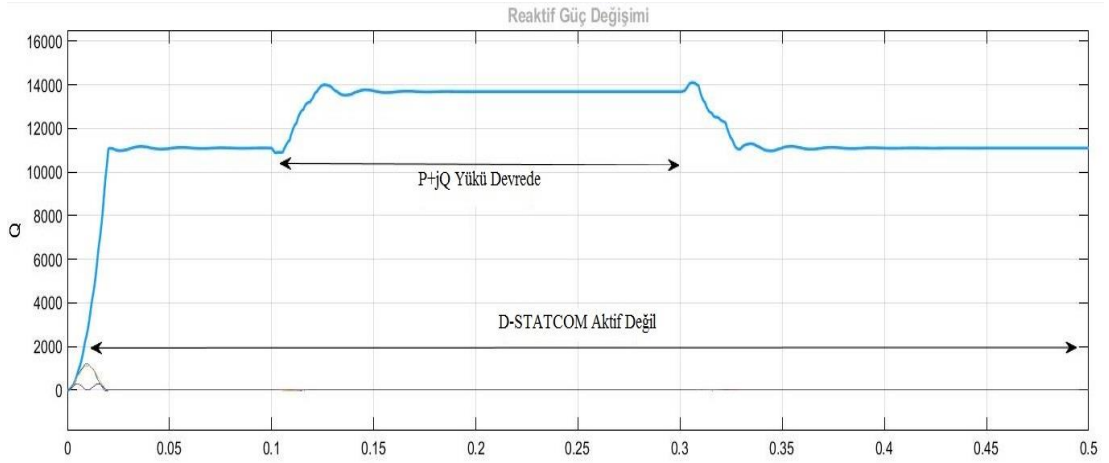
THD'nin azaltılmasıyla, elektronik cihazların ömrü uzar, sistem verimliliği artar, elektronik cihaz arızaları azalır ve üretimde maliyet kaybına neden olan plansız duruşların daha az yaşanması sağlanır. Aksi durumda THD oranının artması enerji kayıplarının artmasına, birçok cihazın anormal çalışmasına, elektronik kart arızalarına, mekanik titreşimlere, koruma elamanlarının ve mikroişlemcilerin hatalı çalışması gibi birçok olumsuz etkilerin oluşmasına neden olur. Aynı zamanda uluslararası standartların belirlenmiş olduğu sınır değerleri de aşılabılır [43].

#### 5.4. D-STATCOM'lu Sistemin Aktif ve Reaktif Güç Analizi

Şebeke gerilimi alçak gerilimde 400 V olarak modellenen sistemde 16,40 kVA (10kw+13kVAR) ve 22,36 kVA (10kw+20kVAR) gücünde iki ayrı endüktif test yükü kullanılmıştır. P+jQ (10kw+13kVAR) endüktif yükü t=0,1-0,3 sn'de devreye girdiği zaman, sistemin aktif ve reaktif gücünde yükselme meydana gelmiştir. Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te, D-STATCOM devre dışındayken, sırasıyla aktif güç ve reaktif güç de meydana gelen değişimler gösterilmiştir. P+jQ yükünün neden olduğu aktif güç değişimi Şekil 5.12'de verilmiştir. Şekil 5.12'ye göre, sistemden çekilen aktif güç P+jQ yükünün de devreye girmesiyle yaklaşık 20 kW'tır.



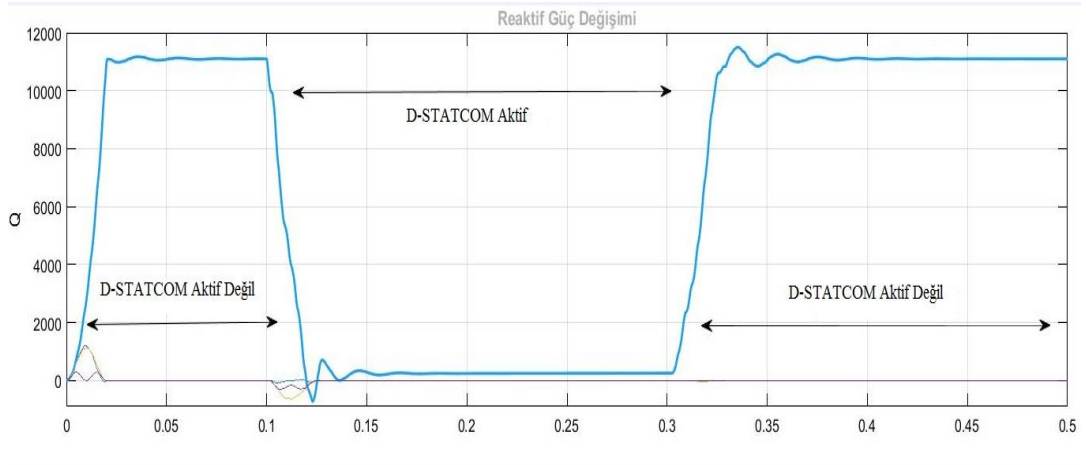
Şekil 5.12. Aktif güç akışının değişimi



Şekil 5.13. Reaktif güç akışının değişimi

Sistemde reaktif gücün belli bir oranın üstüne çıkması istenmeyen bir durumdur. Reaktif gücün belli bir oranın üstüne çıkması 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 5.14'de reaktif güç değişimi gösterilmiştir. Böylece sistemin güç faktörünü yükselterek, istenmeyen olumsuzlukların etkileri de azaltılmıştır. D-STATCOM devre dışındayken sistemden çekilen toplam reaktif güç,  $P+jQ$  yükünde devreye girmesiyle Şekil 5.13'de görüldüğü üzere, 14kVAR seviyesinde iken D-STATCOM'un devreye alınmasıyla Şekil 5.14'de göre hemen hemen 0 (sıfır) olmaktadır. Bu durum, yükün talep ettiği ve kullanmadan tekrar sisteme gönderdiği reaktif gücün D-STATCOM tarafından karşılanmasıyla mümkün hale gelmektedir.

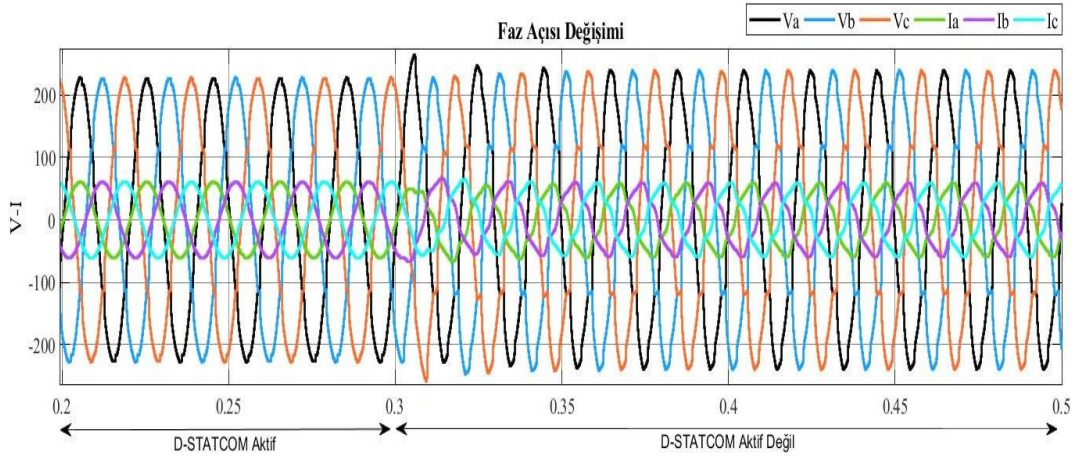




Şekil 5.14. D-STATCOM aktif iken reaktif güç akışının değişimi

### 5.5. D-STATCOM'lu Sistemin Gerilim ve Akım Arasındaki Faz Açısının Analizi

D-STATCOM, gerilim ve akım arasındaki faz açısını düzeltmede de etkin bir role sahiptir. Şekil 5.15'de D-STATCOM kontrolü ve kontrol 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.

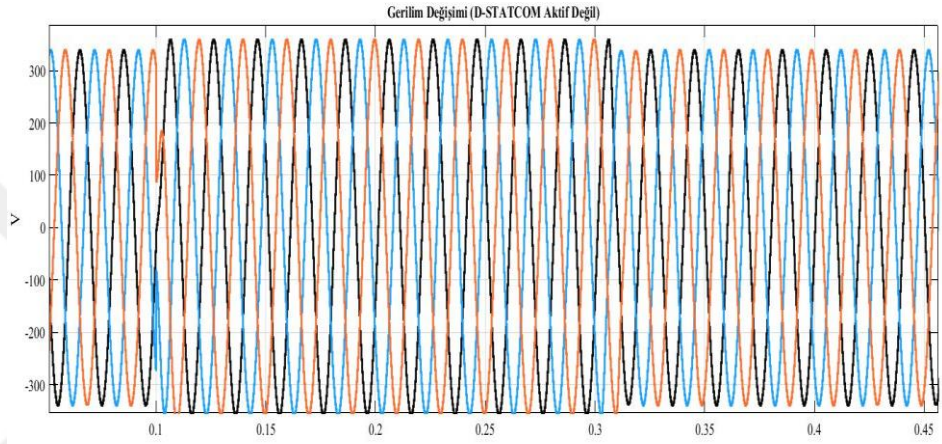


Şekil 5.15. Faz Açısı Değişimi

D-STATCOM, gerilim ve akım arasındaki faz farkını bağlı olduğu sistem ile aktif güç alışverişi 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.

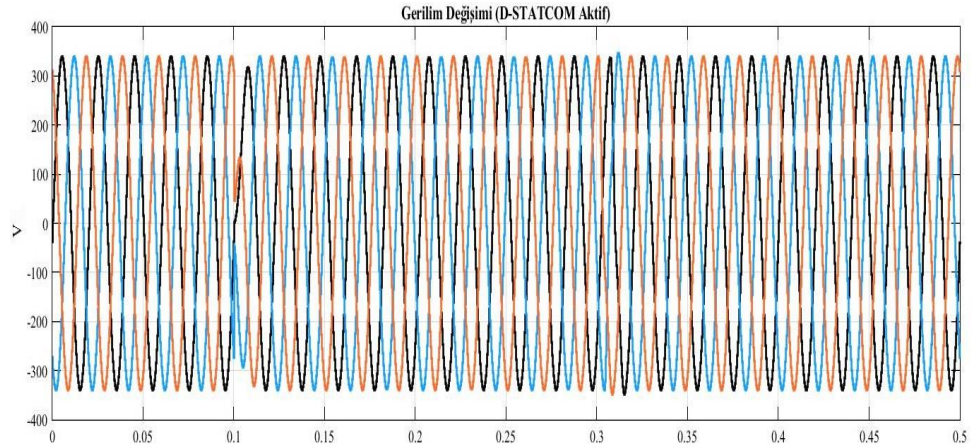
## 5.6. D-STATCOM Çıkış Reaktif Güç ve Evirici DA Gerilim Analizi

Bölüm 5.2’de, gerilim düşümünde D-STATCOM’un devreye girerek sistem gerilimini referans gerilimine yükselttiği görülmüştür. D-STATCOM gerilim düşümüne gösterdiği tepkinin bir benzerini gerilim yükselmesinde de vermiştir. Şekil 5.16’da D-STATCOM devrede olmadığına sistemde meydana gelen gerilim yükselmesi görülmektedir. Şekil 5.16’da normal sistem gerilimi 339 V iken 0.1-0.3 sn aralığında gerilim yükselerek 360 V olmuştur.



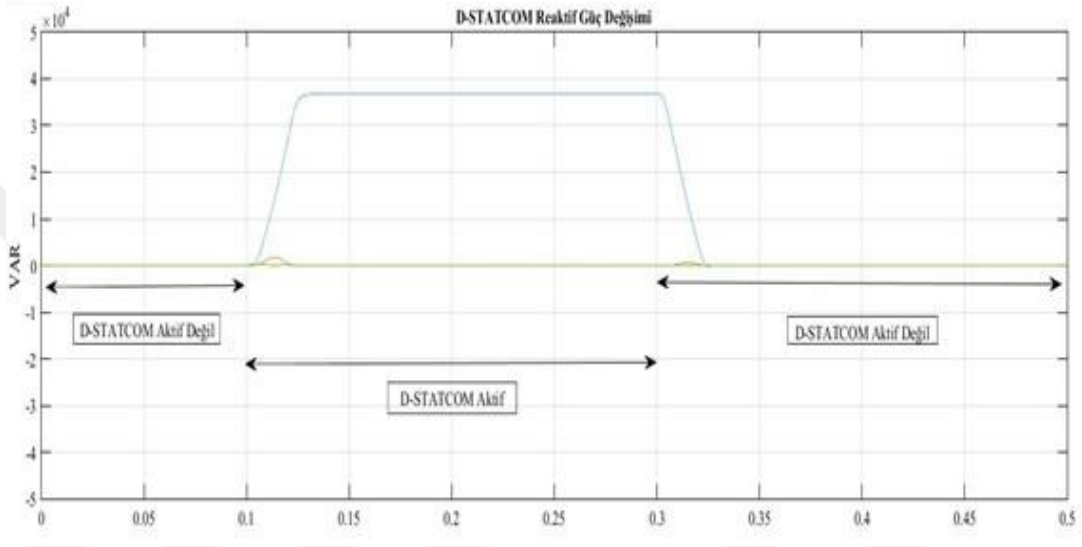
Şekil 5.16. D-STATCOM devre dışıyken gerilim değişimi

Sonrasında D-STATCOM, 0.1-0.3 sn aralığında devreye girerek sistemde meydana gelen gerilim yükselmesini telafi ederek sistem gerilimini sabit ve kararlı bir hale getirmiştir. Şekil 5.17’de D-STATCOM aktif iken gerilim değişimi verilmiştir. Şekil 5.17’ye göre, 0.1-0.3 sn aralığında 360 V olan gerilim değeri D-STATCOM’un devreye girmesiyle sistem gerilimi 339 V a düşmüştür.



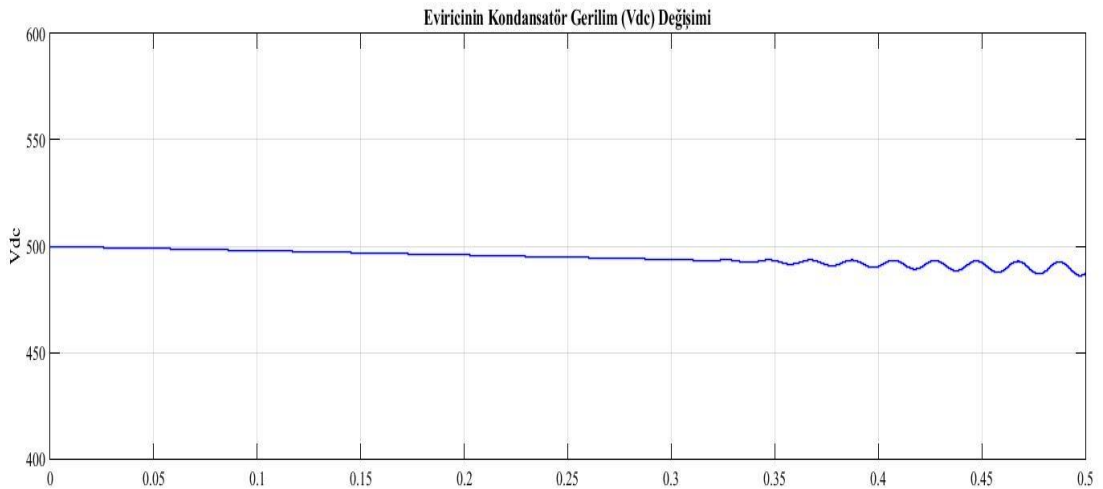
Şekil 5.17. D-STATCOM aktif iken gerilim değişimi

D-STATCOM, güç sisteminde meydana gelen bu gerilim yükselmesini telafi etmek için güç sisteminden reaktif güç çekmektedir. Şekil 5.18 D-STATCOM tarafından güç sisteminden çekilen reaktif gücü göstermektedir. Şekil 5.16’da görüldüğü gibi şebeke tarafında gerilim yükselmesi meydana geldiğinde sistem gerilimi D-STATCOM’un çıkış geriliminden büyük olur ve reaktif güç dağıtım sisteminden D-STATCOM’a doğru akar. Bu durumda D-STATCOM endüktif modda çalışır ve reaktif gücü artar.



Şekil 5.18. D-STATCOM'un reaktif güç değişimi

Ayrıca Şekil 5.19’da eviricinin DA geriliminde ( $V_{dc}$ ) yük değişimleri sırasında kısa süreli değişimler olsa da gerilimin ( $V_{dc}= 500V$ ) sabit ve kararlı olduğu görülmektedir. Buda D-STATCOM sisteminin kontrolcü bölümlerinin problemsiz çalıştığının bir göstergesidir.



Şekil 5.19. Evirici kondansatör gerilimi Vdc değişimi

D-STATCOM'un kontrolünde kullanılan anahtarlama tekniği, D-STATCOM'un performansını etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Yaygın olarak D-STATCOM uygulamalarında SDGM tekniği kullanılmaktadır. UVDGM anahtarlama tekniği ise uygulanmasının karışık olmasından dolayı D-STATCOM uygulamalarında çok fazla kullanılmamaktadır. Bu tez çalışmasında, UVDGM anahtarlama tekniği kullanılarak D-STATCOM'dan elde edilen çıkış reaktif akım miktarı daha yüksek değerlere çıkarılmıştır. Dolayısıyla, D-STATCOM'un devresinde herhangi bir değişiklik yapmadan sadece anahtarlama tekniğinde bir değişiklik yaparak D-STATCOM'un güç sistemine reaktif akım sağlama yeteneği artırılmıştır. Ayrıca UVDGM anahtarlama tekniği kullanılarak DA hat gerilim değeri diğer anahtarlama tekniklerine göre daha küçük değerlere düşürülmüştür. Böylece DA hattında kullanılacak DA kondansatörlerinin hem boyutu küçülmüş hem de maliyeti azalmıştır.



## BÖLÜM 6

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz dünyasında, teknolojinin gelişmesiyle birlikte güç kalitesi çok önemli bir konu haline gelmiştir. Dolayısıyla elektrik enerjisinin kalitesini ve güvenilirliğini arttırabilmek için enerji sistemini olumsuz etkileyen problemlerin bilinmesi gerekmektedir. Gerilim çökmesi, gerilim yükselmesi, harmonikler, frekans değişimleri ve elektriksel gürültü güç kalitesi sorunlarından en çok karşılaşılan durumlardır. Bu problemleri çözmek için FACTS ve Özel Güç Cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonu ve güç kalitesi sorunlarının çözümü için klasik olarak sabit kondansatörler ve pasif filtreler kullanılmaktadır. Ancak sabit kondansatörler, harmonikli sistemlerde yetersiz kalmasının yanında, sistemde ek harmonikler de yaratmaktadırlar. Pasif filtreler ise harmonik gidermede belirli ölçüde çözüm olmaktadır ancak değişken yük koşullarında hızlı cevap verememeleri en büyük dezavantajlarıdır.

D-STATCOM, dağıtım sistemlerindeki güç kalite problemlerini çözmek için kullanılan evirici tabanlı bir cihaz olup, FACTS kontrolcüler 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 20kVAR reaktif gücün hemen hemen sıfırlandığı ve gerilim ile akım arasındaki yaklaşık 30°'lik (gerilim akımdan ileri fazda) faz açısının sıfıra düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, iletim hattına paralel bağlı olan D-STATCOM'un şebeke

ile reaktif güç alışverişi yaparak gerilim bozulmalarını gidermede ve THD azaltılmasında büyük etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan benzetim çalışmasında D-STATCOM aktif ve aktif olmadığı durumlar için gerilimin genliğindeki değişimi, gerilim ve akımdaki THD değişimi, reaktif güç değişimi ve faz açısı değişimleri özet olarak Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. D-STATCOM’un sisteme olan etkisi

	<b>D-STATCOM Aktif Değil</b>	<b>D-STATCOM Aktif</b>
<b>Gerilim Değişimi</b>	203 V	227 V
<b>Gerilimdeki THD Değişimi</b>	% 10.79	% 4.04
<b>Akımdaki THD Değişimi</b>	% 6.37	% 1.61
<b>Reaktif Güç Değişimi</b>	14 kVAR	≈ 0
<b>Faz Açısı Değişimi</b>	≈ 30°	0°

Bu tez çalışmasından sonra, tasarlanan D-STATCOM sisteminin güç kayıpları minimuma indirgenerek verimin artırılması, farklı modülasyon tekniklerinin ve üç fazlı evirici topolojilerinin D-STATCOM sistemine uygulanması, uygulanan bu farklı modülasyon tekniklerinin ve üç fazlı evirici topolojilerinin karşılaştırılması planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Ertay M.M., Aydoğmuş Z., “STATCOM ile Bir Enerji İletim Sisteminde Gerilim Kontrolü”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21, s. 91-105, 2010.
2. Aydoğmuş Z., “STATCOM ile Güç Akış Kontrolü”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Elazığ, 2006.
3. Behpoor H., “Fazların Bağımsız Olarak Kontrol Edildiği Üç Seviyeli Bir Statkom'un Reaktif Güç Kompanzasyonu Amacıyla Tasarlanması”, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Ankara, 2010.
4. Zin A.A.M., Moradi M., Khairuddin A., Zareen N., Naderipour A.R., Moradi M., “A Comprehensive Comparison of Facts Devices For Enhancing Static Voltage Stability”, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11 (21), s. 12602-12606, 2016.
5. Pattathurani L., Dwibedi R., Sivachidambaranathan P., “A Voltage Controlled D-STATCOM for Power Quality Improvement”, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 10 (6), s. 27-34, 2015.
6. Awasthi V.M., Huchche V.A., “Reactive Power Compensation using D-STATCOM”, *2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*, s. 583-585, India, 2016.
7. Mokhtari A., Gherbi F.Z., Mokhtar C., Kerrouche K.D.E., Aimer A.F., “Study Analysis and Simulation of a Static Compensator D-STATCOM for Distribution Systems of Electric Power”, *Leonardo Journal of Sciences*, 25, s. 117-130, 2014.
8. Sirjani R., Jordehi A.R., “Optimal Placement and Sizing of Distribution Static Compensator (D-STATCOM) in Electric Distribution Networks: A review”, *Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, s. 688-694, 2017.
9. Rohouma W., Balog R.S., Peerzada A.A., Begovic M.M., “D-STATCOM for Harmonic Mitigation in Low Voltage Distribution Network with High Penetration of Nonlinear Loads”, *Elsevier, Renewable Energy*, 145, s. 1449-1464, 2019.
10. Gencer E., “Orta Gerilim Şebekelerinde Gerilim Sarkmalarına D-STATCOM Etkileri”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya, 2018.

11. Çakmak F., “Dağıtım Şebekelerinde D-STATCOM ile Gerilim Kalitesinin İyileştirilmesi”, *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Van, 2018.
12. Ahemad A., Naimuddin S., “Simulation of D-STATCOM in Power System”, *International Conference on Advances in Engineering Technology (ICAET)*, s. 1-8, Singapore, 2014.
13. Gupta A.R., Kumar A., “Impact of D-STATCOM Placement on Improving The Reactive Loading Capability of Unbalanced Radial Distribution System”, *Elsevier, Procedia Technology*, 25, s. 759-766, 2016.
14. Fazeli S.M., Ping H.W., Rahim N.B.A., Ooi B.T., “Individual phase control of 3-phase 4-wire voltage source converter”, *IET Power Electronics*, 7 (9), s. 2354-2364, 2014.
15. Khoshooei A., Moghani J.S., Candela I., Rodriguez P., “Control of D-STATCOM During Unbalanced Grid Faults Based on DC Voltage Oscillations and Peak Current Limitations”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54 (2), s. 1680-1690, 2018.
16. Bilgin H.F., “Desing and Implementation of A Current Source Converter Based STATCOM For Reactive Power Compensation”, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Ankara, 2007.
17. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, *IEEE Std 1159-2019*, s. 1-98, 2019.
18. Ghosh A., Ledwich G., “Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices”, M.A.Pai, *Kluwer Academic Publishers*, USA, 2002.
19. Dekhandji F.Z., Douche M., Zebidi N., “DVR and D-STATCOM Mitigation Techniques of Power Quality Effects on Induction Motors”, *Algerian Journal of Signal and Systems*, 2, s. 110-129, 2017.
20. Eroğlu H., “Bir Dağıtım Şebekesinin Güç Kalitesi ve Harmonikler Yönünden İncelenmesi”, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Konya, 2009.
21. Çöteli R., “Üç Seviyeli H Köprü Evirici Tabanlı D-Statkom'un Sinirsel Bulanık Ağ ile Denetimi”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Elazığ, 2010.
22. Sirisukprasert S., Huang A.Q., Lai J.S., “Modelling analysis and control of cascaded-multilevel converter-based STATCOM”, *Power Engineering Society General Meeting*, s. 2561-2568, Canada, 2003.

23. Kul M., “Elektrik Enerji Sistemlerinde Akım, Gerilim ve Güç”, Elektrik Enerjisi İletimi ve Dağıtımı, *Anadolu Üniversitesi, Eskişehir*, s. 2-33, 2013.
24. Kabalci E., “Reactive Power Compensation in AC Power System”, Reactive Power Control in AC Power System, *Springer International Publishing, Gewerbestrasse*, s. 275-315, 2017.
25. Bilhan A., Sünter S., “3 Fazlı Evirici Deveresi için SDGM, SHEDGM, HIDGM ve UVDGM Tekniklerinin Karşılaştırılması”, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7 (1), s. 100-110, 2018.
26. Rashid M.H., “Güç Elektroniği”, Timur Aydemir, *NOBEL*, s.1014, Ankara, 2016.
27. Çolak I., Kabalci E., “Evirici Topolojileri ve Gelişimleri Üzerine Bir İnceleme”, *EMO Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO)*, s. 291-295, 2008.
28. Adak S., Cangı H., “Fotovoltaik Sistemde Bulunan Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli Eviricinin Çıkış Gerilimi Toplam Harmonik Distorsiyonunun Simulasyon ve Analizi”, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 5 (2), s. 242-253, 2016.
29. Yanmaz K., Mengi O., Altaş İ., “Çok Seviyeli H-Köprü Temelli Gerilim Kaynaklı Eviricili STATCOM’un BMD’li Kontrolü ve Karşılaştırmalı Benzetimi”, *Karedeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (14), s. 106-123, 2016.
30. Çolak İ., Kabalci E., “Çok Seviyeli Eviricilerin Kontrol Yöntemleri”, *Türk Bilim Araştırma Vakfı Bilim Dergisi (TUBAV)*, 1 (2), s. 45-54, 2008.
31. Deniz E., “Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Kullanan Üç Seviyeli H-Köprü Evirici Tabanlı D-Statkom'un Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Elazığ, 2010.
32. Çöteli R., Aydoğmuş Z., “DGM-Statcom ile Reaktif Güç Kompanzasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 10 (2), s. 123-128, 2007.
33. Kabalci E., “Converter and Output Filter Topologies for STATCOMs”, Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems, Shahnia F., Rajakaruna S., Ghosh A., *Springer*, Singapore, s. 1-34, 2015.
34. VanderMeulen A., Maurin J., “Current Source Inverter vs. Voltage Source Inverter Topology”, *White Paper*, WP020001, s. 1-8, 2014.
35. Deniz E., Tuncer S., Gencoglu M.T., “Voltage Regulation in A Distribution System by Using STATCOM with Three Level Diode Clamped Inverter”, *5. International Advanced Technologies Symposium (IATS)*, s. 1-7, Karabük, 2009.

36. Karabacak M., Kılıç F., Saraçoğlu B., Boz A.F., Ferikoğlu A., “Şebekeye Bağlantılı Eviriciler için LLCL Filtre Tasarımı; Detaylı Bir Performans Analizi”, *Politeknik Dergisi*, 19 (3), s. 251-260, 2016.
37. Singh B., Arya S., “Desing and control of a D-STATCOM for power quality improvement using cross correlation function approach”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 4 (1), s. 74-86, 2012.
38. Bapaiah P., “Power Quality Improvement by Using D-STATCOM”, *International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics (IJETEE)*, 2 (4), s. 1-12, 2013.
39. Shekar L., Sumana S., Dhanalakshmi R., “Voltage Regulation Using D-STATCOM in Distribution Grid for Enhancement of Power Quality”, *2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, India, 2018.
40. Gidd A.R., Gore A.D., Jondhale S.B., Kadekar O.V., Thakre M.P., “Modelling Analysis and Performance of a D-STATCOM for Voltage Sag Mitigation in Distribution Network”, *Proceedings of the Third International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI 2019)*, s.366-371, India, 2019.
41. Eroglu F., Kazmi H., VURAL A., “Modelling and Control of a Three-Level Diode-Clamped Medium Voltage Distribution Static Synchronous Compensator using Space Vektor Pulse Width Modulation”, *Gazi University Journal of Science*, 33 (1), s. 106-118, 2020.
42. Çetin A., “Desing and Implementation of A Voltage Source Converter Based STATCOM for Reactive Power Compensation and Harmonic Filtering”, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Ankara, 2007.
43. Karafil A., “Pasif seri sönümlenme direncinin LCL filtreli bir fazlı şebeke etkileşimli evirici üzerine etkisi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, s. 1-7, 2020.

## ÖZGEÇMİŞ

Oğuz TAŞDEMİR 1987 yılında Kırşehir’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kırşehir’de tamamladı. 2010 yılında Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Kırşehir’de bulunan PETLAS A.Ş’de arıza bakım mühendisi olarak göreve başladı. 2012 yılında Konya’da bulunan PAKPEN A.Ş’de elektrik bakım mühendisi olarak göreve başladı. 2017 yılında Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Kaman Meslek Yüksek Okulu Elektrik Enerji Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. Evli ve bir çocuk babası olup halen Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Kaman Meslek Yüksek Okulun da görevine devam etmektedir.