

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORTA GERİLİM ŞEBEKELERİNDE GERİLİM  
SARKMALARINA D-STATCOM ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Esra GENCER**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU**

**Kasım 2018**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


**ORTA GERİLİM ŞEBEKELERİNDE GERİLİM  
SARKMALARINA D-STATCOM ETKİLERİ**


**YÜKSEK LİSANS TEZİ**


**Esra GENCER**

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK  
MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK

Bu tez 01/11/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr.  
Ertan YANIKOĞLU  
Jüri Başkanı

  
Doç. Dr.  
Cenk YAVUZ  
Üye

  
Prof. Dr.  
Ali Fuat BOZ  
Üye

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

  
Esra GENCER

27/09/2018

## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, tüm aşamalarda yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, anlayış gösteren ve titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	v
TABLOLAR LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY .....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
GÜÇ KALİTESİ .....	5
2.1. Güç Kalitesi Problemleri .....	6
2.1.1. Kısa süreli değişimler.....	8
2.2. Gerilim Sarkması.....	11
2.2.1. Gerilim sarkması tanımı ve sebepleri.....	11
2.2.2. Gerilim sarkması genliği- karakteristiği.....	13
2.2.3. Gerilim sarkması orijini .....	15
2.2.4. Gerilim bölücü modeli ile gerilim sarkması hesabı .....	16
2.2.5. Gerilim sarkması tipleri-abc sınıflandırılması .....	18
BÖLÜM 3.	
DÖNÜŞTÜRÜCÜLER.....	24
3.1. Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler (VSC) .....	24
3.1.1. Tek fazlı gerilim beslemeli dönüştürücüler.....	26

3.1.2. Üç fazlı gerilim beslemeli dönüştürücüler .....	29
3.1.3. Darbe genişlik modülasyon tekniği (PWM) .....	32
3.1.3.1. Sinüzoidal darbe genişlik modülasyon tekniği (SPWM) .....	33
BÖLÜM 4.	
D-STATCOM .....	37
4.1. FACTS Denetleyicileri.....	38
4.2. D-STATCOM.....	42
4.2.1. D-STATCOM' un çalışma prensibi .....	46
BÖLÜM 5.	
TASARIM VE SİMÜLASYON .....	52
5.1. Simülasyon Sonuçları – Sistem 1 .....	55
5.1.1. Durum-1 üç faz toprak hatası (A Noktası) .....	57
5.1.2. Durum-2 tek faz toprak hatası (A Noktası).....	58
5.1.3. Durum-3 üç faz toprak hatası (B Noktası) .....	60
5.1.4. Durum-4 üç faz toprak hatası (C Noktası) .....	61
5.1.5. Durum-4 tek faz toprak hatası (C Noktası).....	62
5.2. Simülasyon Sonuçları –Sistem 2.....	64
5.2.1. Şebekede D-STATCOM bulunmuyor iken analiz .....	64
5.2.2. Şebekede D-STATCOM aktif iken analiz .....	66
BÖLÜM 6.	
SONUÇ .....	68
KAYNAKLAR .....	71
ÖZGEÇMİŞ .....	74

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AHF	: Aktif harmonik filtreler
D-STATCOM	: Dağıtım statik senkron kompanzatör
FACTS	:Flexible alternating current transmission systems (Esnek iletim hatları )
GTO	: Kapıdan kesmeli tristör
IGBT	: Kapıdan izoleli bipolar tristör
MOSFET	: Metal oksit alan etkili transistor
PCC	: Ortak kuplaj noktası
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
SPWM	: Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu
STATCOM	: Statik senkron kompanzatör
SVC	: Statik VAR kompanzatör
SVG	: Statik VAR generatör
VSC	: Voltage source converter (Gerilim beslemeli dönüştürücü)

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. İletim-dağıtım sistemi - tüketici arasındaki güç ilişkisi .....	6
Şekil 2.2. Kısa süreli kesinti .....	8
Şekil 2.3. Gerilim sarkması .....	9
Şekil 2.4. Gerilim yükselmesi .....	9
Şekil 2.5. Güç kalitesi problemleri örnek dalga şekilleri: a) Gerilim sarkması, b) Gerilim yükselmesi, c) Gerilim veya akım darbesi, d) Salınımlı akım veya gerilim darbesi, e) 5. Harmonik bozulma, f) Gerilim dengesizliği, g) Faz açısı atlaması, h) Gerilim oynaması .....	10
Şekil 2.6. 300ms süre ile %50'lik gerilim sarkması örneği .....	12
Şekil 2.7. Kısa devre hatası sonucu gerilim sarkması örneği .....	14
Şekil 2.8. Motor startında gerilim sarkması örneği .....	14
Şekil 2.9. Dağıtım hattı; yükler (A-D) ve hata durumları(1-5) .....	15
Şekil 2.10. Tipik bir radyal dağıtım sistemi prensip şeması .....	16
Şekil 2.11. Gerilim sarkması için gerilim bölücü modeli .....	17
Şekil 3.1. Tek fazlı tam dalga VSC ve akım-gerilimlerinin dalga şekli .....	27
Şekil 3.2. VSC 'nin bir faz bacağı ve bir faz bacağının çıkış geriliminin dalga şekli .....	28
Şekil 3.3. Üç fazlı iki seviyeli VSC .....	30
Şekil 3.4. Şekil3.3' teki üç fazlı VSC 'nin akım ve gerilimlerinin dalga şekilleri .....	31
Şekil 3.5. Altı darbeleri VSC için iki seviyeli SPWM metodu, a) referans sinyalleri ve taşıyıcı sinyal ( $f_s=15.f$ ) b) VAN faz gerilimi dalga şekli, c) VBN faz gerilimi dalga şekli, d)VAB faz - faz çıkış gerilimi dalga şekli .....	35



Şekil 4.1. Temel FACTS denetleyici tipleri: (a) FACTS denetleyicilerinin genel sembolü, (b) Seri bağlı FACTS denetleyicileri, (c) Paralel bağlı FACTS denetleyicileri, (d) Birleştirilmiş seri-seri bağlı FACTS denetleyicileri, (e) Koordineli seri-paralel bağlı denetleyiciler, (f) Birleşik seri-paralel bağlı denetleyiciler, (g) Çoklu hatlar için birleşik denetleyiciler .....	41
Şekil 4.2. D-STATCOM temel devre yapısı .....	43
Şekil 4.3. STATCOM şematik devre modeli .....	44
Şekil 4.4. STATCOM reaktif güç alışverişi durumları (a) Reaktif güç üretimi-kapasitif mod (b) Reaktif güç tüketimi-indüktif mod .....	45
Şekil 4.5. STATCOM' un sürekli durumda V–I karakteristiği.....	45
Şekil 4.6. VSC 'nin temel çalışma prensibi .....	48
Şekil 4.7. Basit STATCOM modeli .....	48
Şekil 4.8. Kayıplı STATCOM fazör diyagramları .....	49
Şekil 4.9. Kayıpsız STATCOM fazör diyagramları .....	50
Şekil 5.1. Sistem 1 simulink devre modeli.....	52
Şekil 5.2. Sistem 2 simulink devre modeli.....	53
Şekil 5.3. PI kontrolörü .....	54
Şekil 5.4. Sinüsoidal Vcontrol sinyali.....	54
Şekil 5.5. D-STATCOM MATLAB simulink modeli .....	55
Şekil 5.6. MATLAB simulink' te oluşturulan sistem 1 ve D-STATCOM devre modeli.....	57
Şekil 5.7. A noktası üç faz toprak hatası sonucu $V_{rms}$ gerilimi, D-Statcom aktif değil .....	57
Şekil 5.8. A noktası üç faz toprak hatası sonucu $V_{rms}$ gerilimi, D-Statcom aktif .....	58
Şekil 5.9. A noktası tek faz-toprak hatası sonucu $V_{rms}$ gerilimi, D-Statcom aktif değil .....	59
Şekil 5.10. A noktası tek faz-toprak hatası sonucu $V_{rms}$ gerilimi, D-Statcom aktif .....	59
Şekil 5.11. B noktası üç faz toprak hatası sonucu yük1 noktası, $V_{rms}$ gerilimi, D-Statcom aktif değil .....	60

Şekil 5.12. B noktası üç faz toprak hatası sonucu yük1 noktası, Vrms gerilimi, D-Statcom aktif .....	61
Şekil 5.13. C noktası üç faz toprak hatası sonucu yük1 noktası, Vrms gerilimi, D-Statcom aktif değil .....	61
Şekil 5.14. C noktası üç faz toprak hatası sonucu yük1 noktası, Vrms gerilimi, D-Statcom aktif .....	62
Şekil 5.15. C noktası tek faz-toprak hatası sonucu yük1 noktası, Vrms gerilimi, D-Statcom aktif değil .....	63
Şekil 5.16. C noktası tek faz-toprak hatası sonucu yük1 noktası, Vrms gerilimi, D-Statcom aktif .....	63
Şekil 5.17. MATLAB simulink' te oluşturulan sistem 2 ve D-STATCOM devre modeli.....	64
Şekil 5.18. D-Statcom şebekeye bağlı değil iken, D anahtarı sonucu gerilim sarkması.....	65
Şekil 5.19. D-Statcom şebekeye bağlı değil iken, B anahtarı sonucu gerilim yükselmesi.....	65
Şekil 5.20. D-Statcom şebekeye bağlı iken, D anahtarı sonucu gerilim sarkması .....	66
Şekil 5.21. D-Statcom şebekeye bağlı iken, B anahtarı sonucu gerilim yükselmesi.....	67

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. IEEE 1159:1995 standardına göre enerji kalitesi problemleri ve karakteristikleri .....	7
Tablo 2.2. Faktörlerin kombinasyonu ve gerilim sarkması tipleri .....	20
Tablo 2.3. Gerilim sarkması tipleri- ABC sınıflandırılması (Kesik çizgiler hata öncesi faz gerilimini gösterirken, düz çizgiler hata esnasındaki faz gerilimlerini göstermektedir.) .....	22
Tablo 5.1. Sistem-1 farklı gerilim sarkması senaryoları .....	56

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Güç Kalitesi, Gerilim Sarkması, Gerilim Yükselmesi, D-STATCOM

Güç kalitesi problemlerinin sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, güç sisteminin kalite ve performansında önemli etkiye sahip olan, reaktif güç kompanzasyonu olanağı sağlayan güç elektroniği tabanlı cihazların önemi artmaktadır. FACTS (esnek alternatif akım iletim sistemleri) yapıları sayesinde güç sistemlerinin daha hızlı ve etkin bir şekilde denetlenebilmesi, güç sistemi iletim kapasitesinin artırılabilmesi, reaktif güç kompanzasyonu ile akım, gerilim kontrolü mümkün olmuştur. D-STATCOM, dağıtım sistemlerindeki güç kalitesi problemlerini azaltmak için kullanılan en gelişmiş FACTS aygıtıdır. İletim hattına paralel bağlı D-STATCOM, şebeke ile reaktif güç alışverişi yaparak, güç kalitesi problemlerinden gerilim değişimlerini düzenlemede etkin rol oynar.

Bu tez çalışmasında, orta gerilim şebekelerindeki gerilim sarkmasına D-STATCOM' un etkileri incelenmiş, sarkma sorununun azaltılmasında D-STATCOM' un kullanılması ve etkileri gözlemlenmiştir. D-STATCOM' un benzetimi MATLAB Simulink Toolbox' ı kullanılarak yapılmıştır. Farklı durum senaryoları uygulanarak modellenen D-STATCOM' un davranışı gözlenmiş, gerilim sarkması veya yükselmesi durumlarında şebekedeki kontrolü izlenmiştir.

D-STATCOM modeli, gerilim beslemeli dönüştürücü (VSC) prensibindedir. Kolaylık ve doğru cevap olanağı sağlayan, Sinüsoidal Darbe Genişlik Modülasyon (SPWM) tekniği, iki seviyeli gerilim beslemeli dönüştürücünün (VSC) anahtarlama kontrolünde kullanılmıştır. D-STATCOM gerilim sarkmasını azaltmak için sisteme akım enjekte eder. Bu tez çalışmasında IGBT konfigürasyonlu 6 darbeli D-STATCOM dizayn edilmiştir.

Sonuçlar, D-STATCOM' un etkin gerilim düzenleme kapasitesi ile orta gerilim şebekelerindeki güç kalitesi problemlerinden gerilim sarkması ya da yükselmesinin azalmasına büyük oranda etki ettiğini göstermiştir. D-STATCOM' un şebekeye bağlı olduğu durumlarda, yük noktasındaki gerilim sarkması yüzdesi büyük oranda azalmıştır.

# **D-STATCOM EFFECTS TO VOLTAGE SAGS IN MEDIUM VOLTAGE NETWORKS**

## **SUMMARY**

Keywords: Power Quality, Voltage Sag, Voltage Swell, D-STATCOM

Power electronics based devices have been getting increasingly important with the considering the consequences of power quality problems, for their effect of the power systems quality and performance, also capability to make reactive power compensation. With the FACTS (flexible alternative current transmission systems) devices, controlling of power systems more quickly and effectively, increasing of power systems transmission capability, current, voltage control with the reactive power compensation can be done. D-STATCOM is the most improved FACTS devices to minimize power quality problems in distribution systems. D-STATCOM connected in shunt to the network, plays an effective role to regulate voltage changes from the power quality problems by making reactive power exchange with the network.

In this thesis, D-STATCOM effects to voltage sags in medium voltage networks analysed, usage of D-STATCOM and its effects were observed for the mitigating voltage sags. D-STATCOM model was designed with the MATLAB Simulink Toolbox. With the different scenarios D-STATCOM's behavior observed and control in the network was analysed at the state of voltage sag, swell.

D-STATCOM based on the voltage source converter (VSC) principle. Sinusoidal Pulsed With Modulation (SPWM) technique which offers simplicity and good response was used for the switching strategy of two level voltage source converter (VSC). D-STATCOM injects current to the system for the mitigating of voltage sags. In this thesis, 6-pulse D-STATCOM configuration with IGBT was designed.

Consequences show that, with the effective voltage regulation capability, D-STATCOM responded very effectively for the mitigation of voltage sag or voltage swells from power quality problems in medium voltage networks. The percentage of voltage sag of the load point was mitigated substantially while D-STATCOM connected in network.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Enerji (Güç) kalitesi, gelişen ve rekabete dayalı enerji piyasasında tüketiciyi olduğu gibi, üretici ve dağıtıcı şirketleri de etkileyen bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımında meydana gelen problemler, müşteriye verilen enerjinin istenen normlara uygunluğunu bozmakta ve bunun sonucu olarak da maddi kayıplar oluşmaktadır. Tüketicinin hassas cihazları, akım, gerilim ve frekansta meydana gelen değişikliklerden olumsuz yönde etkilenmektedir. Satın alınan enerjinin normlara uygun olmaması sonucunda ürün ve iş gücü kaybının yanı sıra ürün kalitesindeki azalmalar, endüstride karşılaşılan enerji kalitesi kaynaklı sorunların en belirgin olanlarıdır. Petrokimya tesisleri, rafineriler, kağıt fabrikaları, demir-çelik tesisleri enerji kalitesizliğinden etkilenen tesislerin başında gelmektedir.

Alternatif enerji sistemlerinde, enerji kalitesinin sağlanması için gerekli bazı şartlar bulunmaktadır. Akım ve gerilimin saf sinüs dalga şekline sahip olması, frekansın nominal değerinde sabit kalması (50 Hz veya 60 Hz gibi) ve yük üzerindeki gerilimin efektif olarak anma değerinde olması (ya da kabul edilebilir sınırlar içinde olması) istenen kalite şartlarının basitçe ifade edilmiş şeklidir. Enerji kalitesi, bu zorunlulukların her koşulda sağlanması ile orantılıdır.

Elektrik enerjisinin kalitesi, endüstriyel tesislerdeki üretim kalitesini ve verimliliğini de etkilemektedir. Cihazlar kesinti veya sağlanması zorunlu değerlerden farklı değerlerdeki enerji ile beslendiklerinde istenen performansı veremez. Kalitesiz enerji, sadece sanayide değil, elektrikli ev aletleri ve elektronik cihazlarda da sorunlara yol açabilir. Bilgisayarlar, televizyonlar, vb hassas cihazlar özellikle gerilim ve frekans değişimlerinden etkilenirler. Aşırı ve düşük gerilimler ile harmonikler en sık rastlanılan sorunların başında gelmektedir.

Bu nedenlerden dolayı; enerji kalitesi, elektrik enerjisinin tüketildiği her yerde ve her türlü gerilim seviyesinde önemini arttırmaktadır. Genel olarak enerji kalitesi kavramı; tüketici cihazlarının yanlış çalışması ya da arızalanması ile sonuçlanabilen, akım, gerilim ve/veya frekansta meydana gelen değişmeler şeklinde kendini gösteren her türlü problem olarak tanımlanmaktadır [1].

Şebekenin herhangi bir yerinde meydana gelen kısa devre sonucunda, şebeke genelindeki yükler üzerinde bir miktar gerilim düşümü meydana gelir. Bunu önlemek mümkün değildir. Ancak etki alanının daraltılması ya da kısmen alınan önlemler ile belirli bir yük bölgesinde gerilimi yükseltici çözümler üretilmektedir.

Dağıtım sistemlerinde kullanılan gerilim arttırıcı cihazların kritik yüklerde gerilim düşümünün etkisinin azaltılmasında önemli rolü olduğu bilinmektedir. Statik VAR Kompanzatörleri, Akım Sınırlayıcılar ve Dinamik Gerilim Düzenleyicileri önerilen belirli cihazlardan belli başlı olanlarıdır [2].

Endüstriyel uygulamalardaki güç kalitesi problemleri, bozulmalar, gerilim sarkması ve yükselmesi, fliker, kesintiler, harmonik bozulmalar gibi geniş bir aralıktadır. Bu problemleri çözmek için güç elektroniği elemanları önerilir.

Güç sisteminin kalite ve performansı reaktif güç kompanzasyonu ile geliştirilebilir. Reaktif güç kompanzasyonu, güç iletim sistemlerinin denetlenmesinde önemli sorunlar arasında bulunmaktadır. Reaktif güç, şebekedeki enerji iletim kapasitesini azaltarak ve hat sonundaki gerilimin genliğinde büyük değişmelere neden olur [3]. Geleneksel kompanzasyon sistemleri, güç kalitesi problemlerine karşı yük noktasındaki reaktif güç ihtiyacını hızlı talep edememesi ve tepki süresinin uzun olmasından dolayı gerekli oranda kapasitif reaktif gücü sağlayamamaktadır. Bu sebeplerden dolayı, talep edilen reaktif güç ihtiyacını hızlı bir şekilde sağlayabilmek ve güç iletim kapasitesini arttırmak için, güç elektroniği elemanları yardımı ile reaktif güç kompanzasyonu tercih edilir.

Son yıllarda gelişen güç elektroniği elemanları sayesinde ortaya çıkan FACTS (flexible a.c. transmission systems, esnek alternatif akım iletim sistemleri) yapıları ile güç sistemlerinin daha hızlı ve etkin bir şekilde denetlenebilmesi, güç sistemi iletim kapasitesinin artırılabilmesi, reaktif güç kompanzasyonu ile akım, gerilim kontrolü mümkün olmuştur.

FACTS cihazları, iletim hatlarının kompanzasyonunda anahtarlamalı dönüştürücü devreleri vasıtası ile reaktif güç alışverişi yapabilmektedirler. FACTS denetleyici yapılarının temel yapısını güç elektroniği elemanları oluşturmakla beraber elektrik enerjisinin denetimi bu elemanların çalışma hızına bağlı olarak oldukça hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Bu denetleyiciler arasında en gelişmiş olanları STATCOM (statik senkron kompanzator) ve SSSC (statik senkron seri kompanzator) denetleyicileridir [4].

STATCOM, reaktif gücü üretebilme ve tüketebilme, elektrik güç sisteminin özel parametrelerinin kontrolünü yapabilmesi için çıkış değerlerini değiştirebilme özelliklerine sahip paralel bağlı bir reaktif güç ekipmanıdır. STATCOM 'da güç elektroniği elemanları kullanıldığı için STATCOM üç faz geriliminin değerini ve faz açısını hızlı bir şekilde kontrol edebilir.

Dağıtım statik senkron kompanzatoru (D-STATCOM), dağıtım sistemlerindeki güç kalitesi problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılan güç elektroniği tabanlı cihazlardan biridir. D-STATCOM' un esas avantajı, dağıtım sistemine enjekte edilen akımı etkili bir şekilde ayarlayabilen güç elektroniği tabanlı kontrole sahip olmasıdır. İkinci avantajı çok çeşitli uygulamalara sahip olmasıdır; zayıf yük güç faktörlerinin etkisini giderme, yük akımlarındaki harmonik içeriklerin etkisini azaltma, sarkma ya da yükselmeye karşı dağıtım barasının gerilimini düzenleme, yükün reaktif güç ihtiyacının kompanzasyonu ve daha fazlası gibi [5].

Bu tez çalışmasında, orta gerilim şebekelerindeki gerilim sarkmasına D-STATCOM' un etkileri incelenmiş, sarkma sorununun azaltılmasında D-STATCOM' un kullanılması ve etkileri gözlemlenmiştir. Tezin 2. bölümünde güç kalitesi ve



problemlerinden ayrı başlıklar altında kısaca bahsedilmektedir. Kısa süreli değişimler, gerilim sarkmasının tanımı, oluşma sebepleri, karakteristiği, orijini ve sınıflandırılması yapılmıştır.

Tezin 3. bölümünde, dönüştürücülerin yapıları incelenmiş, D-STATCOM' un yapısında bulunan gerilim beslemeli dönüştürücüler (VSC), tek faz ve üç faz gerilim beslemeli dönüştürücülerden bahsedilmektedir. D-STATCOM' un kontrol tekniklerinden sinüsoidal darbe genişlik modülasyon tekniği (SPWM) incelenmiştir. Dördüncü bölümde, D-STATCOM detaylı bir şekilde açıklanmış, literatür bilgilerine yer verilmiştir. Genel yapısı, eşdeğer devre modeli, çalışma prensibi, kapasitif ve endüktif modu fazör diyagramları ile anlatılmaktadır.

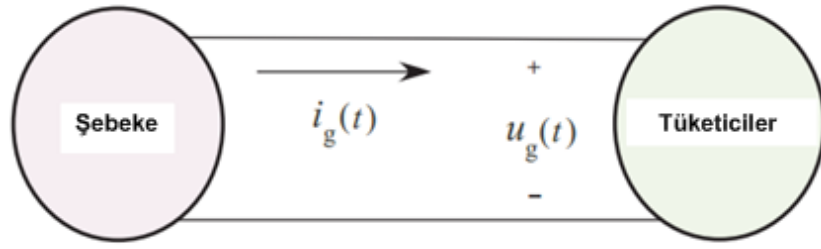
Beşinci bölümde, gerilim sarkmasına D-STATCOM' un etkilerini incelemek için D-STATCOM' un benzetimi MATLAB Simulink Toolbox' ı kullanılarak yapılmıştır. Farklı durum senaryoları uygulanarak modellenen D-STATCOM' un davranışı gözlenmiş, gerilim sarkması veya yükselmesi durumlarında şebekedeki kontrolü sayısal veriler ile incelenmiştir. Altıncı bölümde, yapılan çalışmanın önemli sonuçları aktarılmıştır.

## BÖLÜM 2. GÜÇ KALİTESİ

Teknolojinin gelişmesi ile beraber yeni nesil elektronik cihazların ve mikroişlemci temelli cihazların ortaya çıkması; artan tüketim talebine paralel olarak; endüstride sürekli ve kesintisiz üretime ihtiyaç duyulması; enerji kalitesi için belli standartların ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

Güç kalitesi, ideal sinüs dalgasının istenen seviyede sabit genlik, sabit frekans ve dengeli karakteristiğe sahip olmasıdır. Fakat bu tür enerji, kısa devre hataları gibi operasyonu etkileyen kaçınılmaz hatalar sonucu pratikte sağlanamamaktadır. Diğer bir taraftan üreticiler, güç sistemine bağlı tüketicilerin sinüsoidal akım çekmesini beklerken, güç kalitesini etkileyen hatalar sonucu ideal sinüs dalgasında sapmalar olabilmektedir.

Güç kalitesine olan ilgi, şebekede oluşan çeşitli sorunlar sonucu son zamanlarda artış göstermektedir. Cihazların, gerilim bozulmalarına karşı daha az tolere edici davranışları ve güç sistemine olan olumsuz etkileri bu sorunlar arasında gösterilebilir. İletim ve dağıtım sistemleri, tüketicilerin ideal sinüs dalgası çekmesini ister. V-I karakteristiği lineer olmayan yükler, ideal olmayan sinüsoidal akım çeker ve bu akımlar şebekede gerilim düşümlerine sebep olur. Üretici ve tüketiciler arasındaki ilişki Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Tüketiciler  $U_g(t)$  gerilimini talep ederken, üreticiler  $I_g(t)$  akımını karşılar.



Şekil 2.1. İletim-dağıtım sistemi - tüketici arasındaki güç ilişkisi [6].

Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımında meydana gelen problemler, müşteriye verilen enerjinin istenen normlara uygunluğunu bozmakta ve bunun sonucu olarak da maddi kayıplar oluşmaktadır. Tüketicinin hassas cihazları, akım, gerilim ve frekansta meydana gelen değişikliklerden olumsuz yönde etkilenmektedir. Satın alınan enerjinin normlara uygun olmaması sonucunda ürün ve iş gücü kaybının yanı sıra ürün kalitesindeki azalmalar, endüstride karşılaşılan enerji kalitesi kaynaklı sorunların en belirgin olanlarıdır.

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 içinde olması, istenen kalite şartlarının ifade edilmiş halidir. Enerji kalitesi, bu zorunlulukların her koşulda sağlanması ile orantılıdır.

## 2.1. Güç Kalitesi Problemleri

Güç kalitesi problemleri, hassas endüstriyel yüklerin operasyonunu bozacak ve üretim kayıplarına sebep olacak geniş aralıktaki bozulmaları kapsamaktadır. Güç kalitesi problemlerinde farklı sınıflandırmalar mevcuttur. IEEE 1159:1995 standardına göre enerji kalitesi problemlerini 7 başlık altında toplanmaktadır:

- Geçici Olaylar (Transients)
- Kısa Süreli Değişimler
- Uzun Süreli Değişimler
- Gerilim Dengesizliği

- Dalga Formu Bozukluğu
- Gerilim Dalgalanmaları
- Güç Frekansı Değişimleri

Bu standarda göre Tablo 2.1.'de elektrik enerji kalitesi problemlerinin süre ve büyüklükleri gösterilmiştir.

Tablo 2.1. IEEE 1159:1995 standardına göre enerji kalitesi problemleri ve karakteristikleri

No	Kategoriler	Dalga İçeriği	Şekli	Tipik Devam Süresi	Tipik Gerilim Genliği	
1.0	Geçici Olaylar	Anlık Darbeler	Nanosaniye	5 ns yükseliş	<50ns	
			Mikrosaniye	1 µs yükseliş	50 ns - 1 ms	
			Milisaniye	0.1 ms yükseliş	>1ms	
		Salınımlar	Düşük Frekanslı	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
	Orta Frekanslı		5 - 500 kHz	20 µs	0 - 8 pu	
	Yüksek Frekanslı		0.5 - 5 MHz	5 µs	0 - 4 pu	
2.0	Kısa Süreli Değişimler	Ani Değişimler	Kesinti		0.5 -30 periyot	< 0.1 pu
			Gerilim Çökmesi (Sag)		0.5 -30 periyot	0.1 - 0.9 pu
			Gerilim Yükselmesi (Swell)		0.5 -30 periyot	1.1 - 1.8 pu
		Geçici Değişimler	Kesinti		30 periyot - 3 sn	< 0.1 pu
			Gerilim Çökmesi (Sag)		30 periyot - 3 sn	0.1 - 0.9 pu
			Gerilim Yükselmesi (Swell)		30 periyot - 3 sn	1.1-1.4 pu
	Uzun Süreli Değişimler	Geçici Değişimler	Kesinti		3 s - 1 dk	< 0.1 pu
			Gerilim Çökmesi (Sag)		3 s - 1 dk	0.1 - 0.9 pu
			Gerilim Yükselmesi (Swell)		3 s - 1 dk	1.1-1.2 pu
		Uzun Süreli Değişimler	Tam Kesinti		Sürekli Durum	0.0 pu
			Düşük Gerilim		Sürekli Durum	0.8-0.9 pu
			Yüksek Gerilim		Sürekli Durum	1.1-1.2 pu

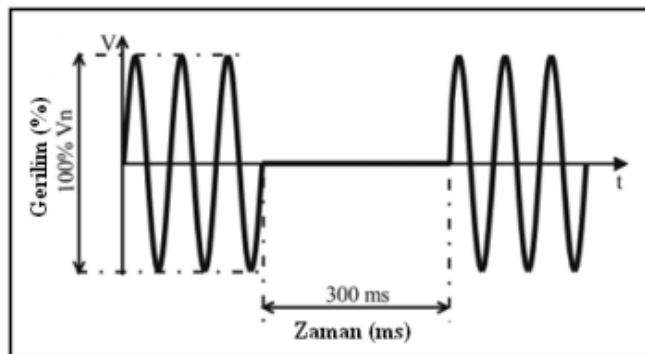
Tablo 2.1. (Devamı)

4.0	Gerilim Dengesizliği		Sürekli Durum	0.5- 2 %	
5.0	Dalga Şekli Bozuklukları	DC Offset	Sürekli Durum	0-0.1 %	
		Harmonikler	0-100. Harmonikler	Sürekli Durum	0- 20 %
		Gizli Harmonikler	0-6 kHz	Sürekli Durum	0-2 %
		Çentikler		Sürekli Durum	
		Gürültü	Geniş Band	Sürekli Durum	0.1 %
6.0	Gerilim Dalgalanmaları	<25Hz	Aralıklı	0.1-7 %	
7.0	Güç Frekansı Değişimleri		< 10s		

### 2.1.1. Kısa süreli değişimler

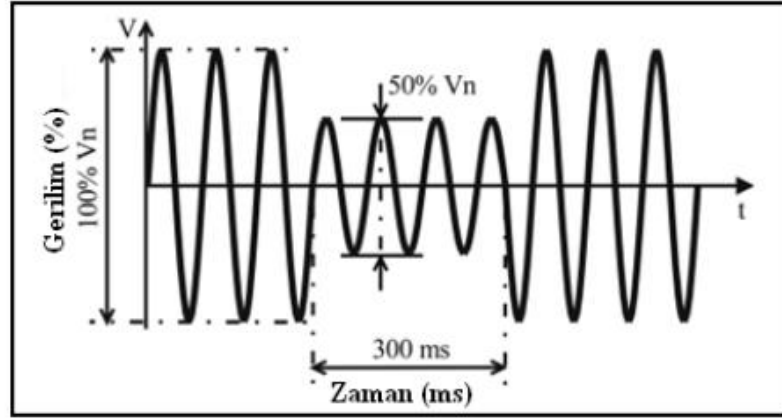
Kısa süreli değişimler, gerilim sarkmaları ve kısa kesintileri içerir. Kısa süreli değişimler sürelerine bağlı olarak, ani (instantaneous); kısa süreli (momentary) ve geçici (temporary) olmak üzere üç kategoriye ayrılır. Hata lokasyonu ve sistem koşullarına bağlı olarak, hatalar gerilim sarkması (sag), gerilim yükselmesi (swell) ya da gerilim kesintisine (interruptions) sebep olur.

Kesintiler Şekil 2.2.'de olduğu gibi, besleme gerilimi ya da yük akımının bir dakikayı aşmayacak periyot zamanı için 0.1 pu'nun altına düşmesi durumunda oluşur. Kesintiler; güç sistemlerindeki hatalardan, cihaz arızalarından ve kontrol arızalarından kaynaklanabilir. Kesintiler, gerilimin genliğinin daima nominal değerinin %10'u altında olduğundan, süreleri ile ifade edilir. Şebekedeki hata sonucu oluşan kesintinin süresi, şebekedeki koruma cihazının çalışma süresi ile tanımlanır.



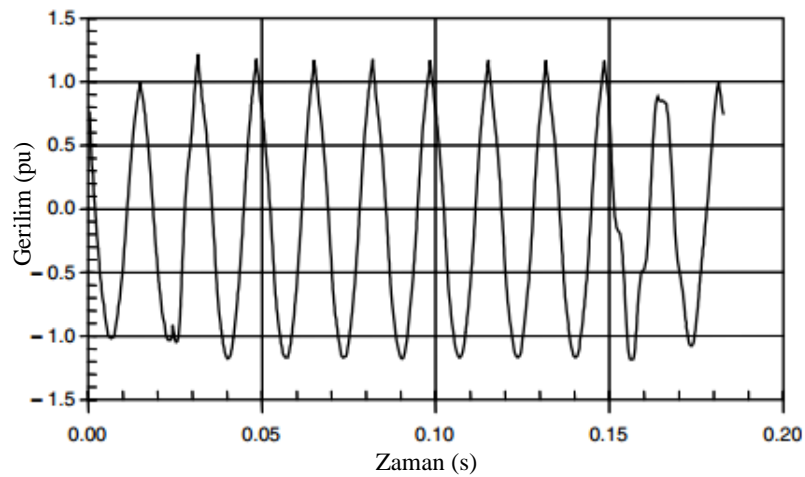
Şekil 2.2. Kısa süreli kesinti [7].

Gerilim sarkması Şekil 2.3.'de olduğu gibi 0.5 çevrim ile 1dk'luk süre arasında gerilim veya akımın etkin değerinin 0.1 pu ile 0.9 pu değeri arasına düşmesidir. Gerilim sarkması detaylı olarak Bölüm 2.2.'de detaylı incelenecektir.

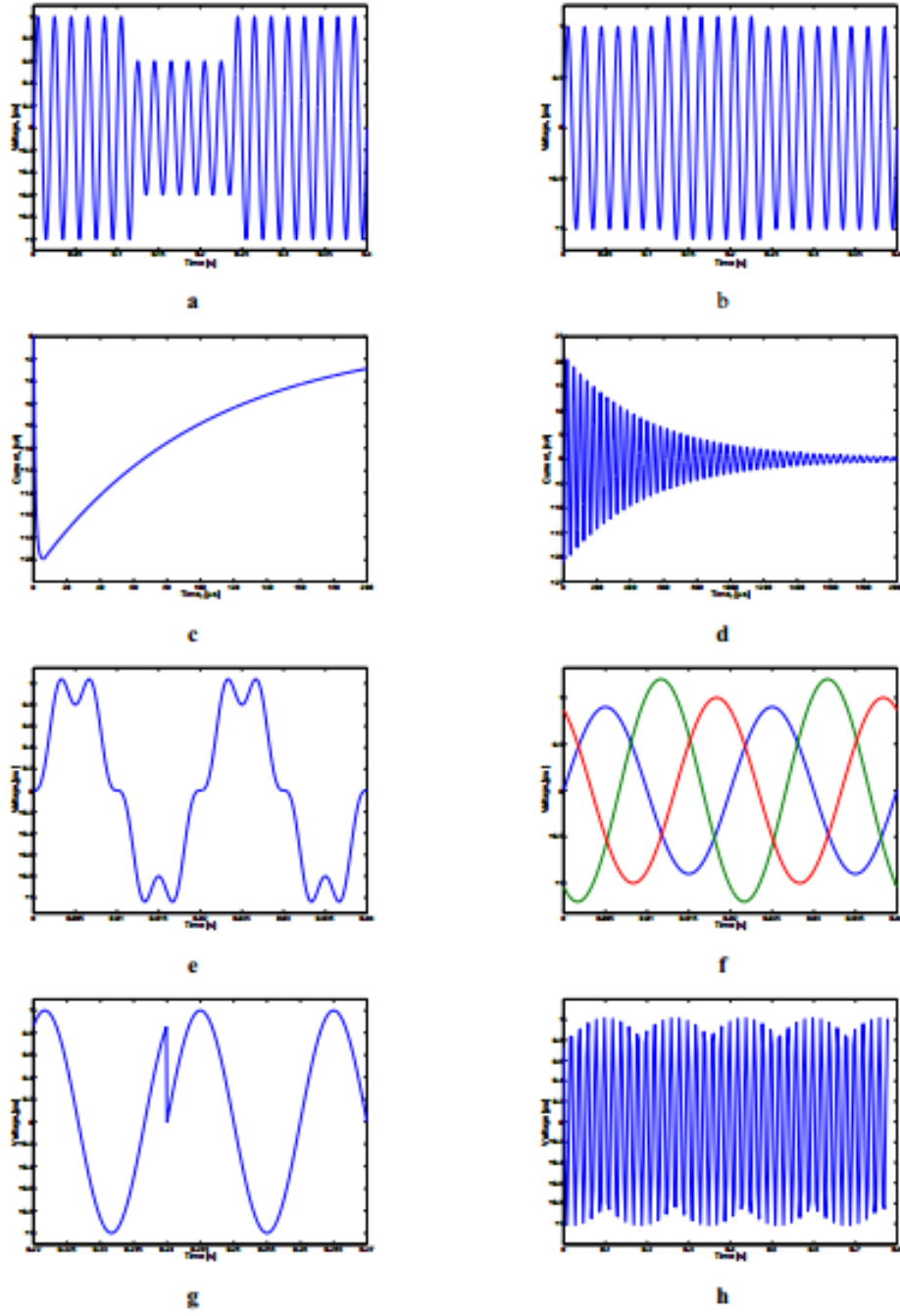


Şekil 2.3. Gerilim sarkması [7].

Gerilim yükselmesi (swell – Şekil 2.4.); 0.5 çevrim ile 1dk'luk süre arasında gerilimin ya da akımın etkin değerinin 1.1 pu ile 1.8 pu değeri arasında yükselmesidir. Gerilim yükselmesi durumu, tek faz toprak hatası boyunca hatasız fazdaki gerilimin yükselmesi sonucu oluşabilir. Gerilim yükselmesi genlik (etkin değer) ve süre ile karakterize edilir. Hatalı durum boyunca gerilim yükselmesinin değeri, hata pozisyonu, sistem empedansı ve topraklamanın bir fonksiyonu olarak değişiklik gösterir.



Şekil 2.4. Gerilim yükselmesi [8].



Şekil 2.5. Güç kalitesi problemleri örnek dalga şekilleri: a) Gerilim sarkması, b) Gerilim yükselmesi, c) Gerilim veya akım darbesi, d) Salımlı akım veya gerilim darbesi, e) 5. Harmonik bozulma, f) Gerilim dengesizliği, g) Faz açısı atlaması, h) Gerilim oynaması [6].

## 2.2. Gerilim Sarkması

### 2.2.1. Gerilim sarkması tanımı ve sebepleri

Gerilim sarkması yarım çevrim ile 1 dakikalık süre boyunca geriliminin etkin değerinin 0.1 pu ile 0.9 pu arasındaki bir değere düşmesi olarak tanımlanır. %20'lik bir gerilim sarkması, gerilimin etkin değerindeki % 20'lik bir azalma ile 0,8 pu değerine düşmesi anlamına gelmektedir. Gerilim sarkması, en çok karşılaşılan güç kalitesi problemlerinden biridir ve etkileri şebekede olumsuz sonuçlar yaratmaktadır.

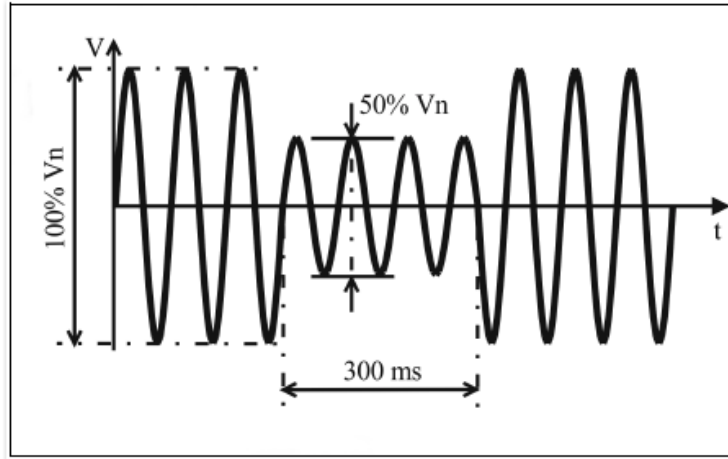
Gerilim sarkmaları, kısa devre arızaları ve büyük güçlü motorların devreye girmesi nedeniyle gerilimin etkin (rms) değerinde oluşan kısa süreli azalmalardır. Gerilim sarkmasına olan ilgi onların farklı ekipmanlar üzerinde neden olduğu problemlerdir. Ayarlanabilir hız sürücüleri, proses kontrol ekipmanları ve bilgisayarlar özellikle bunlara örnek verilebilir. Etkin gerilim (rms) bir ya da iki çevrimden daha uzun bir süre %90'ın altına düşerse ekipman açar. Eğer bu kağıt fabrikasının proses kontrol ekipmanı olsa sarkmadan doğan hasar çok büyük olacaktır. Gerilim sarkmaları endüstriye kısa veya uzun kesintiler olarak zarar vermez fakat kesintilerden çok gerilim sarkmaları olduğunda sarkmadan dolayı toplam hasar çok daha fazladır. Gerilim sarkmalarındaki bir diğer önemli özellik azaltılması çok zor olmalarıdır. Kısa kesintiler ve çoğu uzun kesintiler yerel dağıtım şebekesindeki pahalı yöntemler ile kolayca önlenemez. Ekipman terminallerindeki gerilim sarkmaları iletim hattındaki yüzlerce kilometre uzaklıktaki kısa devre hatalarından dolayı olabilir. Bunu önlemek için kolay bir yöntemin olmadığı açıktır.

Gerilimin genliğinde meydana gelen kısa süreli azalmalar (Şekil 2.6.), gerilim düşümü olarak tanımlanır [9]. IEEE Std 1159-1995 [10] 'e göre; gerilim sarkması nominal gerilimin %10'u ile %90' ı arasında olmakta ve sarkma süresi yarım periyottan bir dakikaya kadar değişebilmektedir.

Enerji kalitesi konularında çalışan bilimsel topluluklarca kısa süreli gerilim sarkmaları için İngilizce “sag” terimi kullanılmıştır. Bu terim resmen tanımlanıp



kabul edilmemiş olmasına rağmen artan oranda kabul görmüştür. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından bu olay için “dip” terimi öngörülmüştür. Her iki terimde birbiri yerine kullanılabilir şekilde dikkate alınmaktadır. Genellikle “sag” terimi ABD'deki enerji kalitesi çalışma gruplarınca tercih edilmektedir [1].



Şekil 2.6. 300ms süre ile %50'lik gerilim sarkması örneği [7].

Gerilimin, sarkma sırasındaki genliğinin nominal değerinin %10'undan daha aşağıya düşmesi durumuna gerilim kesilmesi denilmektedir ve bu durumda cihazların kesintiye maruz kaldığı öngörülmektedir. Genel olarak gerilim düşümü ve gerilim kesilmeleri birbiriyle yakından ilgili konular olduğundan beraber incelenmektedir.

Gerilim düşümünün sebepleri arasında akımda meydana gelen kısa süreli artışlar gösterilmektedir. Akım artışına neden olan temel sebepler genel olarak büyük güçlü motorların yol alması, trafoların enerjilendirilmesi ve şebekede meydana gelen hatalar, kısa devreler gösterilmektedir [9,11]. Şebekede oluşan kısa devrelerin neden olduğu gerilim sarkmaları iletim, dağıtım sistemleri ve tüketiciler açısından kesintilere ve önemli sorunlara yol açmaktadır.

Endüstriyel tüketicilerin bünyesinde bulunan büyük güçlü motorlara yol verilmesi sırasında yaşanan gerilim düşümleri de o endüstriyel tesis içindeki cihaz ve yüklerde çeşitli sorunlara yol açabilmektedir. Motorların yol alması önceden önlem alınması mümkün olan bir olay olduğundan etkilerini azaltmak mümkündür. Bununla birlikte kısa devre sonucu oluşan gerilim sarkmaları öngörülemez ve şiddetli olabildiğinden

tüketiciler için önemli sorunlara yol açabilmektedir. Kısa devre sonucu oluşan gerilim sarkmalarının şebeke ve tüketiciler üzerindeki etkisi koruma sisteminin performansı ve hata temizleme süresinin kısa olması ile orantılı olarak azalır [12].

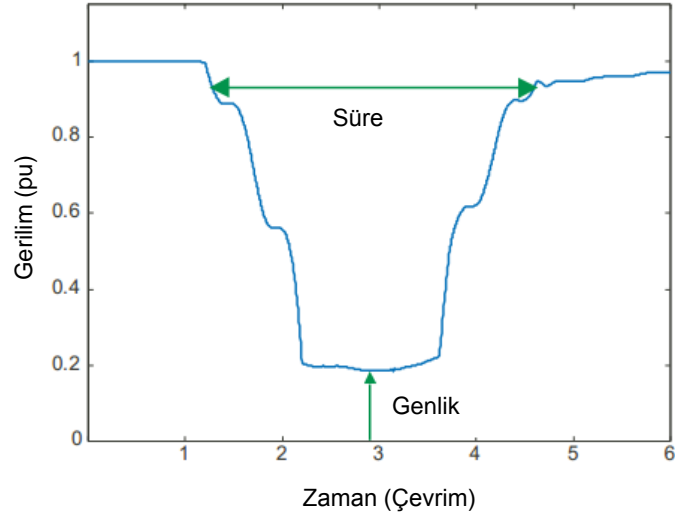
Genlik ve süre, kısa süreli gerilim sarkmalarının iki önemli karakteristik özelliğidir. Gerilim sarkması genliği, yüzde olarak ya da sistem nominal gerilimin birim değeri (pu) şeklindeki net etkin (rms) gerilimdir ve %10'u (0.1 pu) ile %90' ı (0.9 pu) arasında değişir [13].

### 2.2.2. Gerilim sarkması genliği- karakteristiği

Kısa devre hataları sonucu oluşan gerilim sarkmaları, sarkma genliği ve sarkma süresi ile karakterize edilir. Gerilim sarkması genliği, sarkma sonrası kalan gerilimdir ve  $V_{rms}$  etkin değer ile tanımlanır. Kısa devre sonucu oluşan gerilim sarkmasının  $V_{rms}$  etkin değeri Şekil 2.7.'de gösterilmiştir. Bir çevrim için etkin gerilimin değeri;

$$V_{rms}(k) = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=k-N+1}^{i=k} v(i)^2} \quad (2.1)$$

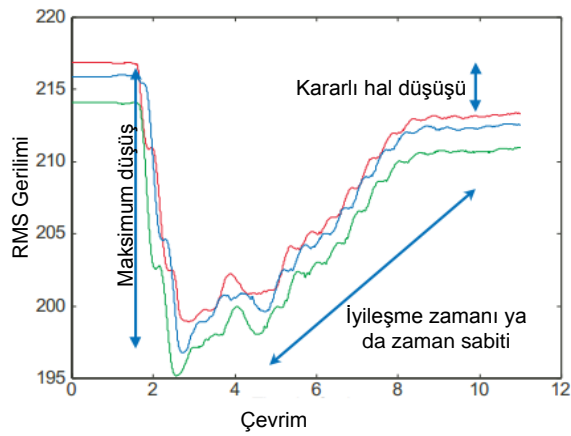
N bir çevrimdeki örnekleme sayısı ve  $v(i)$  zaman domeninde örneklenmiş gerilimi gösterir. Etkin gerilim Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi ani olarak düşük değerine gelmez, geçiş için bir çevrim süresi geçmiştir.



Şekil 2.7. Kısa devre hatası sonucu gerilim sarkması örneği [6].

Sarkma boyunca etkin gerilimin değeri tamamıyla sabit değildir ve hata sonrası ani olarak düzelme gerçekleşmez. Sarkma genliği, sarkma boyunca kalan gerilim ile karakterize edilir, nominal gerilimin yüzdesi olarak verilir. 230V bir sistemde %70 oranında sarkma, gerilimdeki 161V düşüşe karşılık gelir. Gerilim sarkması kısa devre hatasından kaynaklandığında, sarkma süresi, kesici ve korumanın hızından etkilenen hata temizleme zamanı ile karakterize edilir.

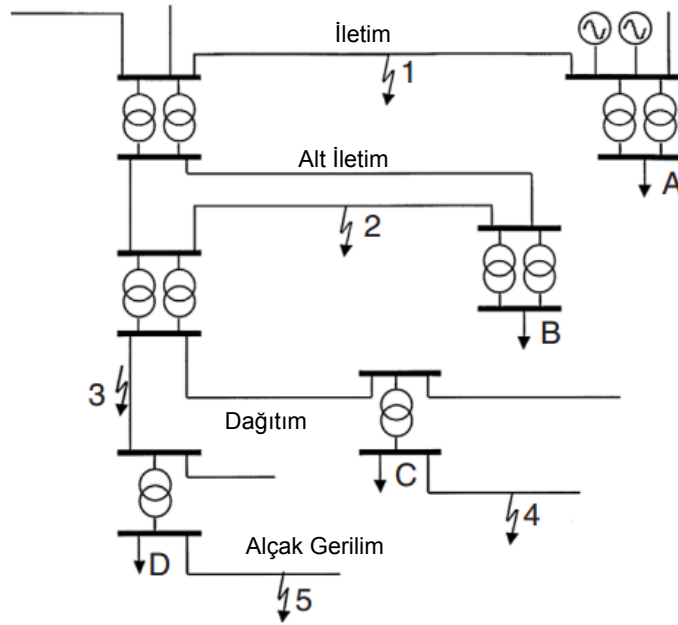
Motora yol verme sonucu oluşan gerilim sarkması Şekil 2.8.'de gösterilmiştir. Sarkma karakteristiğine iyileşme zamanı (recovery time), kararlı hal düşüşü (steady state drop) gibi farklı terimler de dahil olur.



Şekil 2.8. Motor startında gerilim sarkması örneği [6].

### 2.2.3. Gerilim sarkması orijini

Şekil 2.9.'da belirtildiği gibi 1-5 numaraları hata pozisyonlarını, A-D harfleri yükleri gösteren bir dağıtım şebekesi düşünelim. İletim hattında bir hata olduğunda, hata pozisyonu 1 durumu, hatalı hattaki her iki istasyonda ciddi bir sarkma oluşur. Bu sarkma her iki alt istasyondan tüm tüketicilere iletilir.



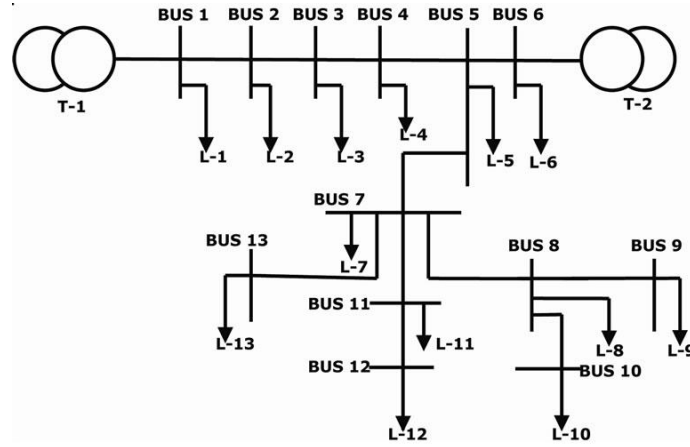
Şekil 2.9. Dağıtım hattı; yükler (A-D) ve hata durumları(1-5) [15].

Alçak gerilim seviyesinde herhangi bir üretime bağlı olmadığından, gerilimi dengede tutacak bir etken yoktur. Sonuçta tüm tüketiciler (A,B,C ve D) ciddi bir sarkmaya maruz kalır. Bir alt istasyonda gerilimi yukarıda tutacak jeneratörler bağlı olduğundan, A'da oluşacak sarkma diğerlerine göre daha az olacaktır. Hata pozisyonu 2 durumu, A'daki tüketiciler için büyük bir sarkma oluşturmayacaktır. İletim ve alt iletim hattı arasındaki trafoların empedansı, yüksek gerilim tarafındaki gerilim düşümünü sınırlayabilecek yeterli büyüklüktedir. A'daki tüketicilerin maruz kaldığı sarkma, alt iletim hattını besleyen jeneratörler tarafından azaltılacaktır. Fakat hata pozisyonu 2 durumu, her iki alt iletim hattındaki istasyonlar ve buradan beslenen tüm tüketiciler (B,C ve D) için ciddi bir sarkma oluşturacaktır. Hata pozisyonu 3 durumu, hata giderilirken D'deki tüketiciler için kısa ya da uzun kesintilere sebep olur. Sadece C'deki tüketici ciddi sarkmaya maruz kalır. B'deki

tüketiciler trafonun empedansı dolayısıyla yüzeysel bir sarkma yaşayacaktır. A'daki tüketiciler tahminen bu hatadan etkilenmeyecektir. 4 no'lu hata durumu, C'deki tüketiciler için ciddi, D'dekiler için sığ bir sarkma oluşturacaktır. 5 no'lu hata durumu D'deki tüketiciler için ciddi, C'dekiler için yüzeysel bir sarkma oluşturacaktır. A ve B tüketicileri 4 ve 5 no'lu hatalardan oluşacak gerilim sarkmasından belirgin bir şekilde etkilenmeyeceklerdir [15].

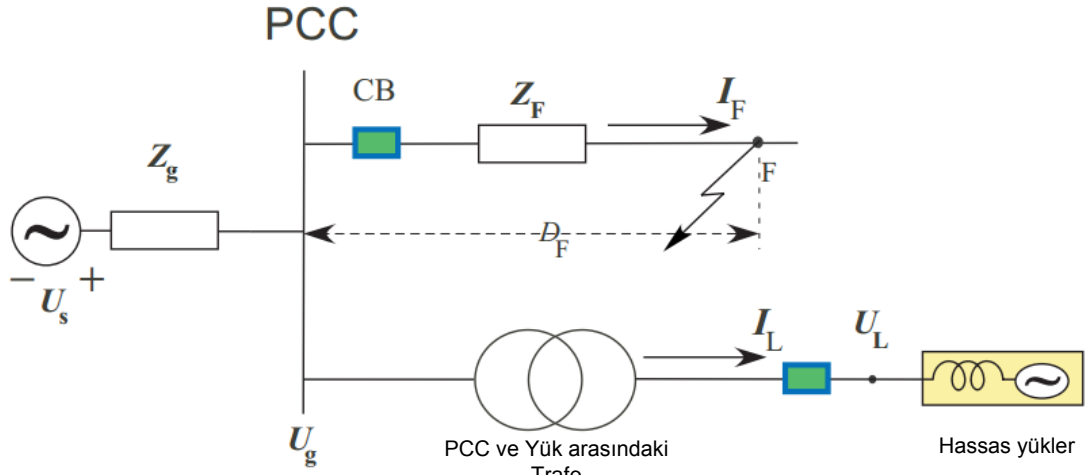
#### 2.2.4. Gerilim bölücü modeli ile gerilim sarkması hesabı

Özellikle dağıtım sistemlerinde kullanılan radyal şebekelerde tek bir kaynaktan çeşitli kollara ve alt kollara ayrılan bir şebeke modeli (Şekil 2.10.) kullanılmaktadır. Bu durumda sadece üretici ve tüketici arasındaki hatta meydana gelen kısa devre sonucu, beslenen tüketicide enerji kesintisi olurken, komşu tüketicilerde kesinti yerine gerilimde kısa süreli düşmeler yaşanacaktır.



Şekil 2.10. Tipik bir radyal dağıtım sistemi prensip şeması

İletim ya da dağıtım hattında kısa devre olduğunda ortak kuplaj noktasında (pcc) gerilim sarkması oluşur. Radyal sistemlerdeki sarkmanın genliğini hesaplamak için Şekil 2.11.'deki gerilim bölücü modeli kullanılır;



Şekil 2.11. Gerilim sarkması için gerilim bölücü modeli

$Z_g$  ortak kuplaj noktasındaki (pcc) kaynağın empedans değeri,  $Z_F$  pcc ile hata arasındaki empedans değerini gösterir. Ortak kuplaj noktası (pcc), hata ile yükün beslendiği noktadır. Diğer bir ifade ile yük akımlarının hata akımlarından ayrı bir dala ayrıldığı yerdir. Hata boyunca ortak kuplaj noktasındaki (pcc) gerilim;

$$U_g = \frac{Z_F}{Z_F + Z_g} U_s \quad (2.2)$$

$Z_F$  empedansı;  $Z_F = R_F + jX_F$ ,  $D_F$  hata mesafesine bağlıdır.  $Z_F = z \cdot D_F$ ,  $z$ : birim uzunluğun empedans değeri,  $D_F$  hata mesafesidir.  $D_F$  arttıkça,  $Z_F$  empedans değeri artış gösterir.

PCC noktasındaki gerilim sarkması hata mesafesine ve kaynağın empedans değerine bağlıdır. Tüketicilere yakın olan hatalar ( $Z_F$  azalacağından) daha derin sarkmalar oluşturur. Hata mesafesi arttıkça bir başka ifade ile ortak kuplaj noktasından (pcc) ne kadar uzakta ise bu baradaki gerilim sarkması şiddeti o kadar az olacaktır. Hata mesafesi arttığında  $Z_F$ , hata noktasına kadar olan empedansın en büyük değerini almaktadır. Şebeke empedansının sonsuz büyüklükte olduğu ( $Z_g = R_g + jX_g = 0$ ) durumlarda, PCC noktasındaki gerilim hata pozisyonundan bağımsız olarak sabittir ve yükler herhangi bir gerilim sarkmasından etkilenmeyecektir. Gerilim sarkması süresi sistemin hata temizleme zamanı ile bağlantılıdır. Kaynak ile hata empedansları

X/R oranının birbirinden farklı olduğu durumlarda ( $X_F/R_F \neq X_S/R_S$ ) faz açısı atlamalı gerilim sarkmaları oluşabilir.

### 2.2.5. Gerilim sarkması tipleri-ABC sınıflandırılması

Gerilim sarkması tipleri, sarkma boyunca her bir üç fazdaki gerilime (genlik, açı) bağlıdır. Genellikle üç faz gerilim sarkmaları ABC sınıflandırılması ya da simetrik bileşenler sınıflandırılması ile kategorize edilir. Fakat ABC sınıflandırılması, basit şebeke modelini temel aldığından kolay olması sebebiyle sıklıkla kullanılan bir metottür. Sonuçta, sınıflandırma kesin olmayan kabuller tabanlıdır ve sarkmanın karakteristiğini saptamak için kullanılamaz.

Simetrik bileşenler sınıflandırılması daha geneldir, ölçülen gerilimleri bir hat boyunca verir, anlaması güçtür. Bir fazdaki gerilim düşümü ile iki fazdaki gerilim düşümü arasında ayırt edilebilir. Üç fazdaki gerilim düşümü fazlar arasında eşit olarak gerçekleşir. Bu iki fazda ve tek fazda ki gerilim düşümü ile aynı limittedir.

ABC sınıflandırılması, bozulmalar trafodan yayılmaya başladığı zaman iletimden dağıtım seviyelerine oluşan sarkma ya da çökmelerin yayılımını analiz etmek için geliştirilmiştir.

Gerilim sarkması tiplerini etkileyen faktörler

Hata tipi, trafo sargı bağlantısı ve yük bağlantısı olmak üzere üç başlık altında toplanır. Bu faktörler özellikle ekipman terminallerinde gerilim sarkması tiplerini etkiler.

#### 1.Hata tipi

Gerilim sarkmaları birincil olarak sistem hatlarından kaynaklanır. Her bir hata tipi, hatalı noktadaki gerilime farklı bir etkiye sahiptir, bu da gerilim sarkması tipleri olarak tanımlanır.

- Tek faz-toprak hatası (SLG)
- Faz-Faz hatası (LL)
- İki Faz-toprak hatası (LLG)
- Üç Faz hatası (3P)

## 2. Trafo sargı bağlantısı

Trafo sargı bağlantıları üç faz dengesiz gerilim sarkmalarını açıklamak için üç tip olarak sınıflandırılır.

- Tip 1- Gerilim değerinde hiçbir değişiklik yapmayan transformatörler bu gruptadır. Primer gerilimin etkin değeri, sekonder gerilime (per unit) eşittir. Bu modele sadece her iki yıldız noktasından da topraklanmış yıldız-yıldız (Ynyn) bağlı trafolar örnek verilebilir.
- Tip 2-Trafolar sıfır seri gerilimini ortadan kaldırır. Bu trafo modellerinde sekonderdeki her fazın gerilim değeri, primer geriliminden sıfır seri gerilimi değerinin çıkartılmasıyla elde edilir. Bu modele örnek olarak, tek noktadan topraklanmış veya iki yıldız noktasından da topraklanmamış yıldız-yıldız (Yny – Yy) bağlı trafolar, üçgen-üçgen (Dd) bağlı trafolar ve üçgen-zigzag (Dz) bağlı trafolar gösterilebilir.
- Tip 3-İki primer gerilim arasındaki farkın sekonder gerilimini verdiği trafolardır. Bu trafolar üçgen-yıldız Dy, yıldız-üçgen Yd, yıldız-zigzag Yz tipinde bağlıdır.

## 3- Yük Bağlantısı

- Yıldız bağlı yük
- Üçgen bağlı yük

ABC sınıflandırılması yukarıda belirtilen 3 faktör tabanlı geliştirilmiştir. Tablo 2.2., kombinasyonları özetler ve gerilim sarkması tiplerini gösterir.



Voltage Sag Type	Fault Type				Transformer Type			Load Connection	
	3P	LL	SLG	LLG	1	2	3	Wye	Delta
A									
B									
C									
D									
E									
F									
G									

Tablo 2.2. Faktörlerin kombinasyonu ve gerilim sarkması tipleri [15].

Örneğin,

- Tek Faz-Toprak (SLG) hatası, tip 2 trafosu- yıldız bağlı yük- D tipi gerilim sarkması beklenir
- İki Faz- Toprak (LLG) hatası, trafo yok ve delta bağlı yük- F tipi gerilim sarkmasına karşılık gelir

Ek olarak, belirtilen tabloya göre, aşağıdaki maddeler not edilebilir:

- Tip A gerilim sarkmaları üç faz hataları, trafo sargısı ve yük bağlantıları kaynaklı oluşur
- Tip B gerilim sarkmaları sadece tek faz toprak hatası (SGL) kaynaklıdır
- Tip C ve D, tek faz toprak hatası (SGL) ya da faz-faz (LL) hatalarından kaynaklanır
- Tip E,F & G sadece iki faz-toprak (LLG) hatasında beklenir
- Trafo sargısı ve yük bağlantıları, gerilim sarkması tiplerini değiştirir.

### Üç Faz Dengesiz Kısa Süreli Gerilim Sarkmaları

ABC sınıflandırılması, üç fazlı dengesiz kısa süreli gerilim sarkmalarında yedi tip arasından ayırt edilebilir. A tipi gerilim düşümü dengeli gerilim düşümünü temsil eder. Arıza (gerilim düşümü) sırasında fazların genlikleri ve faz farkları eşit yani simetrik olmaktadır. Yükün yıldız ya da üçgen bağlı olması, yük üzerindeki gerilim düşümü sırasında bu simetriyi değiştirmez. Ayrıca transformatör bağlantı grubu da bu simetriyi etkilememektedir. Üç faz kısa devreler ve motor yol verme durumları A tipi kısa devre olarak sınıflandırılmaktadır [10].

B tipi, meydana gelen tek faz-toprak kısa devresi sonucu yıldız bağlı yüklerde yaşanan gerilim düşümünü ifade etmektedir. İki faz (topraksız) arıza sonucu yıldız bağlı yüklerde C tipi, üçgen bağlı yüklerde ise D tipi gerilim düşümü oluşmaktadır.

Dengeli üç faz hataları, belirli bir faz açısı atlaması ve RMS etkin gerilimde dengeli bir düşüş ile karakterize edilen üç faz dengeli gerilim sarkmasına sebep olur. Dengeli gerilim sarkması aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\overline{U}_1 = \overline{V} \quad (2.3)$$

$$\overline{U}_2 = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\overline{V} \quad (2.4)$$

$$\overline{U}_3 = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\overline{V} \quad (2.5)$$

$\overline{V}$  sarkma genliğini ve faz atlamasını içeren kompleks vektörü oluşturur.

ABC sınıflandırmasına göre, gerilim sarkması tipleri 7 kategoride, A fazı referans kabul edilerek Tablo 2.3.'deki gibi gösterilmiştir. A fazındaki gerilim ile dengeli sistemlerdeki pozitif bileşen gerilimin eşitliği hatırlatılarak, A fazındaki hata öncesi gerilim  $E_1$  ile ifade edilmiştir, Faz ya da fazlar arası sarkmaya maruz kalan gerilim  $V$  ile gösterilmiştir.

<p>Tip A</p> $\bar{V}_a = V$ $\bar{V}_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ $\bar{V}_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$	<p>Tip B</p> $\bar{V}_a = V$ $\bar{V}_b = -\frac{1}{2}E_1 - j\frac{\sqrt{3}}{2}E_1$ $\bar{V}_c = -\frac{1}{2}E_1 + j\frac{\sqrt{3}}{2}E_1$
<p>Tip C</p> $\bar{V}_a = E_1$ $\bar{V}_b = -\frac{1}{2}E_1 - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ $\bar{V}_c = -\frac{1}{2}E_1 + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$	<p>Tip D</p> $\bar{V}_a = V$ $\bar{V}_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}E_1$ $\bar{V}_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}E_1$
<p>Tip E</p> $\bar{V}_a = E_1$ $\bar{V}_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ $\bar{V}_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$	<p>Tip F</p> $\bar{V}_a = V$ $\bar{V}_b = -\frac{1}{2}V - j\left(\frac{\sqrt{3}}{6}V + \frac{\sqrt{3}}{3}E_1\right)$ $\bar{V}_c = -\frac{1}{2}V + j\left(\frac{\sqrt{3}}{6}V + \frac{\sqrt{3}}{3}E_1\right)$
<p>Tip G</p> $\bar{V}_a = \frac{2}{3}E_1 + \frac{1}{3}V$ $\bar{V}_b = -\frac{1}{3}E_1 - \frac{1}{6}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ $\bar{V}_c = -\frac{1}{3}E_1 - \frac{1}{6}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$	

Tablo 2.3. Gerilim sarkması tipleri- ABC sınıflandırılması (Kesik çizgiler hata öncesi faz gerilimini gösterirken, düz çizgiler hata esnasındaki faz gerilimlerini göstermektedir.) [15].

Tablodan aşağıdaki maddeler sıralanabilir:

- A tipi gerilim sarkması, tüm üç faz gerilimlerini aynı oranda azaltır
- Tip B, hatalı fazdaki gerilim düşer
- C tipi sarkma sonucu, hatadan etkilenen her iki fazdaki gerilim sanal eksende genlik ve açı dahil olmak üzere değişikliğe uğrar.
- D tipi sarkma, kalan fazdaki gerilimin genliğinde de düşüşe sebep olması ile birlikte iki etkilenen faz gerilimlerin sadece reel ekseninde değişikliğe sebep olur.

- E tipi sarkma sonucu, iki etkilenen fazda gerilimin genliđi dūşer.
- F tipi sarkma reel ve sanal eksende gerilim değişikliği haricinde D tipine benzerdir
- G tipi gerilim sarkması, C tipine benzerdir fakat gerilim her iki eksende değişir. Ek olarak kalan fazdaki gerilim azalmaya maruz kalır.

## **BÖLÜM 3. DÖNÜŞTÜRÜCÜLER**

Dönüştürücüler yapısında bulunan doğru gerilimden uygun anahtarlama dizisi ile faz açısı, genliği ve frekansı kontrol edilebilir bir alternatif gerilim üretirler. Bu devre evirici ve doğrultucu olarak çalışabildiğinden dönüştürücü olarak adlandırılır. Alternatif gerilim ve frekans uygulamaya bağlı olarak değişken veya sabit olabilir. FACTS uygulamalarında yüksek gerilim ve güç harmonikleri birçok sorun yaratabileceği için çıkış gerilim dalgasının frekansı, dönüştürücün bağlı bulunduğu güç sisteminin frekansına eşit olacak şekilde kontrol edilir. Dönüştürücü için doğru gerilim sabit veya değişken olabilir. Bu doğru gerilim şebekeden, doğrultucu yardımı ile batarya, yakıt hücresi, güneş kolektörlerinden veya dönel bir alternatif akım makinasından sağlanabilir. Dönüştürücülerde genellikle transistör, tristör, MOSFET, IGBT ve GTO gibi yarı iletken anahtarlar kullanılır. Bu elemanlardan transistör ve MOSFET düşük ve orta güç uygulamalarında, tristör ve GTO ise yüksek güç uygulamalarında kullanılır.

Dönüştürücüler aşağıdaki gibi iki kategoride sınıflandırılabilir;

- DC tarafında doğru bir gerilim kaynağı bulunan gerilim beslemeli dönüştürücüler (VSC)
- DC tarafında doğru bir akım kaynağı bulunan akım beslemeli dönüştürücüler (CSC) olarak ikiye ayrılabilir.

### **3.1. Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler (VSC)**

Gerilim beslemeli dönüştürücülerde (VSC) kaynak, gerilim kaynağıdır ve çıkışında gerilim üretilir. VSC' ler de doğru gerilim daima bir polariteye sahiptir ve gücün ters dönüşü doğru akımının ters dönüşü ile sağlanır ve bu nedenle VSC 'de tek yönlü gerilim tutma kapasiteli yarı iletken anahtarlar kullanılır. Performans ve ekonomik

nedenlerden dolayı, gerilim beslemeli dönüştürücüler, Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) uygulamalarında akım beslemeli dönüştürücülere göre daha çok tercih edilir ve uygulama alanının % 90' ın da gerilim beslemeli dönüştürücüler kullanılır [16].

VSC 'lerin geniş uygulama alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir [17],

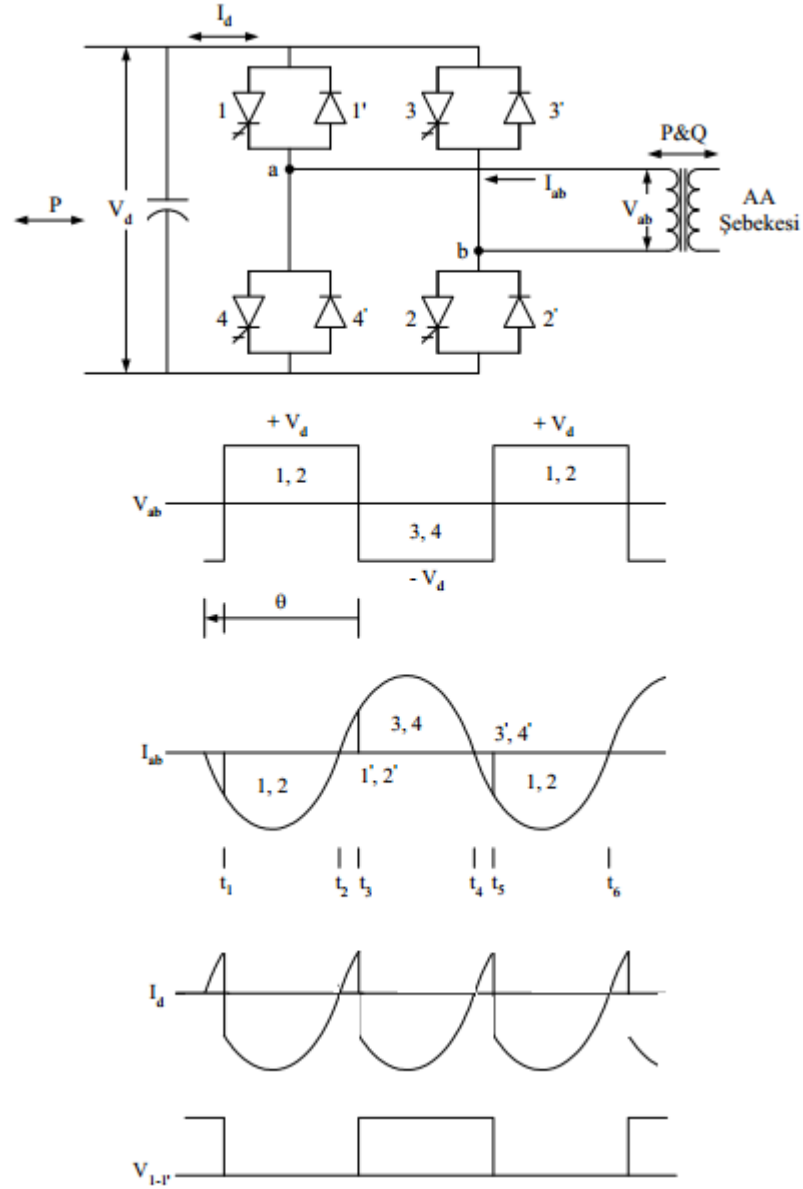
- Alternatif akım motor sürücüleri
- Kesintisiz alternatif akım güç kaynakları
- İndüksiyonla ısıtma
- Statik Var generatörler (SVG) ve statik VAR kompanzatörler (SVC)
- Aktif harmonik filtreler (AHF) şeklinde sıralanabilir.

VSC 'nin gerilim kaynağının genlik değeri değiştirilerek ve dönüştürücün kazancını sabit tutarak değişken genlikli bir çıkış gerilimi elde etmek mümkündür. Bu tip dönüştürücülerde çıkıştaki alternatif gerilimin genliğini değiştirmek için girişteki doğru gerilimin genliği değiştirilir. Çıkıştaki alternatif geriliminin dalga şekli kare dalgaya benzemektedir. Üç fazlı temel dönüştürücü devresi, ters paralel bağlı 6 adet asimetrik yarı iletken anahtarlama elemanlarından oluşan 6 darbeleri evirici yapısı olarak bilinir. VSC' lerde doğru akım her iki yönde de akmaktadır. Bu sebeple dönüştürücü yapılarında çift yönlü akım geçirmeye olanak sağlayan geri besleme diyotları bulunmaktadır. Geri besleme diyotları, yük akımı yön değiştirdiği zaman denetimli anahtarları korumak için denetimli anahtarlama elemanlarına paralel bağlıdır. VSC' lerde yarı iletken anahtarlama elemanları daima doğru gerilimli besleme yüzünden ileri yönlü biaslanmış olarak kalır. Bu yüzden GTO, BJT, IGBT, güç MOSFET 'leri ve IGCT' ler gibi tam denetimli ileri veya asimetrik tutmalı yarı iletken anahtarlama elemanları kullanılması daha uygundur. Tam denetimli anahtarlama elemanlarından önce kullanılan tristörler, denetimli anahtarların gelişmesi ile tercih edilmemektedir. GTO, IGBT, MTO ve IGCT gibi tam denetimli anahtarlama elemanları veya buna benzer tam denetimli elemanlar kapıdan iletme ve kesime gitme özelliğine sahiptirler. Tam denetimli anahtarlama elemanları ile yapılan dönüştürücüler tüm sistem maliyeti ve performans açısından önemli avantajlara sahiptir [18].

Gerilim beslemeli dönüştürücüler, alternatif akım tarafında şebekeye bağlantı transformatörü yardımı ile bağlanırken, doğru akım tarafına bir doğru gerilim kondansatörü ile bağlanır. Kondansatörün, doğru geriliminde değişme olmadığı, doğru akımdaki değişmelere ise dayanabilecek kadar büyük olduğu kabul edilerek, kalıcı durumda bir gerilim kaynağı olarak düşünülebilir.

### 3.1.1. Tek fazlı gerilim beslemeli dönüştürücüler

Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) kontrolörlerinde genellikle üç fazlı dönüştürücüler kullanılır. Tek fazlı dönüştürücüler, gerilim beslemeli dönüştürücülerin (VSC) temel çalışma prensibini açıklamak için incelenmiştir. Tek fazlı tam dalga dönüştürücü, en basit dönüştürücü yapısıdır. Akım, alternatif akım tarafından doğru akım tarafına akıyorsa pozitif (doğrultucu modunda), doğru akımdan alternatif akım tarafına akıyorsa negatif (evirici modunda) olduğu kabul edilir. Kondansatörün dolması için  $I_d$  akımının doğru akım tarafına akması gerekir. Bu  $I_d$  akımı harmonikler içerir ve bu harmonikler tek fazlı tam dalga bir dönüştürücüde iki ve ikinin katlarıdır. Bu dönüştürücü 4 anahtarlama elemanından düzgün bir doğru gerilim sağlamak için bir kondansatörden meydana gelmektedir. Şekil 3.1.'deki gibi 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları ilettime sokulduğunda ilk yarım periyot için  $V_{ab}$  gerilimi  $+ V_d$  olur. Diğer yarım periyotta ise 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanları ilettime sokulup 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları kesime götürülürse,  $V_{ab}$  gerilimi  $- V_d$  olur. Bu alternatif gerilim, alternatif akımın genliği, dalga şekli ve faz açısından bağımsız meydana gelir. Alternatif akım, sistemin gerilimi ve empedansı ile dönüştürücün ürettiği alternatif gerilimin bir sonucu olarak meydana gelir.



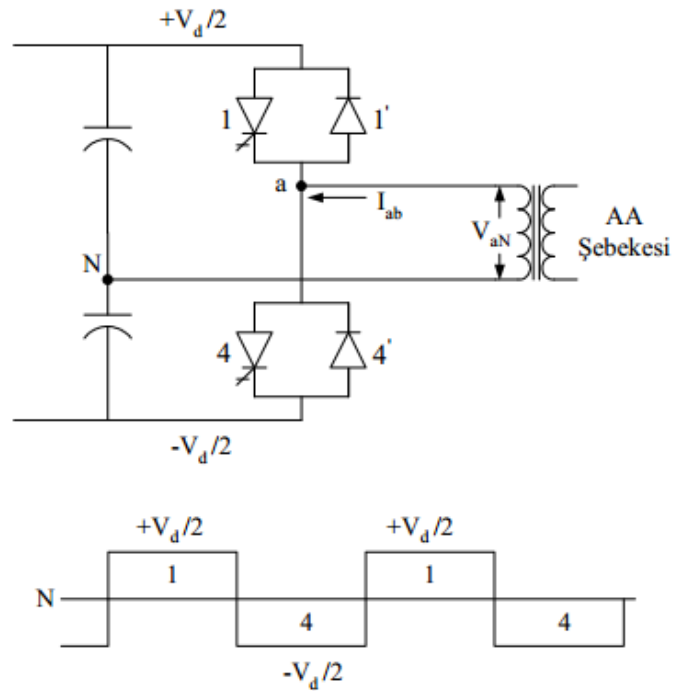
Şekil 3.1. Tek fazlı tam dalga VSC ve akım-gerilimlerinin dalga şekli [18].

Şekil 3.1.'deki gibi sinüzoidal,  $\theta$  açısı kadar ileride ve şebekeden dönüştürücüye doğru bir akım aktığı varsayılırsa,

- $t_1$  ile  $t_2$  zaman aralığında 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları iletimde, 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanları kesimde  $V_{ab}$  pozitif,  $I_{ab}$  negatiftir. Güç akışı, 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları ile dönüştürücünün doğru gerilim tarafından şebekeye doğru, evirici modundadır.



- $t_2$  ile  $t_3$  zaman aralığında akım yön değiştirerek, 1' ve 2' diyotlarından akar,  $I_{ab}$  pozitif olur. Dönüştürücü doğrultucu modunda, güç akışı şebekeden doğru gerilim tarafına doğrudur.
- $t_3$  ile  $t_4$  zaman aralığında 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları kesimde, 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanları iletimdedir.  $I_{ab}$ , 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanlarından aynı yönde akmaya devam eder.  $V_{ab}$  negatiftir. Güç akışı, doğrultucunun doğru gerilim tarafından şebekeye doğrudur (evirici olarak).
- $t_4$  ile  $t_5$  zaman aralığında 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanları iletimde kalmaya devam eder, 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları ise kesimdedir.  $I_{ab}$  3' ve 4' diyotları üzerinden akarak, yön değiştirir.  $V_{ab}$  negatiftir. Doğrultucu modunda, güç akışı ise şebekeden dönüştürücünün doğru gerilim tarafına doğrudur.



Şekil 3.2. VSC 'nin bir faz bacağı ve bir faz bacağının çıkış geriliminin dalga şekli [18].

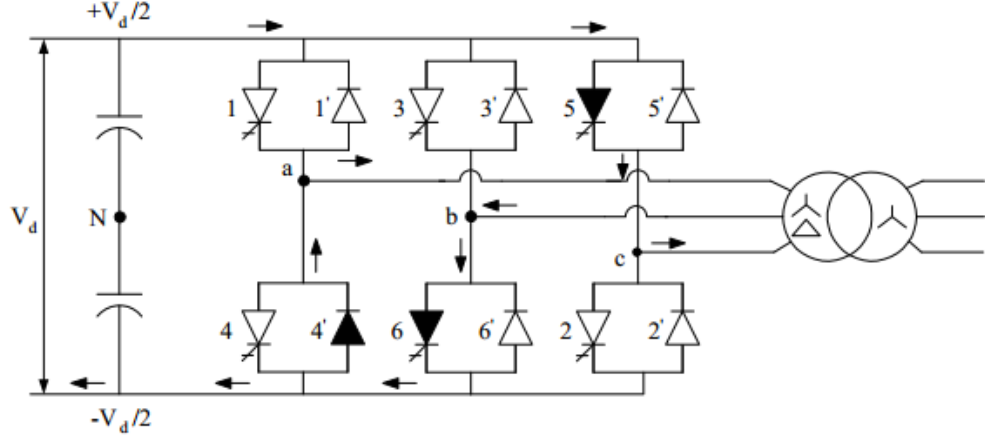
Şekil 3.2.'de bir faz bacağının çalışması incelenmiştir. Devrede anahtarlama elemanları sıralı olarak açılıp kapatılırsa alternatif gerilimin şekli bir kare dalga olur. Bu devreye göre,

- Dönüştürücü yapısındaki diyotlar doğrultucu, denetimli anahtarlama elemanları ise evirici olarak çalışır. Bir periyot boyunca dönüştürücü faz açısı ve net güç akışına göre evirici ya da sadece doğrultucu olarak çalışır. Dönüştürücü birim güç faktöründe doğrultucu olarak çalıştığı zaman sadece diyotlar, evirici olarak çalıştığı zaman ise denetimli anahtarlar iletimdedir.
- Denetimli anahtarlardan herhangi biri kesime sokulduğu zaman alternatif akım gerçeğe tamamen kesilmez. Dönüştürücü birim güç faktöründe çalışmıyorsa, akım bir denetimli anahtardan değil de diyotlar üzerinden akar. Birim güç faktöründe çalışıyorsa ise diğer bir denetimli anahtardan akmaya devam eder. Bir faz bacağı üzerindeki denetimli anahtarlardan biri iletime sokulursa diğeri kesime götürülmelidir. Bunun sebebi, aynı faz bacağındaki denetimli anahtarlar aynı anda iletime sokulursa dönüştürücünün doğru gerilim tarafı kısa devre olur. Kondansatörde kısa devre olan bu bacak üzerinden çok hızlı bir şekilde boşalacağı için faz bacağı üzerinde bulunan denetimli anahtarlar zarar görebilir.
- Denetimli anahtarların anahtarlama ile dönüştürücünün doğru gerilimine bağlı olarak alternatif akımın dalga şekli meydana gelir.
- Dönüştürücü ile şebeke arasında aktif güç alışverişi istenirse, dönüştürücüde DC gerilim kaynağı kullanılması gerekir. Sadece reaktif güç alışverişi için ise dönüştürücüde, doğru gerilim enerji depolama elemanı olarak kondansatör kullanılması gerekir.
- Aktif ve reaktif güç alışverişi, şebeke gerilimine göre dönüştürücün ürettiği alternatif gerilimin faz açısı ve genliğinin yardımı ile bağımsız bir şekilde kontrol edilebilir.

### 3.1.2. Üç fazlı gerilim beslemeli dönüştürücüler

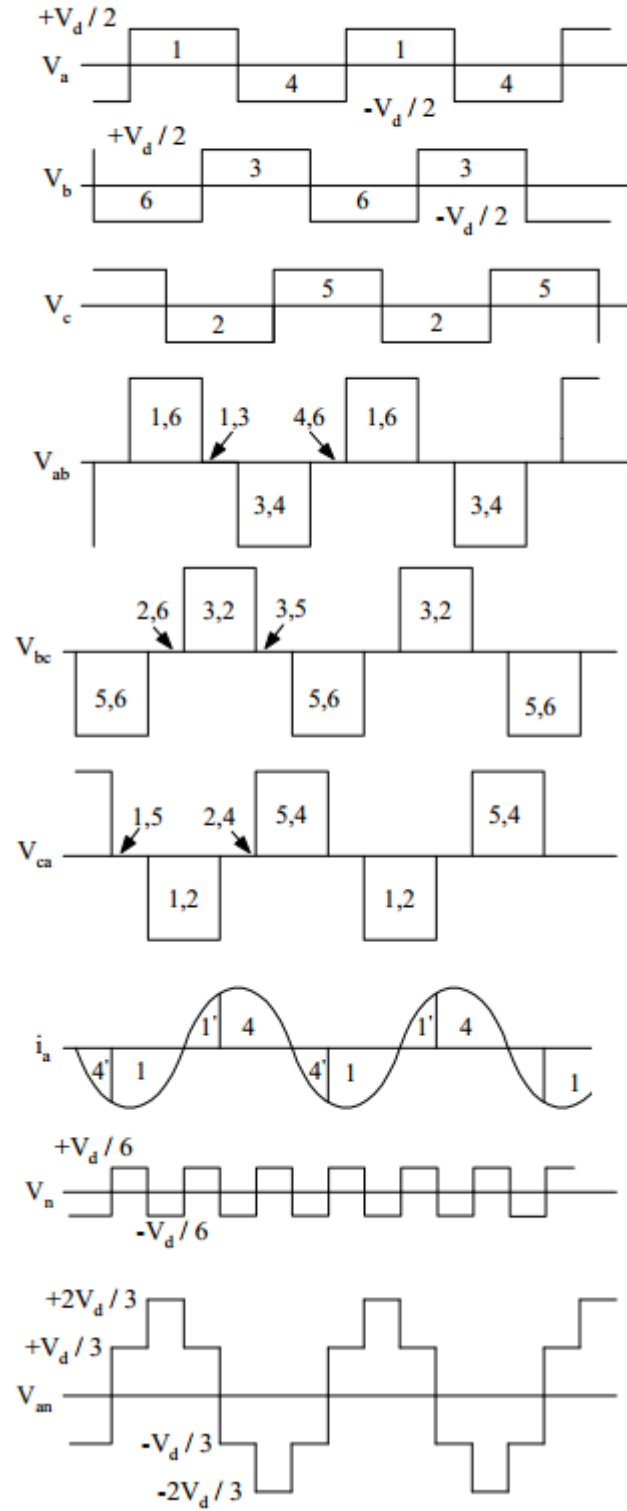
Üç fazlı gerilim beslemeli dönüştürücüler genel amaçlı alternatif akım kaynakları için yaygın olarak kullanılır. Şekil 3.3.'de üç fazlı iki seviyeli bir VSC devresi gösterilmiştir. Dönüştürücüde 6 adet GTO, IGBT gibi denetimli anahtarlama elemanı ve aynı faz bacağı üzerinde bulunan denetimli anahtarlama elemanları kesime

sokulduğu zaman indüktif akımın üzerinden geçmesi için 6 adet denetimsiz anahtar (diyot) kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Üç fazlı iki seviyeli VSC [18].

Üç fazlı dönüştürücüler, aralarında 120 derece faz farkı ve birbiri ile uyum içinde çalışan üç faz bacağından meydana gelir. Bu üç faz bacağından çıkışında kare dalgalar üretilir. Her faz bacağındaki denetimli ve denetimsiz anahtarlama elemanları toplam  $180^\circ$  iletimde kalır ve anahtarlama özelliği her  $30^\circ$  'de değişir. Şekil 3.4.'te dönüştürücünün faz-nötr, faz-faz gerilimleri ve tek faz akımı gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Şekil 3.3' teki üç fazlı VSC 'nin akım ve gerilimlerinin dalga şekilleri [18].

Faz-faz gerilimleri tepe değeri  $V_d$  olan  $120^\circ$  'lik darbe genişliğine sahiptir.  $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  kare dalga gerilimleri, kondansatörün orta noktası  $N$  'ye göre faz çıkış gerilim

değerleridir. Alternatif gerilimin nötr noktası kondansatörün orta noktasına fiziksel olarak bağlandığında, bu gerilimler dönüştürücünün alternatif gerilim tarafının faz-nötr gerilimleri olur. Bu durumda dönüştürücü 6 darbeli tam dalga dönüştürücü olarak değil de iki adet 3 darbeli dönüştürücü olarak çalışır. Bu üç faz bacağı arasında  $120^\circ$ 'lik faz farkı vardır. b faz bacağındaki bulunan 3 ve 6 nolu anahtarlama elemanları, a faz bacağındaki bulunan 1 ve 4 nolu anahtarlama elemanlarından  $120^\circ$  sonra anahtarlanır. Aynı şekilde c faz bacağındaki bulunan 2 ve 5 nolu anahtarlama elemanları, b faz bacağındaki bulunan 3 ve 6 nolu anahtarlama elemanlarından  $120^\circ$  sonra anahtarlanır.

Her faz bacağı bağımsız bir şekilde çalışır ve anahtarlama elemanlarının açılıp kapatılması ile doğru gerilim alternatif bir gerilime dönüştürülür. Güç, şebekeden kondansatöre doğru diyotlar, kondansatörden şebekeye doğru ise denetimli anahtarlama elemanları yardımı ile akar.

### **3.1.3. Darbe genişlik modülasyon tekniği (PWM)**

Bir inverterin temel fonksiyonu, DC giriş gerilimini istenilen genlikte AC çıkış gerilimine çevirmektir. İdeal dönüştürücünün çıkış gerilimi dalga şekli sinüsoidal olmalı iken, pratikte bu dalga şekli sinüsoidal olmayıp farklı harmonikler içerir. PWM tekniğinin başlıca amacı, inverter çıkış gerilimini kontrol etmek ve çıkış gerilimi içeriğindeki harmonikleri azaltmaktır. PWM teknikleri genellikle gerilim kontrolü için kullanılmaktadır. Bu teknikte darbelerin genliği, gerilim beslemeli dönüştürücüyü oluşturmada kullanılan donanım ile belirlenirken, darbelerin genişlik ve süresi, kullanılan kontrol ve modülasyon teknikleri ile belirlenmektedir. Gerilim kaynaklı dönüştürücülerde PWM' i gerçekleştirmek için modülasyon darbelerinin genişliği düşürülerek ve darbe frekansı (1 - 3 kHz) arttırılmaktadır [24].

Darbe genişlik modülasyon (PWM) tekniğinde, modülasyon oranı ve faz açısı kontrol edilerek, dönüştürücü çıkış gerilimi ve reaktif güç cevab hızının arttırılması amaçlanır [19]. Dönüştürücü gerilimi ile AC sistem gerilimleri arasındaki faz farkı ayarlanarak aktif güç akışını kontrol edilir. Kapasitörün şarj veya deşarjı, AC sistem

ile dönüştürücü çıkış gerilimleri arasındaki faz farkına bağlı olarak gerçekleşir. PWM tekniğinde, DC kondansatörün gerilim referansı ( $V_{dc}$ ) sabit genliktedir. Modülasyon oranının ayarlanması, STATCOM' un çıkış gerilimi genliğinin ayarlanmasında etkilidir [20].

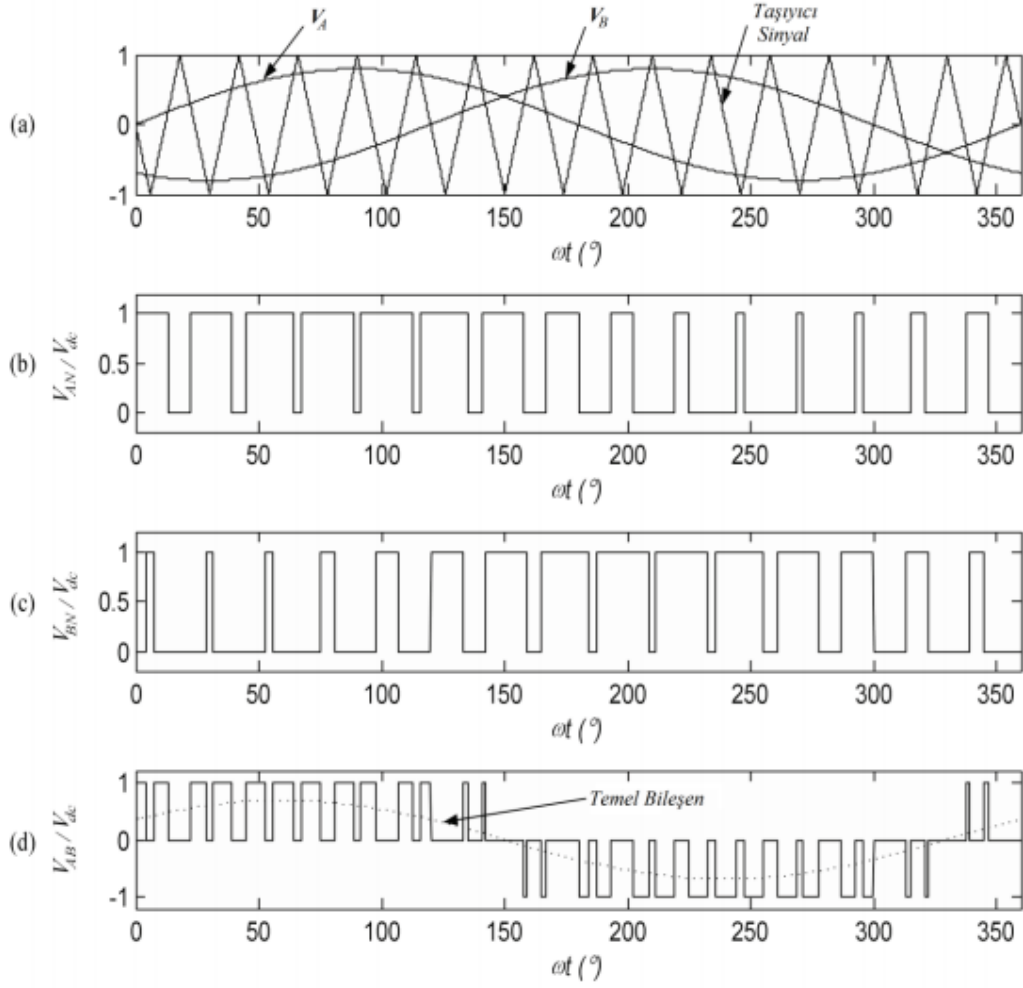
PWM kontrol tekniğinde yarı iletken anahtarlar çıkış geriliminin aynı periyodu içinde sık aralıklı çok kez çalıştırıldığında, ideal AC çıkış gerilim dalgaları elde edilebilir. Darbe sayısının fazla olması ile düşük dereceli harmonikler nötrleştirilerek, ideal sinüzoidal AC çıkış gerilimine yakın bir dalga edilir [21].

### **3.1.3.1. Sinüzoidal darbe genişlik modülasyon tekniği (SPWM)**

PWM anahtarlama tekniğini kullanan gerilim kaynaklı dönüştürücülerde DC giriş gerilimi sabit genliktedir. Dönüştürücünün görevi DC giriş gerilimini genlik ve frekans kontrolü ile AC çıkış gerilimine çevirmektir. PWM dönüştürücülerin esas avantajı, dönüştürücü kazancının ve buna bağlı olarak da dönüştürücünün çıkış geriliminin kontrol edilebilmesidir. Anahtarlama kayıpları ve harmonik bozulmalar gibi dönüştürücü verimlilik parametreleri, dönüştürücüyü kontrol etmede kullanılan modülasyon stratejilerine bağlıdır. Farklı PWM teknikleri bulunduğu gibi, Sinüzoidal darbe genişlik modülasyon tekniği (SPWM), en çok kullanılan darbe genişlik modülasyonu tekniklerinden biridir. SPWM tekniği, inverter çıkış gerilimi ve çıkış frekansını sinüs fonksiyonuna göre doğrudan kontrol edebildiğinden dönüştürücü kontrolünde kullanılır. PWM dönüştürücüleri basit devre şemasına ve dayanıklı kontrol algoritmasına sahip olduğundan güç elektroniği cihazları arasında temel olarak tercih edilir. SPWM anahtarlama tekniği endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilir.

SPWM tekniği her bir periyotta farklı çevrim süreli sabit genlikli darbeler ile karakterize edilir. Bu darbelerin genişliği dönüştürücü çıkış geriliminin kontrolünü sağlamak ve harmonikleri azaltmak için modülasyonludur [22]. Sinüzoidal darbe genişlik modülasyon tekniğinde, üç sinüs dalgası ve yüksek frekanslı üçgen taşıyıcı dalga, PWM sinyalinin üretmek için kullanılır. Genel olarak üç sinüzoidal dalga üç

fazlı dönüştürücü için kullanılır. Sinüs dalgaları referans sinyal olarak adlandırılır ve birbirleri arasında  $120^\circ$  faz farkı bulunur. Bu sinüs dalgalarının frekansı istenilen dönüştürücü çıkış frekansına (50/60Hz) göre seçilir. Taşıyıcı üçgen sinyal dalgası genellikle yüksek frekanslıdır (birkaç kHz). Anahtarlama sinyali, sinüs dalgaları ile üçgen dalganın karşılaştırılması ile elde edilir. Karşılaştırıcı, sinüs gerilimi üçgen sinyal geriliminden büyük olduğu durumda darbe oluşturur ve bu darbe dönüştürücü anahtarlarını tetiklemek için kullanılır. Anahtarların iletme girmesi veya kesime gitmesi için gerekli darbeler, sinüs dalgası ile testere dişli dalganın geçiş noktalarına göre üretilir. Testere dişli dalganın negatif eğimli olduğu yerde sinüs dalgası ile kesiştiğinde 4 nolu anahtarlama elemanına kesime gitmesi için, 1 nolu anahtarlama elemanına ise iletme geçmesi için darbeler gönderilir. Testere dişli dalganın pozitif eğimli olduğu durumda ise belirtilen senaryonun tersi geçerlidir. Tanımsız anahtarlama durumlarından ve VSC çıkışındaki belirsiz AC çıkış gerilimlerinden kaçınmak için dönüştürücünün aynı bacağındaki anahtarlar eş zamanlı olarak kapatılmamalıdır. Faz çıkışları birbirleri ile  $120^\circ$  faz farklıdır.



Şekil 3.5. Altı darbeli VSC için iki seviyeli SPWM metodu, a) referans sinyalleri ve taşıyıcı sinyal ( $f_s=15.f$ ) b) VAN faz gerilimi dalga şekli, c) VBN faz gerilimi dalga şekli, d) VAB faz - faz çıkış gerilimi dalga şekli [34].

Üçgen taşıyıcı sinyalin frekansı ( $f_s$ ), anahtarlama frekansını belirleme etkilidir. Sinüs sinyalleri, istenilen AC çıkış gerilimini, modülasyon sinyallerini ifade eder. Taşıyıcı ve modülasyon sinyallerin frekansı, genliği ve faz açısı; çıkış sinyallerinin frekansını, genliğini ve faz açısını belirler [23]. Frekans modülasyon oranı, taşıyıcı dalga frekansının, modülasyon dalgasının frekansına oranıdır.

$$m_f = \frac{f_T}{f_m} \quad (3.1)$$

Burada  $f_T$ , taşıyıcı dalganın frekansı ve  $f_m$  ise modülasyon dalgasının frekansdır. Frekans modülasyonu  $m_f$ , tek tamsayı seçildiğinde faz nötr gerilimi ve faz-faz



gerilimleri tek simetrilere oluşur. Bu sebeple dönüştürücü çıkış geriliminin sinüs serisi katsayıları sonlu iken, kosinüs katsayısı sıfırdır. Bu sebeple faz - nötr ve faz - faz gerilimlerinde tek sayılı harmonikler görülür iken, çift harmonikler görülmez [18].

Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu tekniğinde dönüştürücü çıkışındaki gerilimin genliği, genlik modülasyonu oranına bağlıdır [25]. Modülasyon oranı  $m_a$  ise,

$$m_a = \frac{V_{\sinüs}}{V_{\text{üçgen}}} \quad (3.2)$$

Burada  $V_{\sinüs}$  modülasyon geriliminin tepe değeri,  $V_{\text{üçgen}}$  üçgen gerilimin tepe değerine karşılık gelmektedir. Modülasyon dalgalarının genliğinin sıfırdan taşıyıcı dalganın genliğine kadar değiştirilmesiyle darbe genişliği,  $0^\circ$ 'den  $180^\circ$ 'ye kadar değiştirilebilir [16]. Modülasyon oranının yüksek çıkış gerilimi 1'e yaklaştırılması ile aşırı modülasyon oluşmakta ve sinüzoidal PWM çıkışı bozulmaktadır [25]. Darbe genişliklerinin modülasyondan oranı değişiminden etkilenmediği bu durum kare dalga çalışma şekli olarak bilinir.

## BÖLÜM 4. D-STATCOM

Reaktif güç kompanzasyonu, güç kalitesini etkileyen önemli problemlerden biridir. Reaktif güç, şebekedeki enerji iletim kapasitesini azaltarak, hat sonundaki gerilimin genliğinde büyük değişmelere neden olur [3]. Reaktif güç kompanzasyonu, enerji sistemlerinde talep edilen reaktif gücü hızlı bir şekilde sağlamak ve kayıpları azaltmak için ilerim hatlarında önem teşkil etmektedir. Sabit veya mekaniksel anahtarlama kondansatör veya reaktör grupları hat boyunca gerilim şeklini kontrol ederek kararlı durumda iletilebilir gücü arttırmak amacı ile uzun süreden beri kullanılmaktadır. Aynı zamanda senkron generatörler iletim ve dağıtım sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu için kullanılmaktadır. Eşzamanlı generatörler, düşük sistem gerilim seviyelerinde yüksek kapasitif çıkış akımı ve şebeke ile harmonik rezonansa neden olmayan indüktif bir kaynak empedansı gibi karakteristik özelliklere sahip olmasına rağmen çalışma noktasında cevap hızının yavaş ve düşük kısa devre empedansı gibi eksiklikleri vardır. Reaktif güç kompanzasyonun güç elektroniği tabanlı cihazlar ile yapıldığında, güç sisteminin geçici ve dinamik kararlılığını iyileştirmede olumlu etkisi görülmüştür [26]. Değişik güç elektroniği anahtarlama dönüştürücü devreleri ile endüktans veya kondansatörler olmaksızın doğrudan denetlenebilir bir reaktif güç üretebilme fikri 1976 'da Gyugyi tarafından ortaya atılmıştır. Esnek iletim hatları olarak bilinen FACTS kavramı 1988 'de Hingorani tarafından önerilmiştir. Esneklik, cihazın şebekedeki herhangi bir çalışma noktasında meydana gelen değişikliğe ve kontrole tepkisinin hızlı olmasından gelmektedir [27]. Esnek Alternatif Akım İletim sistemleri (FACTS), alternatif iletim hatlarının bir veya daha fazla parametresini (gerilim, faz açısı ve empedans gibi) kontrol ederek dinamik kararlılığını arttırmaları ve daha iyi bir güç akış kontrolü sağlar. Bu yaklaşımın uygulanması kapı tetikleme darbeleri ile kesime giden yüksek akım ve gerilim oranlarına sahip uygun güç elektroniği elemanlarının kullanılması ile mümkündür. Günümüzde GTO ve IGBT gibi tam denetimli güç anahtarları

geleneksel tristörlerle karşılaştırılabilecek yüksek güç tutma seviyelerine ulaşmıştır [28].

#### **4.1. FACTS Denetleyicileri**

Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) enerji iletim sisteminde daha hızlı ve etkin denetim yapabilmek, şebekede meydana gelen güç kalitesi problemlerine karşı önleyici rol oynamak ve etkilerini azaltmak amaçlı tercih edilen güç elektroniği tabanlı denetleyici ve sistemler bütünüdür.

IEEE tarafından FACTS denetleyicilerinin tanımlamaları yapılmıştır; Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS), kontrol edilebilirliği sağlamak ve güç taşıma kapasitesini arttırmak için güç elektroniği tabanlı ve diğer statik kontrolörleri içerir.

FACTS denetleyici, Bir veya daha fazla sayıdaki alternatif akım iletim sistemi parametrelerinin denetimine imkan sağlayan güç elektroniği tabanlı sistem ve cihazlarına verilen bir kavramdır.

FACTS denetleyicileri, güç sisteminde kullanılan elektromekanik cihazlara karşı sistem performansını arttırmak için kullanılır. Dağıtım ve iletim sistemlerinde daha etkili kullanmak için geleneksel reaktif güç denetleyicilerine göre aktif ve reaktif güç akışı daha hızlı kontrol edilebilir ve daha tutarlıdır.

Esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS), güç elektroniği temelinde kurulu olup, iletim şebekesinin kullanım kapasitesini arttırmaktadır. Bu sistemin cihazları veya denetleyicileri çok hızlı çalışırken aynı zamanda bir iletim sisteminin güvenli çalışma sınırlarını da arttırmaktadır. FACTS uygulamaları ve cihazları son yıllarda oldukça hızlı bir gelişme göstermiştir.

FACTS cihazları iletim sistemlerindeki temel değişkenler; akım, gerilim ve faz açısının, seri ve paralel empedansın, bir veya daha fazla sayıda hattan akan aktif ve reaktif güç akışının denetlenmesine olanak sağlar.

Uygun FACTS cihazları koordinasyonu yardımıyla güç sisteminin güç transfer kapasitesinin artırılması, güç akışlarının denetlenmesi, sistemin geçici kararlılığının geliştirilmesi ve güç sistemi salınımlarının azaltılması mümkün olmaktadır.

FACTS denetleyicileri genel olarak 4 ana gruba ayrılır. Bunlar;

- Şönt bağlı FACTS denetleyicileri
- Seri bağlı FACTS denetleyicileri
- Birleştirilmiş seri-seri bağlı FACTS denetleyicileri
- Birleştirilmiş seri-şönt bağlı FACTS denetleyicileri

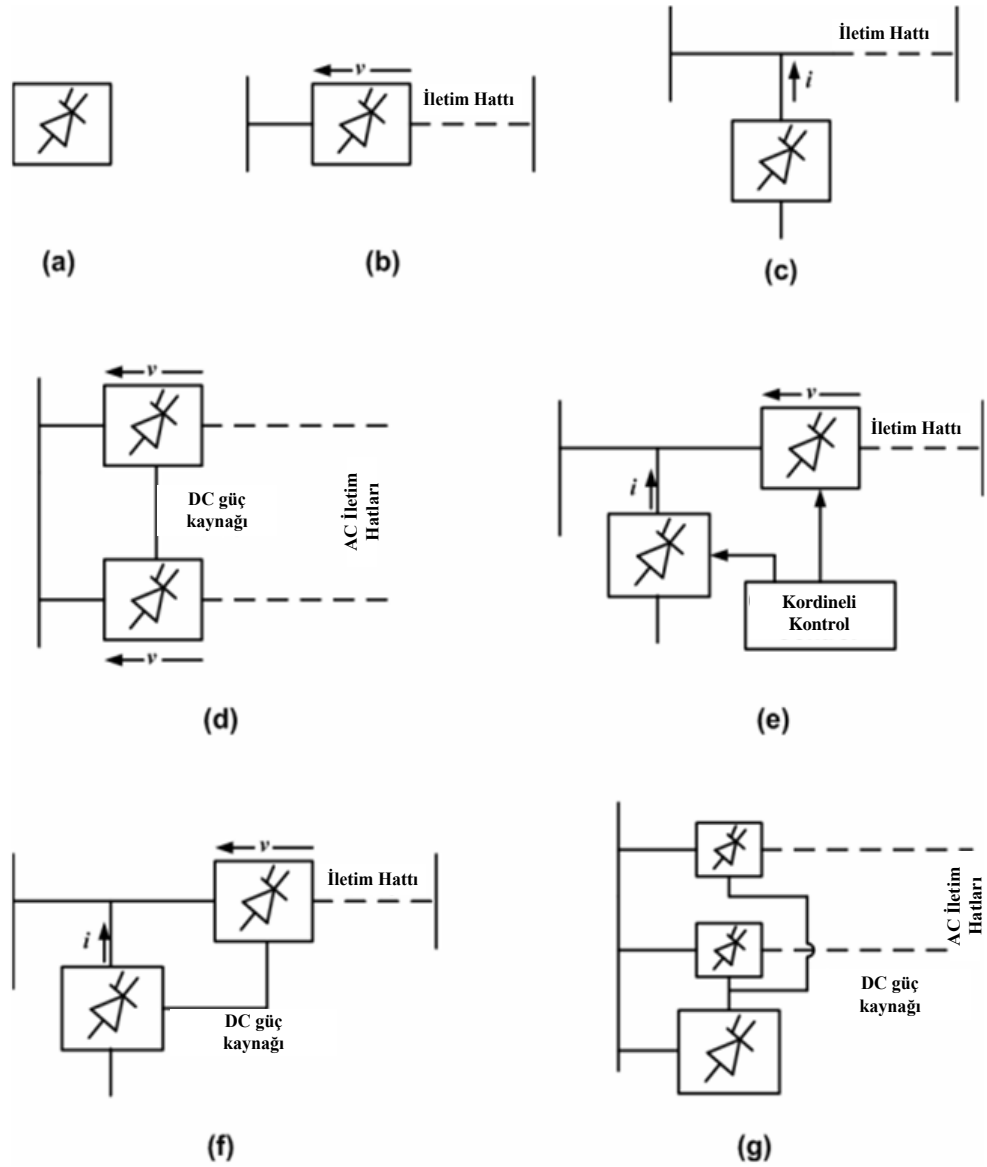
FACTS denetleyicilerinin genel sembolleri Şekil 4.1.'de belirtilmiştir.

- Şönt bağlı FACTS denetleyicileri: Paralel bağlı olduğu hatta değişken akım enjekte eder. Kapasitör, reaktör gibi değişken empedans ya da güç elektroniği tabanlı değişken kaynak olabilir. Değişken kaynak ile doğru gerilim enerji depolama aygıtı (DC kapasitör) ve dönüştürücüye sahiptir.
- Seri bağlı FACTS denetleyicileri: Seri bağlı olduğu hatta değişken gerilim enjekte eder. Güç elektroniği tabanlı değişken gerilim kaynağı ile dönüştürücüye sahiptir.
- Birleştirilmiş seri-seri bağlı FACTS denetleyicileri: Ayrı seri bağlı FACTS denetleyicilerinin kombinasyonu ile oluşur, çoklu iletim sistemlerinde bağımsız olarak çalışabilir ve dengesiz reaktif gücü kompanze edebilir. Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi her bir seri kontrolörün ortak DC kapasitör kullandığı görülmektedir. Bu konfigürasyon her bir hatta bağımsız seri reaktif güç kompanzasyonu sağlar ayrıca güç bağlantısı ile aktif gücü hatlar arasında transfer eder. Seri bağlı

denetleyiciler arasındaki güç bağlantısının varlığı, bu konfigürasyona ‘Birleşik Seri-Seri Bağlı Denetleyiciler’ adını verir.

- Birleştirilmiş seri-şönt bağlı FACTS denetleyicileri: Ayrı paralel ve seri bağlı denetleyicilerin kombinasyonu ile oluşur. Paralel bağlı denetleyiciden hatta akım enjekte edilirken, seri bağlı denetleyiciden değişken gerilim enjekte edilir. Şekilde görüldüğü gibi DC kapasitör ve ortak kontrol algoritmasına sahiptir.

MVA olarak verilen seri bağlı FACTS denetleyicileri paralel bağlı FATCS denetleyicilerinden daha güçlü olmasına rağmen, arıza ve dinamik aşırı yüklerle ya da by-pass kısa devre akımlarına karşı dirençli olarak tasarlanmalıdır. Bu sebeple paralel bağlı FACTS denetleyicileri, daha etkili gerilim kontrolü ve gerilim osilasyonlarını azaltmak için reaktif akımın enjekte edildiği bağlantı noktasında ya da aktif ve reaktif akım kombinasyon noktalarında gerilimi kontrol etmek için daha sıklıkla kullanılır.



Şekil 4.1. Temel FACTS denetleyici tipleri: (a) FACTS denetleyicilerinin genel sembolü, (b) Seri bağlı FACTS denetleyicileri, (c) Paralel bağlı FACTS denetleyicileri, (d) Birleştirilmiş seri-seri bağlı FACTS denetleyicileri, (e) Koordineli seri-paralel bağlı denetleyiciler, (f) Birleşik seri-paralel bağlı denetleyiciler, (g) Çoklu hatlar için birleşik denetleyiciler [29].

Paralel bağlı FACTS denetleyicileri, kolay ve yük kompanzasyonu için uygun maliyet çözümlü olduğundan uzun yıllardır dağıtım sistemlerinde geniş uygulamalarda kullanılmaktadır.

## 4.2. D-STATCOM

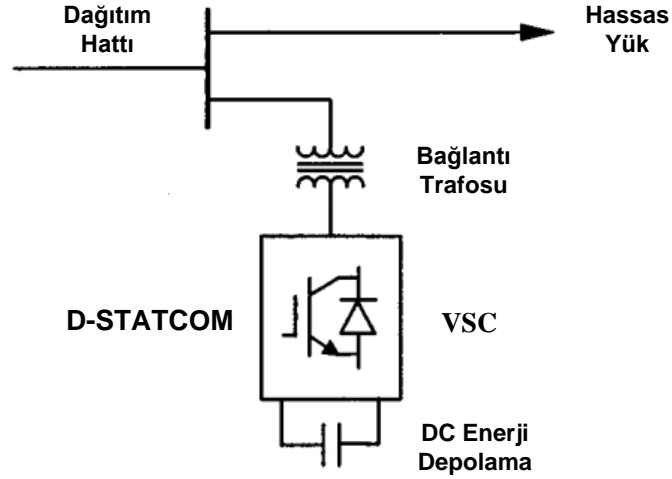
STATCOM, güç sistemi ile reaktif güç alışverişi yaparak, endüktans kondansatör gibi bir enerji depolama elemanı bulunduran, şebekeye paralel olarak bağlı, statik evirici kullanılarak yapılan FACTS aygıtlarıdır. STATCOM 'un esas fonksiyonu bağlantı noktasında iletim hattının gerilimini düzenlemektir. STATCOM bunu iletim hattından kontrollü bir reaktif akım çekerek başarır [30].

STATCOM, dağıtım sistemlerinde kullanıldığında D-STATCOM (Dağıtım Statcom) adını alır. AC sistem ile Gerilim Beslemeli Dönüştürücü' nün (VSC) gerilimleri arasındaki faz farkı aktif güç akış kontrolü ve bu gerilimler arasındaki genlik farkı ile de reaktif güç akış kontrolü yapılır. Kapasitör, statcom ile enerji depolama cihazı gibi davranır ve boyutu güç oranları, kontrol ve harmonik kabullere dayalı olarak seçilir. D-STATCOM kontrolörü sürekli olarak yük gerilimlerini ve akımlarını izler ve farklı bozulmalarda AC sisteme gerekli olan kompanzasyon miktarını belirler [31].

STATCOM, bağlantı trafosu üzerinden şebekeye paralel bağlı, alternatif enerji iletim hattı ile aynı frekanslı, genliği ve faz açısı kontrol edilebilir, dengeli üç fazlı sinüzoidal gerilim üreten bir gerilim kaynağıdır. STATCOM 'un temel yapısında gerilim beslemeli dönüştürücüler (Voltage source converter- VSC) bulunmaktadır. Gerilim beslemeli dönüştürücüler, giriş tarafındaki doğru gerilimi, şebeke ile aynı frekansta, faz açısı ve genliği kontrol edilebilir üç fazlı alternatif gerilime dönüştürürler. Dönüştürücünün girişi genellikle bir DC kondansatörle elde edilen bir DC gerilim kaynağı, çıkışı ise sinüzoidal dalga şekline oldukça yakın, çok adımlı bir AC gerilim dalga şeklindedir [21].

D-STATCOM en temel yapısı ile iki seviyeli VSC, DC enerji depolama aygıtı ve AC sisteme paralel bağlı bağlantı trafosundan oluşur. Şekil 4.2., D-STATCOM' un temel devre yapısını gösterir. Gerilim beslemeli dönüştürücü, enerji depolama cihazındaki DC gerilimi, üç faz AC çıkış gerilimine çevirir. Bu gerilimler bağlantı transformatörü reaktansı üzerinden AC sistem ile aynı frekanstadır. D-STATCOM'

un çıkış gerilimlerinde yapılan uygun faz ve genlik ayarlamaları, AC sistem ile D-STATCOM arasındaki aktif ve reaktif güç değişimlerinin etkin kontrolünü sağlar.



Şekil 4.2. D-STATCOM temel devre yapısı [32].

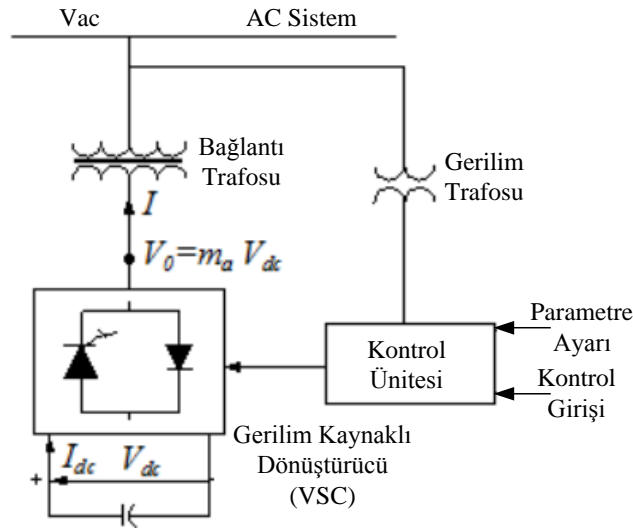
Doğru gerilim enerji depolama elemanı genellikle küçük bir kondansatör olduğu için STATCOM iletim hattı ile sadece reaktif güç alışverişi yapar. VSC 'nin doğru gerilim tarafında bulunan kondansatörün değeri STATCOM 'un fiziksel boyutu, performansı ve maliyeti üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle kondansatör değerinin uygun şekilde seçilmesi STATCOM 'un maliyetinin düşürülmesi ve performansı açısından önemlidir. Dönüştürücünün doğru geriliminde meydana gelecek dalgalanma miktarı, nominal gerilim değerinin %10 'u olacak şekilde bir kondansatör değeri seçilir.

AC sisteme paralel bağlı Gerilim beslemeli dönüştürücü (VSC), üç temel amaç için kullanılabilir çoklu topolojiler sağlar:

- Gerilim düzenleme ve reaktif gücün kompanzasyonu
- Güç faktörü düzeltme
- Akım harmoniklerinin yok edilmesi



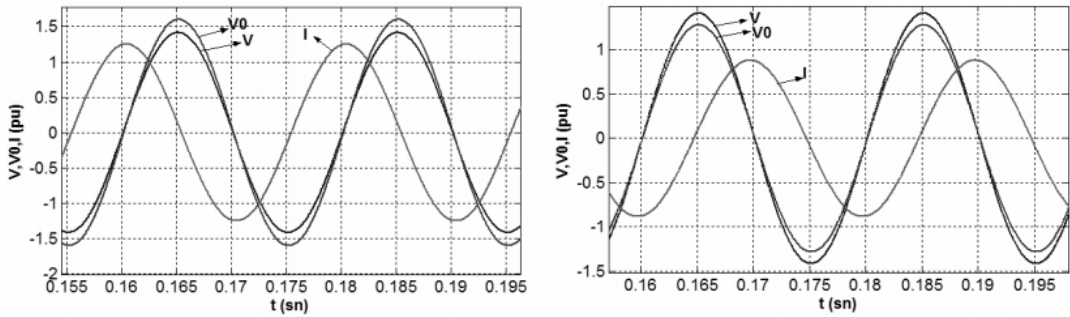
STATCOM iletim hattına paralel bağlanan bir Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) cihazıdır. İletim hattına paralel bağlı STATCOM, iletim hattı ile reaktif güç alışverişi yaparak, temel görevi olan şebekedeki gerilimi düzenlemektedir. STATCOM' un yapısında, bir bağlantı transformatörü, gerilim kaynaklı dönüştürücü (VSC) ve DC enerji depolama elemanı bulunmaktadır. Enerji depolama elemanı olarak küçük bir kondansatör bulunuyor ise STATCOM şebeke ile sadece reaktif güç alış verişini yapabilir. Eğer enerji depolama elemanı olarak bir akümülatör ya da bir DC gerilim kaynağı kullanılırsa, iletim hattı ile aktif ve reaktif güç alışverişi yapabilir. STATCOM' un çıkışı, genliği ve faz açısı kontrol edilebilir AC gerilimdir. Dönüştürücü AC çıkış geriliminin genliği  $V_0 = m_a \cdot V_{dc}$  şeklinde kontrol edilir. Burada  $m_a$  modülasyon indeksidir.



Şekil 4.3. STATCOM şematik devre modeli

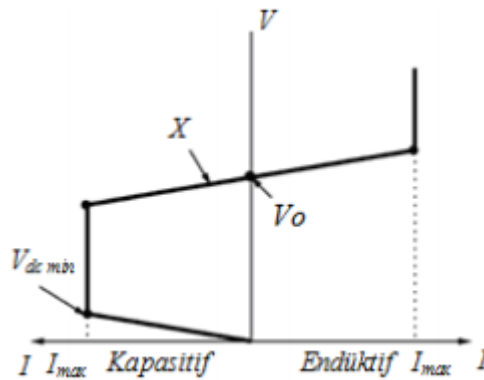
STATCOM' un çıkışında şebeke ile aynı frekansta, genliği ve faz açısı kontrol edilebilir dengeli üç faz gerilimler elde edilir. Alternatif akım iletim sistemi ile cihaz arasında sürekli durum güç alışverişi genel olarak reaktiftir. STATCOM ve AC sistem gerilimleri arasındaki genlik farkı ile reaktif güç alış verişini kontrol edilmektedir. STATCOM' un çıkış gerilimi, AC sistem geriliminin büyüklüğünden fazla ise ( $V_0 > V_{ac}$ ), STATCOM iletim hattı için reaktif güç üretir, dönüştürücü çıkış akımı ( $I$ ) bağlantı trafosu reaktansı üzerinden STATCOM' dan AC sisteme akar.

Şekil 4.4., (a)'da gösterildiği gibi I akımı iletim hattı geriliminden  $90^\circ$  ileri fazdadır.  $V_o > V_{ac}$  durumunda cihaz kapasitif modda çalışmış olur. Bunun tersi durumunda, STATCOM çıkış geriliminin genliği AC sistem geriliminden küçük olursa ( $V_o < V_{ac}$ ), I akımı bağlantı trafosu reaktansı aracılığı ile AC sistemden STATCOM'a akar. STATCOM iletim hattından reaktif güç tüketir. Şekil 4.4., (b)'de olduğu gibi dönüştürücü çıkış akımı (I) şebeke geriliminden  $90^\circ$  geri fazdadır.  $V_o < V_{ac}$  durumunda cihaz endüktif modda çalışmış olur. Eğer STATCOM çıkış gerilimi ile iletim hattı gerilimi genlikleri eşit ise ( $V_o = V_{ac}$ ) AC sistem ile STATCOM arasında herhangi bir reaktif güç alışverişi olmaz [33].



Şekil 4.4. STATCOM reaktif güç alışverişi durumları (a) Reaktif güç üretimi-kapasitif mod (b) Reaktif güç tüketimi-indüktif mod [35].

Dönüştürücü için gerekli olan DC gerilim, kondansatör tarafından sağlanmaktadır. Kapasitörün şarj veya deşarjı, AC sistem ile dönüştürücü çıkış gerilimleri arasındaki faz farkına bağlı olarak gerçekleşir. Transformator ve dönüştürücü kayıpları, sürekli durumda STATCOM'un çıkış geriliminin AC sistem geriliminden geri fazda tutularak sistemden çekilen aktif güç aracılığı ile karşılanmaktadır [33].



Şekil 4.5. STATCOM'un sürekli durumda V-I karakteristiği

STATCOM' un sürekli haldeki V-I grafiği verilmiştir. Bu grafikten STATCOM' un belirli aralıktaki güç sistemine hem endüktif ve hem de kapasitif akım sağlayabildiği görölmektedir.

STATCOM 'un V-I karakteristiği bağlantı transformatörünün kaçak reaktansına ve VSC 'nin çıkış gerilimine bağlıdır. Genelde kaçak reaktans değerı % 10 ile % 20 arasında bir değere sahiptir (STATCOM 'un nominal akımında nominal sistem geriliminin yaklaşık %10 ile %20 'lik gerilim düşümü ve gerilim yükselmesi için). STATCOM kendi aşırı gerilim tutucusunun sağladığı koruma seviyesine kadar olan geçici ve dinamik aşırı gerilimlere dayanmalıdır. Anlık uygulanılan gerilimin genliği, referans doğru gerilimin genliğini aştığı geçici durum boyunca STATCOM 'da kullanılan diyotlar yardımı ile akım akacak ve bu akım kondansatörü daha yüksek bir gerilim değerine dolmasına neden olacaktır. STATCOM kapasitif ve indüktif kompanzasyonun her ikisini de güç sisteminin geriliminden bağımsız sağlayabilir ve nominal maksimum kapasitif-indüktif oranın üzerinde çıkış akımını kontrol edebilir. STATCOM güç sisteminin geriliminin herhangi bir değerinde bile tam kapasitif reaktif güç sağlayabilir. STATCOM indüktif ve kapasitif çalışma bölgelerinin her ikisinde de arttırılmış geçici bir orana sahiptir. Kapasitif bölgede maksimum ulaşılabilir geçici aşırı akım VSC 'de kullanılan anahtarlama elemanlarının maksimum akım kesme yetenekleri ile tanımlanır.

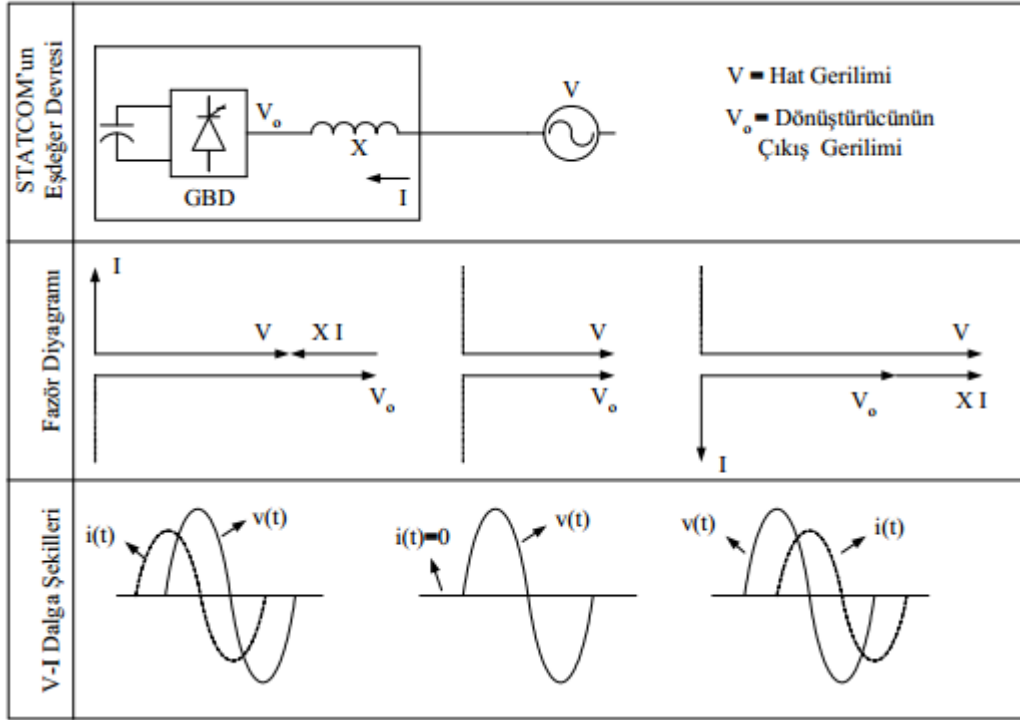
#### **4.2.1. D-STATCOM' un çalışma prensibi**

D-STATCOM' un temel yapılarından olan gerilim beslemeli dönüştürücünün (VSC) çalışması, dönüştürücüdeki anahtarların detaylı çalışması düşünölmeksizin giriş gücünün çıkış gücüne eşit olması gerekliliği ile açıklanabilir. VSC' de kullanılan anahtarlama elemanları doğru gerilimli giriş devresini direkt olarak alternatif gerilimli çıkış devresine bağlar. Bu yüzden, kayıplar ihmal edilirse alternatif gerilim tarafındaki net anlık güç daima doğru gerilim tarafındaki net anlık güce eşit olmalıdır. Dönüştürücü sadece reaktif güç çıkışı sağladığı zaman (dönüştürücü çıkış gerilimi ile bara gerilimi aynı fazda) doğru akım kaynağı (dolü kondansatör) tarafından sağlanan aktif güçte sıfır olmalıdır. Ayrıca sıfır frekansta reaktif güç de

(kondansatörde) sıfırdır ve kondansatörün reaktif güç üretiminde hiçbir etkisi yoktur. Yani dönüştürücü, sadece reaktif çıkış akımlarını fazlar arasında serbest dolaşacak bir biçimde üç fazlı alternatif gerilim çıkışlarını enterkonnekte bağlar. Şebekeden bakıldığında dönüştürücü net anlık güç değişiminin sıfır olduğu fazlar arasında dolaşan bir akım akışı meydana getirir [26].

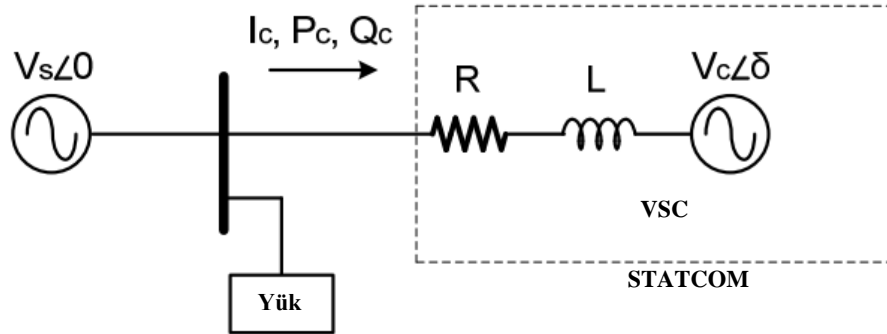
Dönüştürücü, dolu bir kondansatörden sağlanan doğru gerilimden şebeke ile aynı frekansta genliği ve faz açısı kontrol edilebilir üç fazlı alternatif bir çıkış gerilimi üretir. Üretilen bu gerilimler, şebeke gerilimi ile aynı fazda ve şebekeye bir bağlantı transformatörü yardımı ile bağlanır. Üretilen çıkış geriliminin genliği değiştirilerek dönüştürücü ile güç sistemi arasındaki reaktif güç değişimi kontrol edilir. Dönüştürücünün çıkış gerilimi ile şebeke geriliminin genliği arasındaki fark, bağlantı transformatörü yardımı ile şebeke ile yapılan reaktif güç alışverişini belirler. Dönüştürücü çıkış geriliminin genliği bara geriliminin genliğinden büyük ise akım, bağlantı tranfosu kaçak reaktansı üzerinden dönüştürücüden baraya doğru akar ve dönüştürücü sistem için kapasitif reaktif güç üretir. Dönüştürücü çıkış geriliminin genliği, bara geriliminin genliğinden küçük ise akım, baradan dönüştürücüye doğru akar ve dönüştürücü indüktif reaktif güç tüketir. Dönüştürücü çıkış geriliminin genliği ile bara geriliminin genliği birbirine eşit ise reaktif güç değişimi sıfırdır. Bu üç durumda çalışma grafikleri Şekil 4.6.'da gösterilmiştir.

Güç sisteminin gerilimi ile gerilim beslemeli dönüştürücünün (VSC) çıkış gerilimi arasındaki faz farkı ayarlanarak, STATCOM ile güç sistemi arasındaki aktif güç alışverişi kontrol edilebilir. Dönüştürücünün çıkış gerilimi, şebeke gerilimden ileri fazda olduğunda STATCOM' un yapısındaki doğru gerilim enerji depolama elemanından şebekeye aktif güç sağlanır. Bunun tersi durumda, VSC' nin çıkış gerilimi bara geriliminden geri fazda iken, dönüştürücü, güç sisteminden aktif güç çeker.



Şekil 4.6. VSC 'nin temel çalışma prensibi [18].

D-STATCOM' un temel devre modeli Şekil 4.7., üzerinden incelenmiştir.



Şekil 4.7. Basit STATCOM modeli

Buna göre elektrik parametreleri:

$V_s$ : Faz nötr kaynak gerilimi (rms)

$V_c$ : Faz nötr dönüştürücü gerilimi (rms)

$I_c$ : STATCOM akımı (rms)

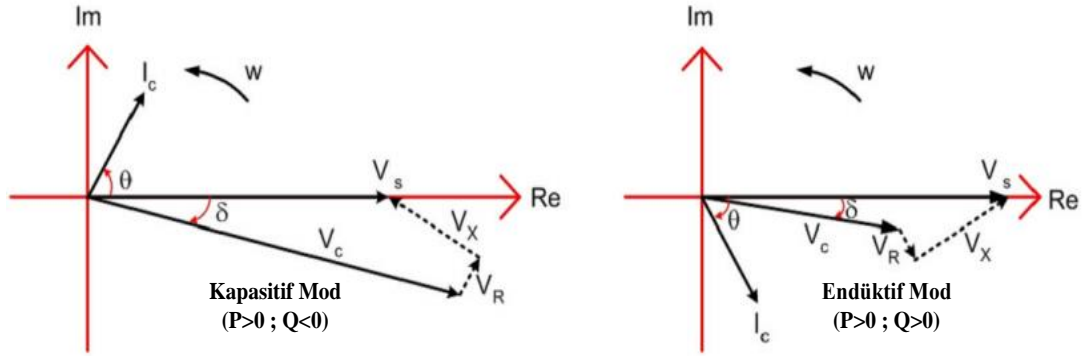
$Q_c$ : STATCOM reaktif gücü

$P_c$ : STATCOM aktif gücü

$\delta$ : Kaynak ve inverter arasındaki faz farkı

$R$ : İnverter ve bağlantı elemanlarının toplam kayıplarına karşılık gelen direnç değeri

$L$ : Bağlantı reaktörü ve bağlantı trafosunun toplam endüktans değerine karşılık gelen endüktans



Şekil 4.8. Kayıplı STATCOM fazör diyagramları [36].

Şekildeki fazör diyagramları kullanılarak kaynak gerilimi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\vec{V}_S = \vec{V}_C + \vec{V}_R + \vec{V}_X \quad (4.1)$$

$$\vec{V}_X = jXI_c \quad (4.2)$$

$$\vec{V}_R = RI_c \quad (4.3)$$

$X=2\pi fL$  olduğundan,

$$V_S - V_C \cos \delta = I_c(R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (4.3)$$

$$V_C \sin \delta = I_c(X \cos \theta - R \sin \theta) \quad (4.4)$$

STATCOM' un aktif ve reaktif gücü;

$$P_c = V_S I_c \cos \theta \quad (4.5)$$

$$Q_c = V_S I_c \sin \theta \quad (4.6)$$

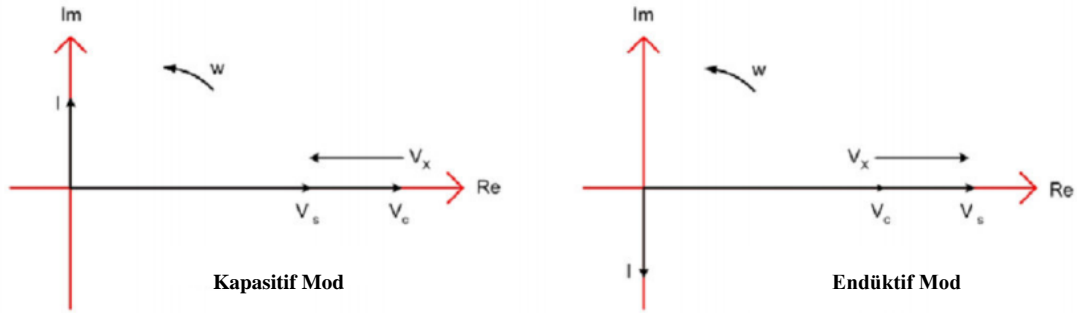
Reaktif güç X ve R terimleri cinsinden yazıldığında;

$$Q_c = V_s \frac{V_s - V_c \cos \delta}{R \cos \theta + X \sin \theta} \sin \theta \quad (4.7)$$

İdeal STATCOM' un güç kaybı yoktur. Bu R ve Pc 'nin sıfıra setlenmesi gerektiği anlamına gelir. Pc' nin sıfıra eşit olması  $\sin \delta$  ve  $\delta$  açısının sıfır olmasına karşılık gelir. Bu durumda kayıpsız STATCOM fazör diyagramı verilmiştir ve reaktif güç;

$$Q_c \cong V_s \frac{V_s - V_c}{X} \quad (4.8)$$

İdeal durum (R=0) için fazör diyagramları;



Şekil 4.9. Kayıpsız STATCOM fazör diyagramları [36].

STATCOM' un reaktif gücü, dönüştürücünün gerilimi  $V_c$  değiştirilerek ayarlanabilir. Üç metot ile  $V_c$  değeri değiştirilebilir;

- Modülasyon indeksini değiştirme (m),
- DC gerilim elemanını değiştirme,
- Her ikisini de değiştirme

İnverter geriliminin genliği ( $V_c$ ), bara gerilimi genliğine ( $V_s$ ) eşit ise reaktif güç sıfırdır, DSTATCOM reaktif güç üretmez ya da absorbe etmez. Dönüştürücü geriliminin genliği, bara geriliminin genliğinden fazla ise ( $V_c > V_s$ ), D-STATCOM

bağlı olduğu noktaya endüktif reaktans olarak davranır. Akım, bağlantı transformatorünün kaçak reaktansı aracılığı ile D-STATCOM' dan şebekeye doğru akar, cihaz kapasitif reaktif güç üretir. Dönüştürücü geriliminin genliği, bara geriliminin genliğinden az ise ( $V_c < V_s$ ), D-STATCOM kapasitif reaktans olarak davranır. Akım, şebekeden dönüştürücüye doğru akar, dönüştürücü indüktif reaktif güç tüketir.

Güç sisteminde statik kompanzator uygulamanın başlıca amacı iletim şebekesinde güç iletim kapasitesini arttırmaktır. Şebekeye paralel bağlı D-STATCOM, kontrollü reaktif güç çekerek, şebekenin gerilim düzenlemesini yapmaktadır. Sistem bozulmaları altında, istenilen güç akışını devam ettirmek için, D-STATCOM kontrol prensibinin amacı, hassas yükün bağlı olduğu noktada sabit gerilim genliğini sağlamaktır. Kontrol sistemi yük noktasında yalnızca etkin (rms) gerilimi ölçer, reaktif güç ölçümü gerektirmez.

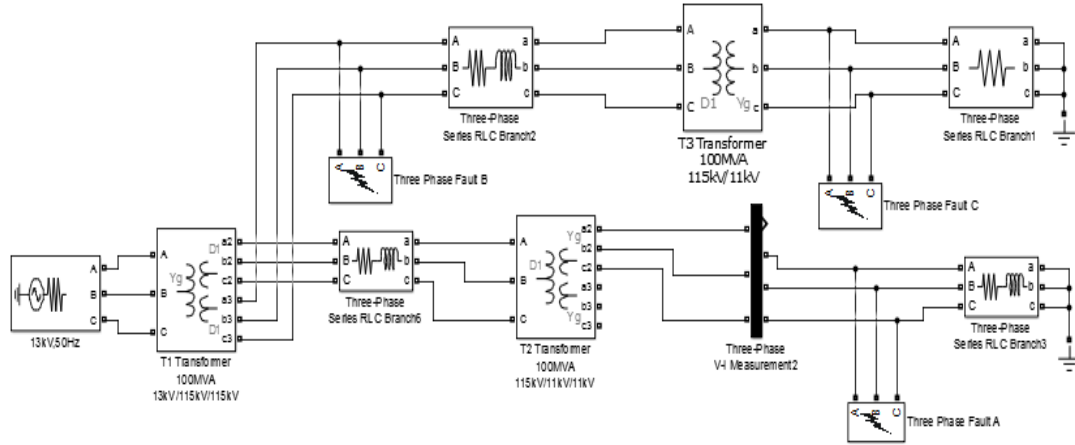
D-STATCOM 'un çalışması sinüzoidal bir gerilim üretme esaslı olduğu için, D-STATCOM' un geçici bozulmalara cevabı hızlı ve iyidir. Bir D-STATCOM 'un kalıcı durum çalışma şartı, sistem gerilimine, sistemin empedansına, D-STATCOM 'un kaynak gerilimine ve bağlantı transformatorünün kaçak reaktansına bağlıdır.



## BÖLÜM 5. TASARIM VE SİMÜLASYON

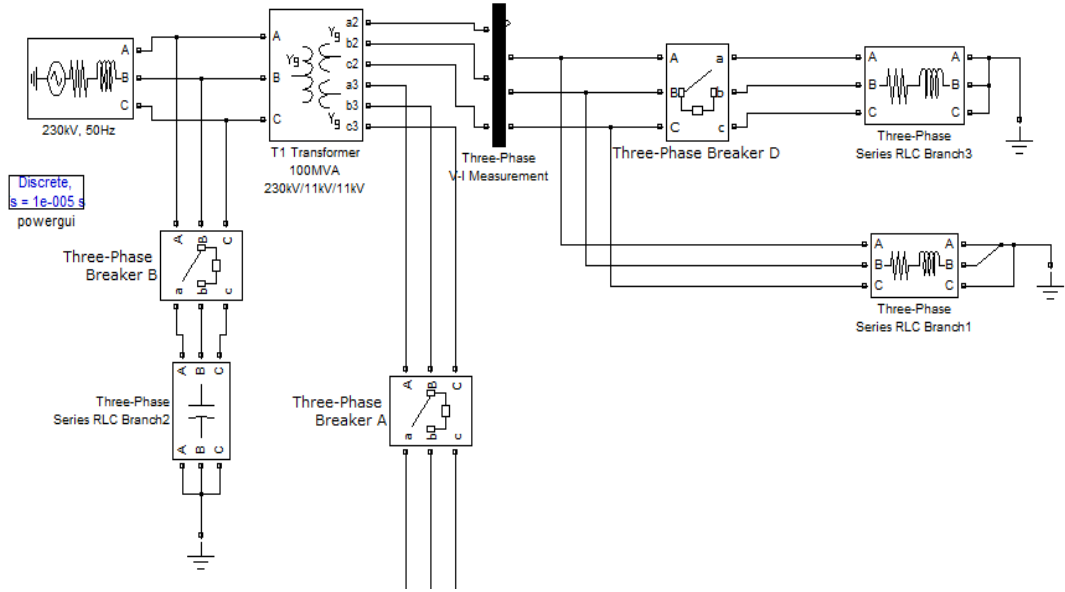
Bu tez çalışmasında orta gerilim şebekelerinde gerilim sarkmalarına D-STATCOM'un etkisini incelemek için iki ayrı sistem incelenmiştir. Sistemlere farklı senaryolar uygulanarak D-Statcom'un gerilim sarkmasına etkileri gözlenmiş, D-Statcom'un şebekeye bağlı olduğu ve olmadığı durumlar ile kontrolörün gerilim düzenlemedeki etkisi gözlenmiştir. D-Statcom modeli gerilim beslemeli dönüştürücü (VSC) modeline dayanır. İki seviyeli VSC'nin kontrolünde sinüsoidal darbe genişlik modülasyon (PWM) tekniği kullanılmıştır. D-Statcom gerilim sarkmasını azaltmak için sisteme akım enjekte eder. Bu tez çalışmasında IGBT konfigürasyonlu 6 darbeli D-STATCOM, MATLAB Simulink programı ile dizayn edilmiştir.

Sistem 1 devre modeli:



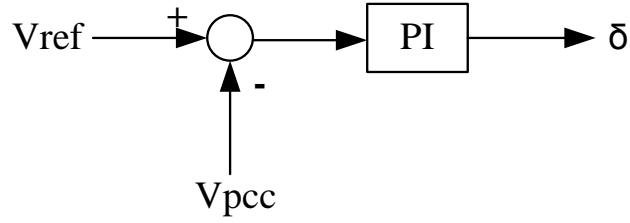
Şekil 5.1. Sistem 1 simulink devre modeli

Sistem 2 devre modeli:



Şekil 5.2. Sistem 2 simulink devre modeli

İletim hattındaki gerilim sarkmasını azaltmak kullanılan üç fazlı iki seviyeli D-STATCOM, şebekeye bir transformator yardımı ile paralel bağlanmıştır. Kontrol sisteminin amacı hassas yükün bağlı bulunduğu noktada sistem bozulmaları altında sabit gerilim genliğini sağlamaktır. Kontrol sistemi sadece yük noktasındaki RMS gerilim değerini ölçer, reaktif güç ölçümü gerektirmez. Gerilim beslemeli dönüştürücünün (VSC) anahtarlama stratejisi kolaylık ve doğru cevap olanağı sağlayan Sinüsoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SPWM) tekniğidir. Yüksek anahtarlama frekansı belirgin bir anahtarlama kaybına neden olmadan konvertörün verimini arttırmak için kullanılabilir. Kontrolör girişi, referans gerilim ile yük noktasında ölçülen rms gerilim değerinden saptanan hata sinyalidir. PI kontrolörü, hatayı sıfıra çekmek, etkin yük gerilimini referans değerinde tutmak için hata sinyalini işleyerek gerekli  $\delta$  açısını üretir. Hata sinyalinin işlenmesi ile PI kontrolör çıkışındaki  $\delta$  açısı PWM sinyal generatörüne uygulanır.



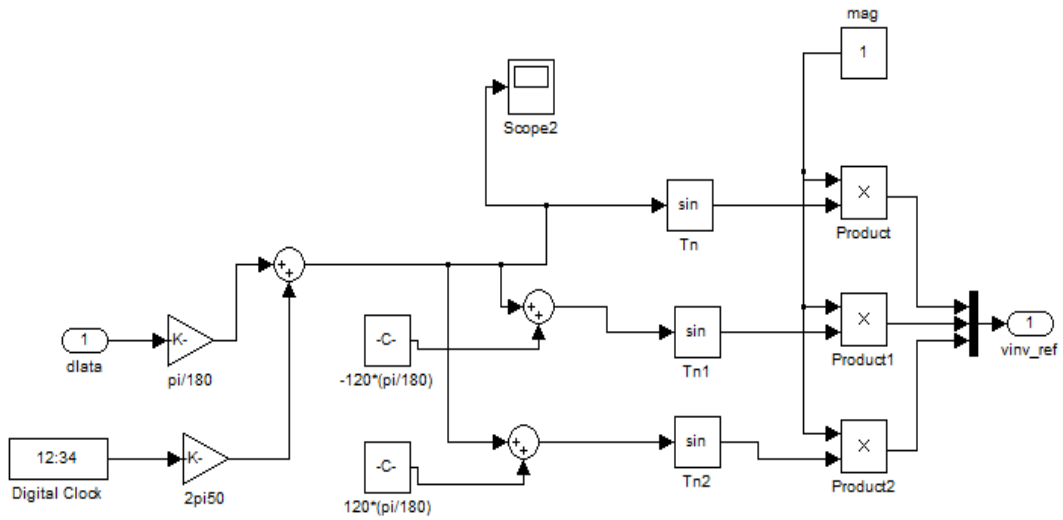
Şekil 5.3. PI kontrolörü

Sinüsoidal  $V_{\text{control}}$  sinyali  $\delta$  açısı ile faz modülasyonludur. Modülasyonlu  $V_{\text{control}}$  sinyali, gerilim beslemeli dönüştürücünün (VSC) anahtarlama sinyalini üretmek için taşıyıcı sinyal (testere dişli sinyal) ile karşılaştırılır. Darbe genişlik modülasyonlu dönüştürücülerin esas avantajı, dönüştürücü kazancının ve buna bağlı olarak da dönüştürücün çıkış geriliminin kontrol edilebilmesidir. PWM jeneratörüne uygulanan modülasyon açısı  $\delta$ , A fazındadır. B ve C fazları sırasıyla  $240^\circ$  ve  $120^\circ$  farklıdır.

$$V_A = \sin(\omega + \delta) \quad (5.1)$$

$$V_B = \sin(\omega + \delta - 120^\circ) \quad (5.2)$$

$$V_C = \sin(\omega + \delta + 120^\circ) \quad (5.3)$$



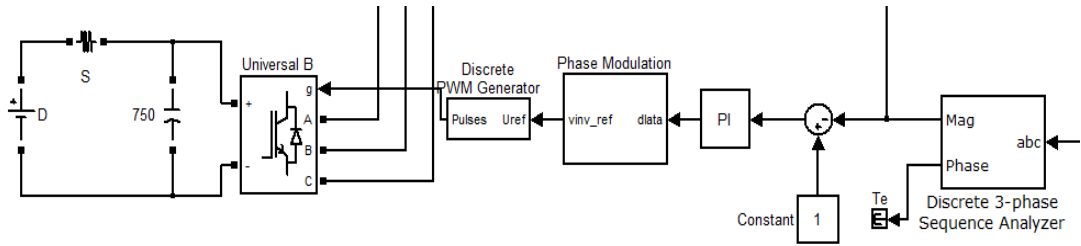
Şekil 5.4. Sinüsoidal Vcontrol sinyali

Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonunun (SPWM) ana parametreleri  $V_{\text{control}}$  sinyalinin genlik modülasyon indeksi  $m_a$  ve taşıyıcı sinyalin frekans modülasyon

indeksi  $m_f$  dir. Kontrolör çıkışında en yüksek gerilimi saptamak için genlik modülasyon indeksi  $m_a$  1 pu de sabit tutulmak istenir,

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{Tri}} = 1 \text{ pu} \quad (5.4)$$

$V_{control}$  kontrol sinyalinin en yüksek genliği,  $V_{Tri}$ , taşıyıcı (testere) sinyalin en yüksek genlik değeridir.



Şekil 5.5. D-STATCOM MATLAB simulink modeli

D-STATCOM modeli, gerilim beslemeli dönüştürücü (VSC) prensibindedir. Sinüsoidal Darbe Genişlik Modülasyon (SPWM) tekniği, iki seviyeli gerilim beslemeli dönüştürücünün (VSC) anahtarlama kontrolünde kullanılmıştır. D-STATCOM gerilim sarkmasını azaltmak için sisteme akım enjekte eder. Bu tez çalışmasında IGBT konfigürasyonlu 6 darbeleri D-STATCOM, MATLAB Simulink programı ile dizayn edilmiştir.

### 5.1. Simülasyon Sonuçları – Sistem 1

Şekil 5.6., sistem 1 test sistemini göstermektedir. Birinci test sisteminde 13kV, 50Hz iletim hattı 3 sargılı T1 trafosunun primer tarafını beslemektedir. Yükler trafonun 115kV ve 11kV değerindeki şebekelere bağlanmıştır. Altı darbeleri D-STATCOM ise yük noktasındaki ani gerilim desteğini sağlamak için, 100MVA gücünde 115kV/11kV/11kV ikincil ve üçüncül sargıları olmak üzere T2 trafosunun üçüncül sargısına şebekeye paralel olarak bağlanmıştır. DC taraftaki 750µF kondansatör D-STATCOM' a enerji depolama kabiliyeti sunar. Sistemde belirtilen A,B,C noktalarına tek faz ve üç faz hataları uygulanmış D-STATCOM' un devrede olduğu

ve olmadığı durumlarda şebekedeki gerilim sarkmasının yüzdesi incelenerek, D-STATCOM' un etkisi gözlenmiştir.

Gerilim sarkmasının yüzdesi aşağıda belirtilen eşitlik, denklem5.4 kullanılarak hesaplanır;

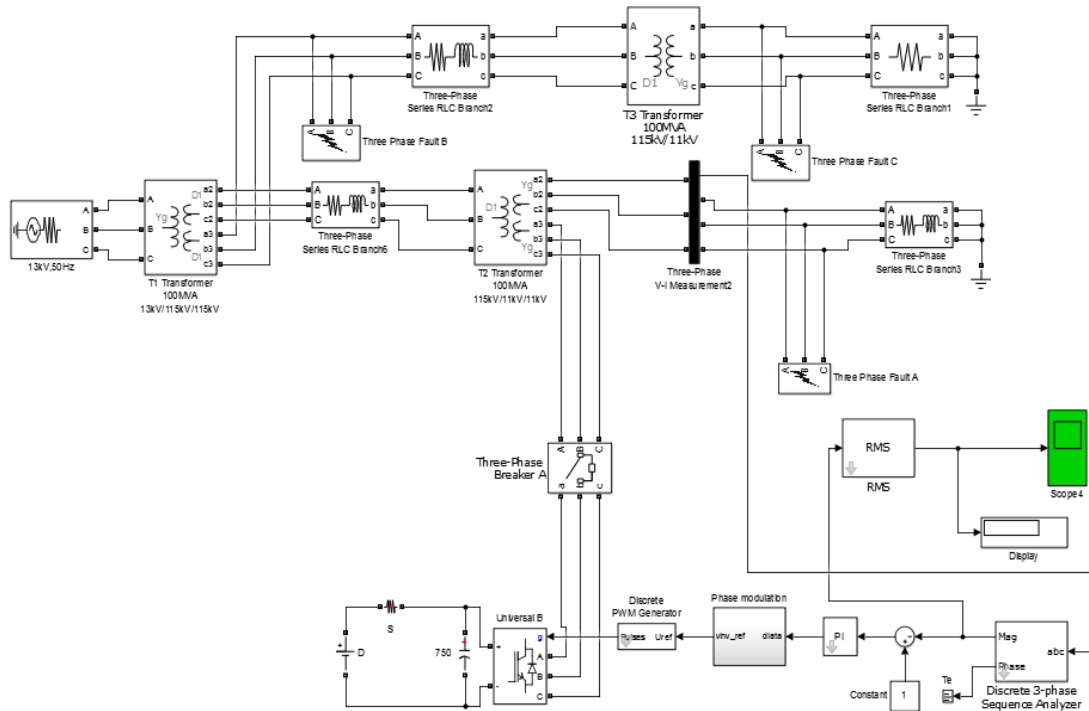
$$Sag (\%) = \frac{V_{pre-sag} (p.u) - V_{sag} (p.u)}{V_{pre-sag} (p.u)} \times 100 \quad (5.5)$$

Burada  $V_{pre-sag}(p.u)$ , sarkma öncesi gerilimin genliği ve  $V_{sag}(p.u)$  gerilim sarkmasının genliğini göstermektedir.

Sistem-1' de belirtilen A,B,C noktalarına hatalar uygulanarak farklı gerilim sarkması senaryolarını uygulanmıştır. Kontrolörün gerilim düzenlemedeki etkisini gözlemlemek için D-STATCOM' un şebekeye bağlı olduğu ve olmadığı durumlar gözlenmiştir.

Tablo 5.1. Sistem-1 farklı gerilim sarkması senaryoları

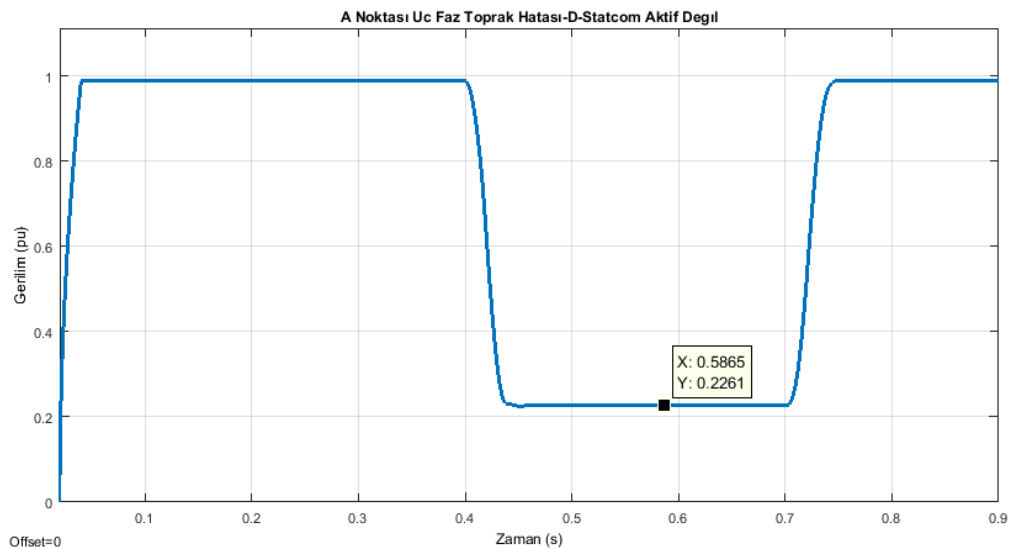
Durum-1	A noktası-Üç faz-toprak hatası
Durum-2	A noktası-Tek faz-toprak hatası
Durum-3	B noktası-Üç faz-toprak hatası
Durum-4	C noktası-Üç faz-toprak hatası
Durum-5	C noktası-Tek faz-toprak hatası



Şekil 5.6. MATLAB simulink' te oluşturulan sistem 1 ve D-STATCOM devre modeli

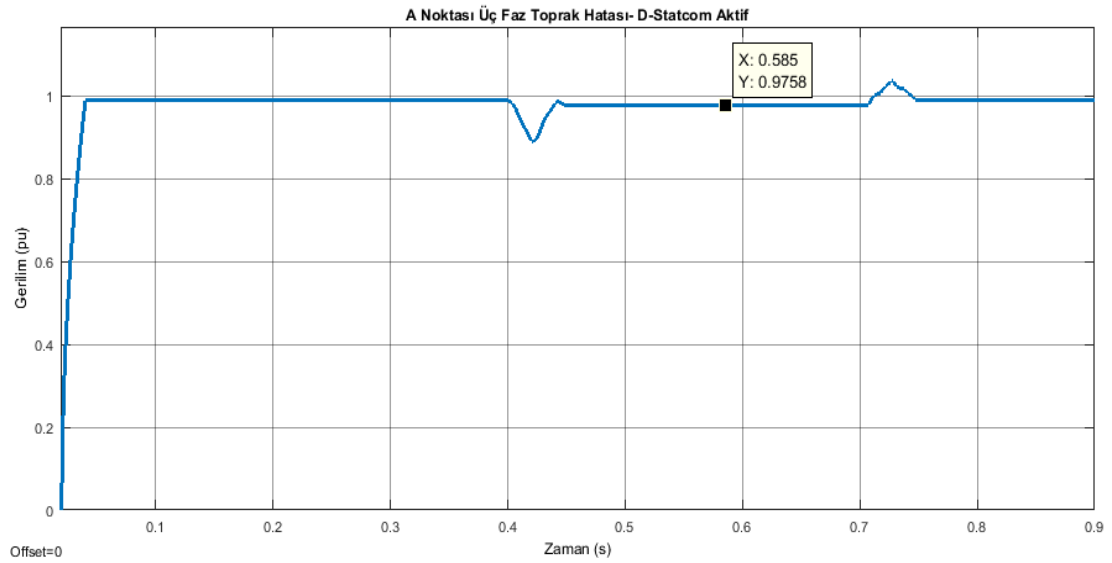
### 5.1.1. Durum-1 üç faz toprak hatası (A Noktası)

0.4-0.7s simülasyon periyodu boyunca D-STATCOM devrede değil iken şebekenin A noktasına hata direnci  $0.1\Omega$  olan üç faz toprak hatası uygulanmış ve sonucunda gerilim sarkması gözlenmiştir. Üç faz toprak hatası sonucu yük noktasındaki gerilim sarkması, denklem (5.4) kullanılarak, %77 oranındadır.  $V_{sag}=0.22$  pu



Şekil 5.7. A noktası üç faz toprak hatası sonucu  $V_{rms}$  gerilimi, D-Statcom aktif değil

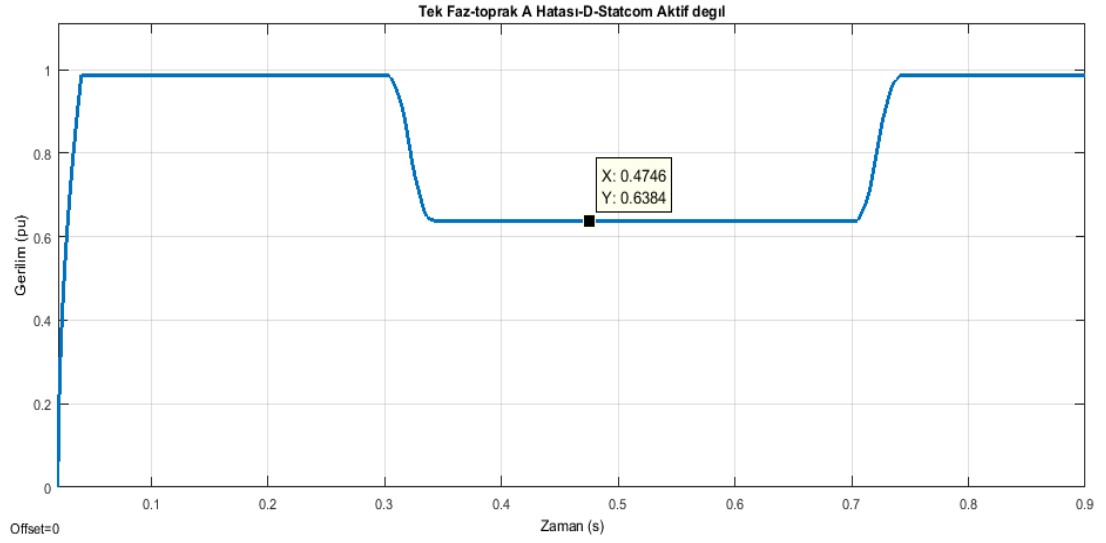
A noktasına aynı üç faz toprak hatası şebekede D-STATCOM aktif iken uygulanmıştır. 3 faz toprak hatası boyunca gerilim sarkmasının yüzdesi kıyaslandığında D-STATCOM' un sağladığı etkin gerilim düzenlemesi açık bir şekilde görülür. D-STATCOM devrede iken gerilim sarkması %1 oranındadır. Gerilim sarkması %76 oranında azaltılmıştır. Hata boyunca Vrms etkin gerilim 0.97pu değerindedir. ( $V_{dc}$ : 45kV)



Şekil 5.8. A noktası üç faz toprak hatası sonucu Vrms gerilimi, D-Statcom aktif

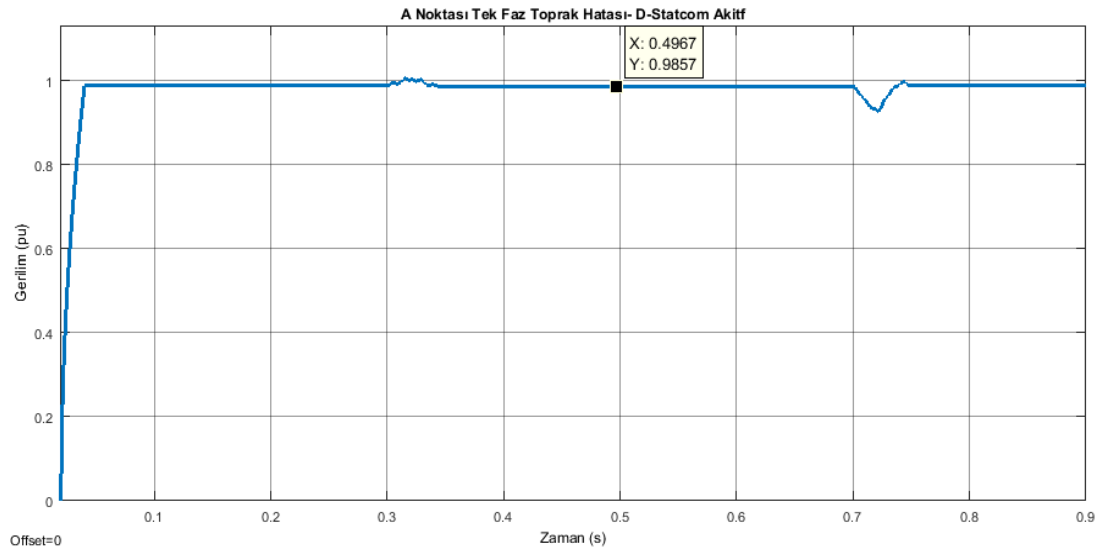
### 5.1.2. Durum-2 tek faz toprak hatası (A Noktası)

D-STATCOM şebekede aktif değil iken, 0.3 - 0.7s simülasyon periyodu boyunca, aynı yük noktasına hata direnci  $0.1\Omega$  olan tek faz-toprak hatası uygulanmış, gerilim sarkması gözlenmiştir. Hata boyunca Vrms etkin gerilimi 0.63pu değerindedir. t:[0.3 0.7] s aralığında meydana gelen tek faz toprak hatası sonucu yük noktasındaki gerilim sarkması %35 değerindedir.



Şekil 5.9. A noktası tek faz-toprak hatası sonucu Vrms gerilimi, D-Statcom aktif değil

Sistem-1’de belirtilen A noktasına aynı tek faz-toprak hatası şebekede D-Statcom aktif iken t:[0.3 0.7] s aralığında uygulandığında, yük noktasındaki gerilim sarkması büyük oranda giderilmiştir. Hata boyunca gerilim 0.98pu olarak sürülmüştür. ( $V_{dc}$ :23kV)

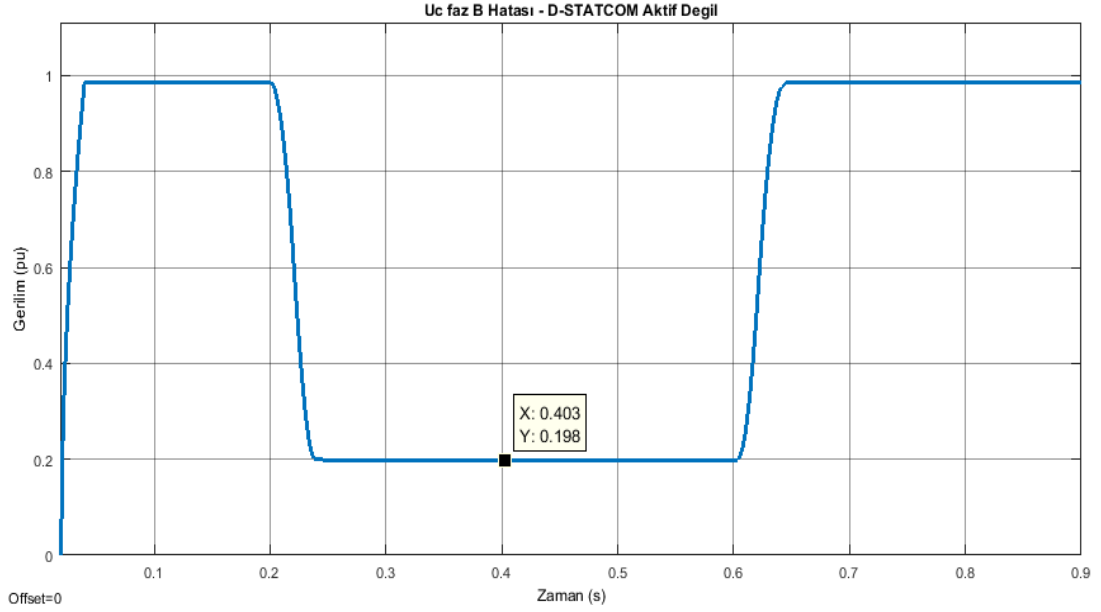


Şekil 5.10. A noktası tek faz-toprak hatası sonucu Vrms gerilimi, D-Statcom aktif



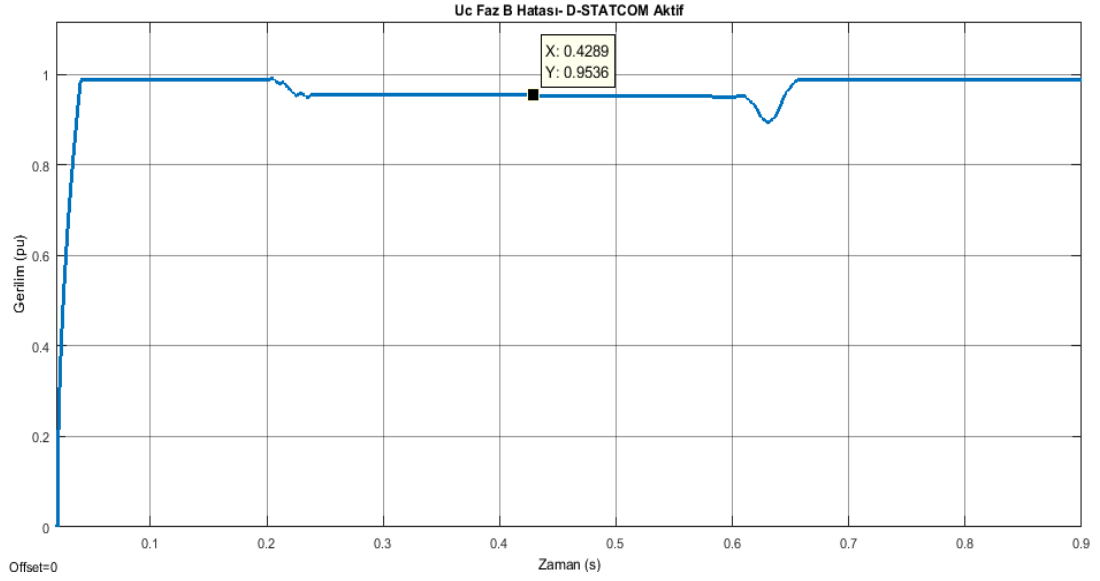
### 5.1.3. Durum-3 üç faz toprak hatası (B Noktası)

Sistem 1’de belirtilen üç faz toprak hatası 200-600ms aralığında ve 5ohm değerinde şebekeye D-Statcom bağlı değil iken uygulanmış, sarkma sonucu, yük1 noktasındaki etkin geriliminin değeri 0.19pu değerindedir, gerilim sarkması %80 oranındadır.



Şekil 5.11. B noktası üç faz toprak hatası sonucu yük1 noktası, Vrms gerilimi, D-Statcom aktif değil

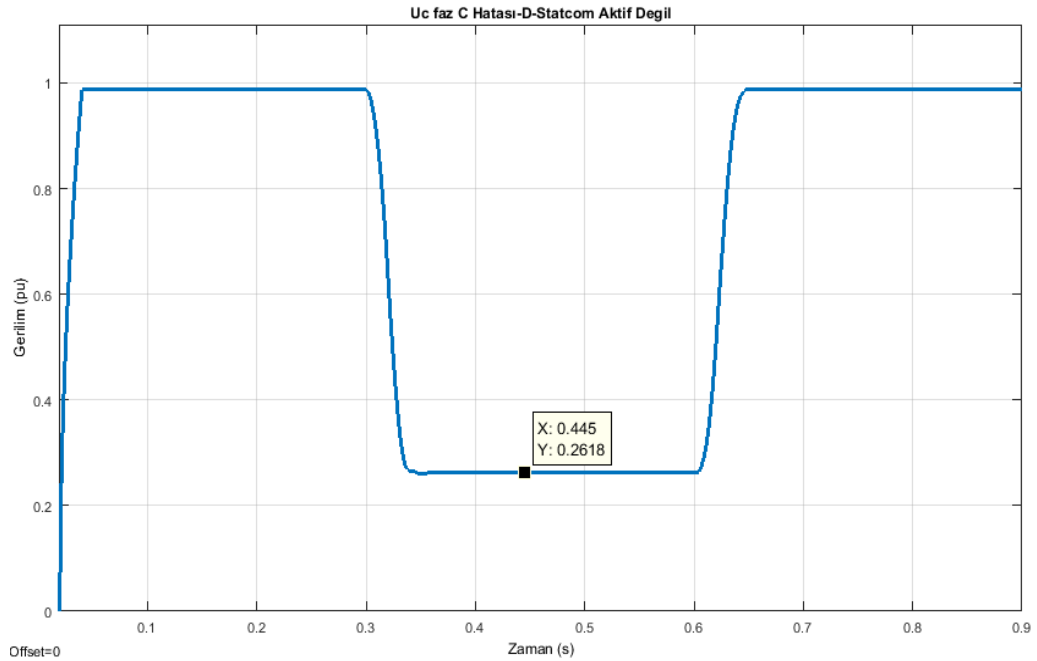
Şebekede belirtilen B noktasına aynı üç faz toprak hatası, 0.2- 0.6s boyunca şebekeye D-STATCOM bağlı iken uygulanmış, D-Statcom’un gerilim sarkmasını oranını azalttığı gözlenmiştir. Hata sonucu Vrms etkin gerilimi 0.95 pu değerindedir. Gerilim sarkması yüzdesi %3 oranındadır. D-Statcom’ un gerilim denetlemesi ile sarkma %77 oranında azalmıştır. ( $V_{dc}$ :19kV)



Şekil 5.12. B noktası üç faz toprak hatası sonucu yük1 noktası, Vrms gerilimi, D-Statcom aktif

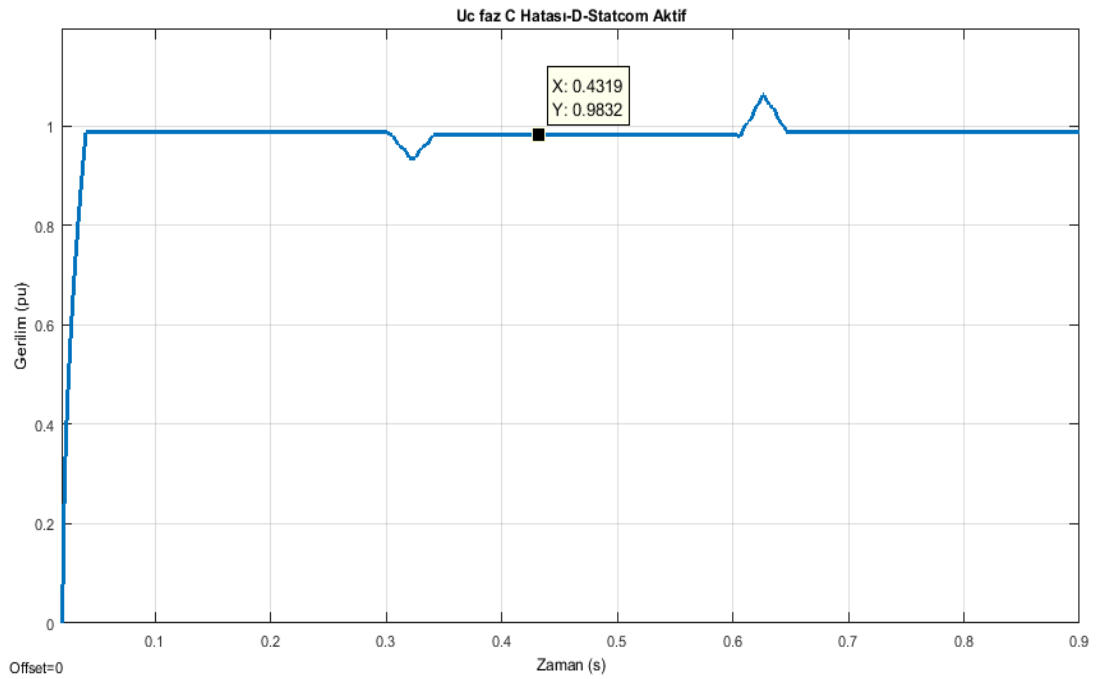
#### 5.1.4. Durum-4 üç faz toprak hatası (C Noktası)

Sistem 1’de belirtilen C noktasına üç faz toprak hatası 0.5ohm değerinde ve 0.3-0.6s aralığında şebekeye D-STATCOM bağlı değil iken uygulanmış, yük1 noktasındaki gerilim sarkması gözlenmiştir. Hata sonucu yük noktasındaki etkin gerilim 0.26pu değerinde, gerilim sarkması %73 oranındadır.



Şekil 5.13. C noktası üç faz toprak hatası sonucu yük1 noktası, Vrms gerilimi, D-Statcom aktif değil

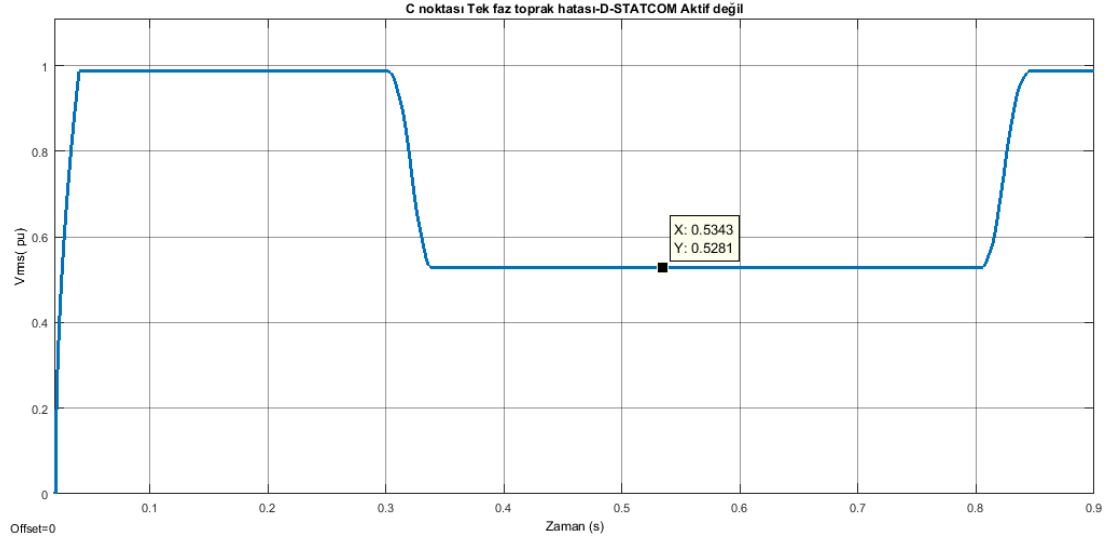
Aynı üç faz toprak hatası şebekede D-Statcom aktif iken uygulanmış ve gerilim sarkması gözlemlenmiştir. Burada altı darbeli D-STATCOM, yük1 noktasındaki ani gerilim desteğini sağlamak için, 100MVA gücünde 115kV/11kV/11kV ikincil ve üçüncül sargıları olmak üzere T3 trafosunun üçüncül sargısına şebekeye paralel olarak bağlanmıştır. C noktasındaki üç faz toprak hatası sonucu gerilim 0.98pu değerindedir. Şebekede D-Statcom' un gerilim düzenlemedeki etkisi ile sarkma büyük oranında azaltılmıştır. ( $V_{dc}=21kV$ )



Şekil 5.14. C noktası üç faz toprak hatası sonucu yük1 noktası,  $V_{rms}$  gerilimi, D-Statcom aktif

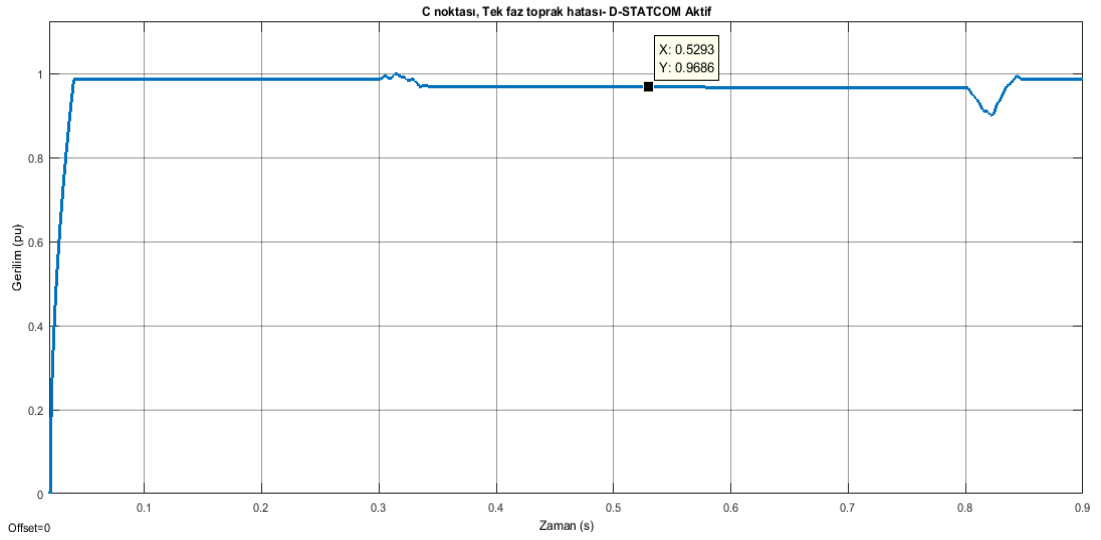
### 5.1.5. Durum-4 tek faz toprak hatası (C Noktası)

Sistem 1'de belirtilen C noktasına tek faz toprak hatası uygulanmıştır. D-Statcom şebekede aktif değil iken,  $t:[0.3 \ 0.8]s$  simülasyon periyodu boyunca hata direnci  $0.1\Omega$  olan tek faz-toprak hatasının şebekede sebep olduğu gerilim sarkması %46 oranındadır. Hata sonucu etkin gerilim 0.52pu değerindedir.



Şekil 5.15. C noktası tek faz-toprak hatası sonucu yük1 noktası, Vrms gerilimi, D-Statcom aktif değil

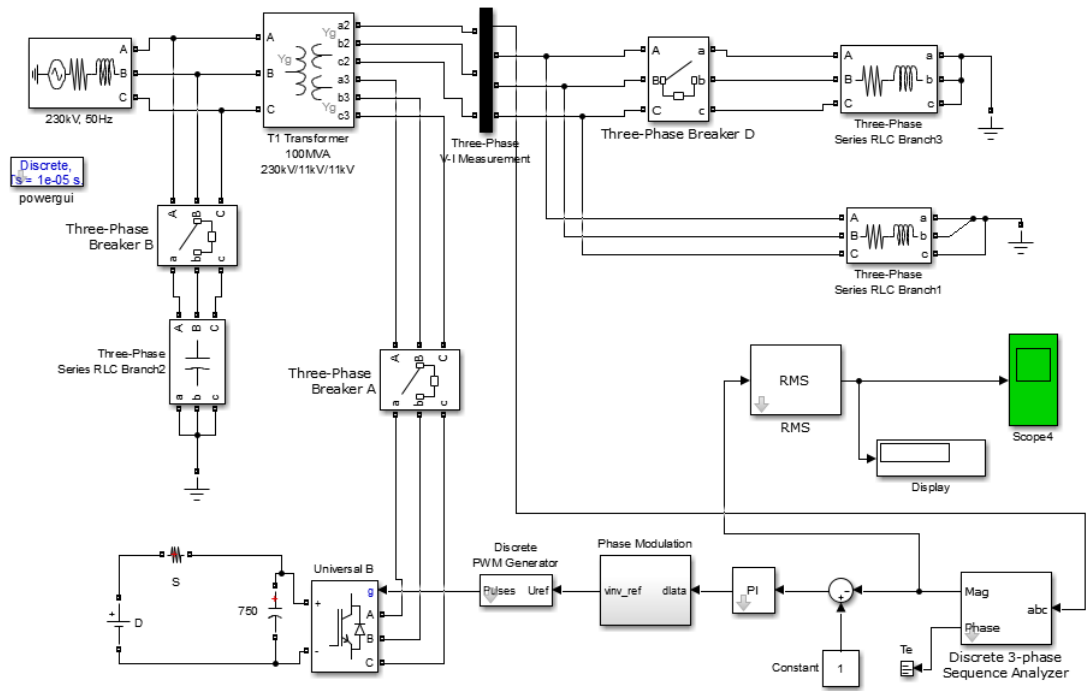
D-Statcom' un gerilim sarkmasındaki etkisini gözlemlemek üzere, C noktasına aynı tek faz-toprak hatası, şebekede D-Statcom aktif iken uygulanmıştır. Hata sonucu yük1 noktasındaki gerilim  $V=0.96$  pu değerinde, gerilim sarkması %1 oranındadır. D-Statcom' un sarkmalara karşı, gerilim düzenlemedeki etkisi etkin bir şekilde görülür.



Şekil 5.16. C noktası tek faz-toprak hatası sonucu yük1 noktası, Vrms gerilimi, D-Statcom aktif

## 5.2. Simülasyon Sonuçları –Sistem 2

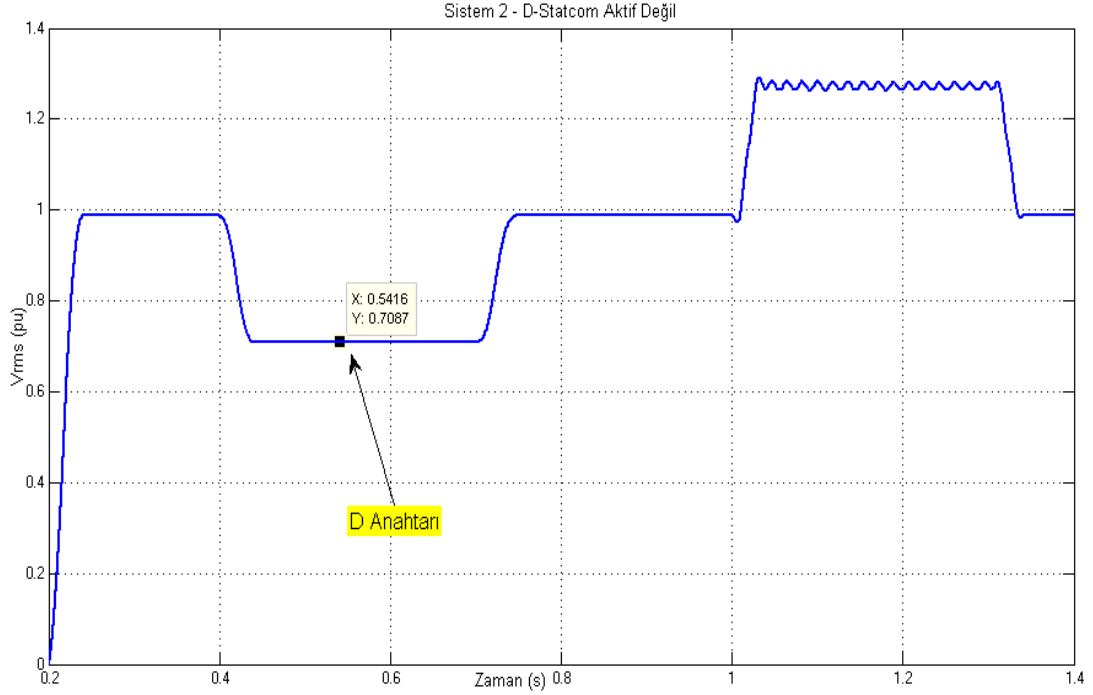
İkinci test sisteminde 50Hz'lik çalışma frekansına sahip 230kV değerinde 3 faz AC sistem 3 sargılı trafonun (230kV/11kV/11kV) primer tarafını beslemektedir. Yükler yıldız yıldız trafonun 11kV değerinde ikincil tarafına bağlanmıştır. Trafonun 11kV değerinde üçüncül sargısına iki seviyeli 6 darbeli D-STATCOM şebekeye paralel olarak bağlanmıştır. DC taraftaki 750 $\mu$ F kondansatör D-STATCOM' a enerji depolama kabiliyeti sunar. Farklı yük senaryolarının simülasyonu için B,C ve D anahtarları kullanılmıştır. D-STATCOM' un şebekeye bağlı olduğu ve olmadığı durumlarda gerilim sarkmasına olan etkisi gözlenmiştir.



Şekil 5.17. MATLAB simulink' te oluşturulan sistem 2 ve D-STATCOM devre modeli

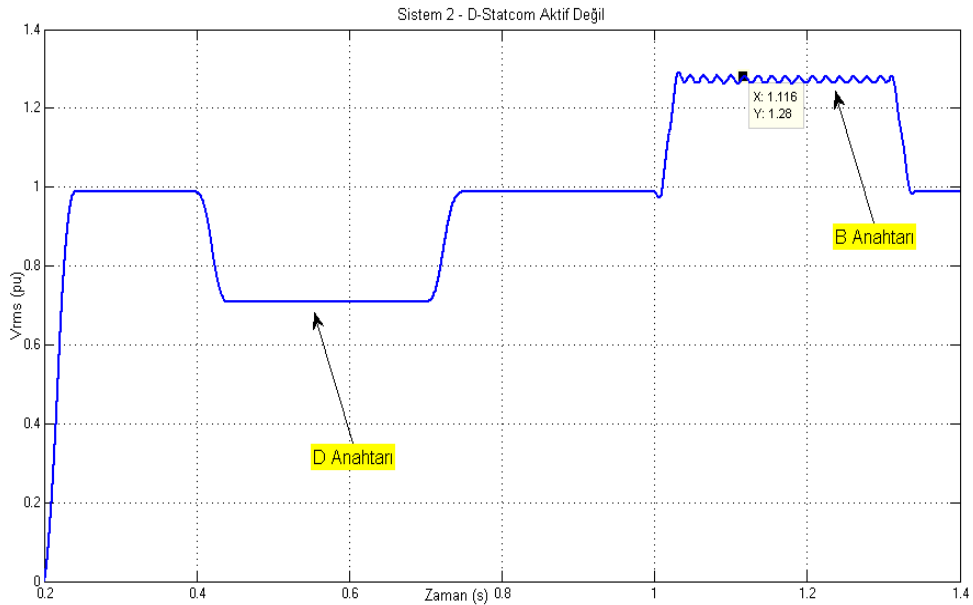
### 5.2.1. Şebekede D-STATCOM bulunmuyor iken analiz

Sistem 2'de belirtilen şebeke modelinde D anahtarı T:[0.4 0.7] s süresince kapatılarak, yük artışı sağlanmıştır. Şebekeye D-Statcom bağlı değil iken, yük artışı sonucu  $V_{rms}$  gerilimi 0.70 pu değerine düşmüştür. Gerilim sarkması %27 oranındadır.



Şekil 5.18. D-Statcom şebekeye bağlı değil iken, D anahtarı sonucu gerilim sarkması

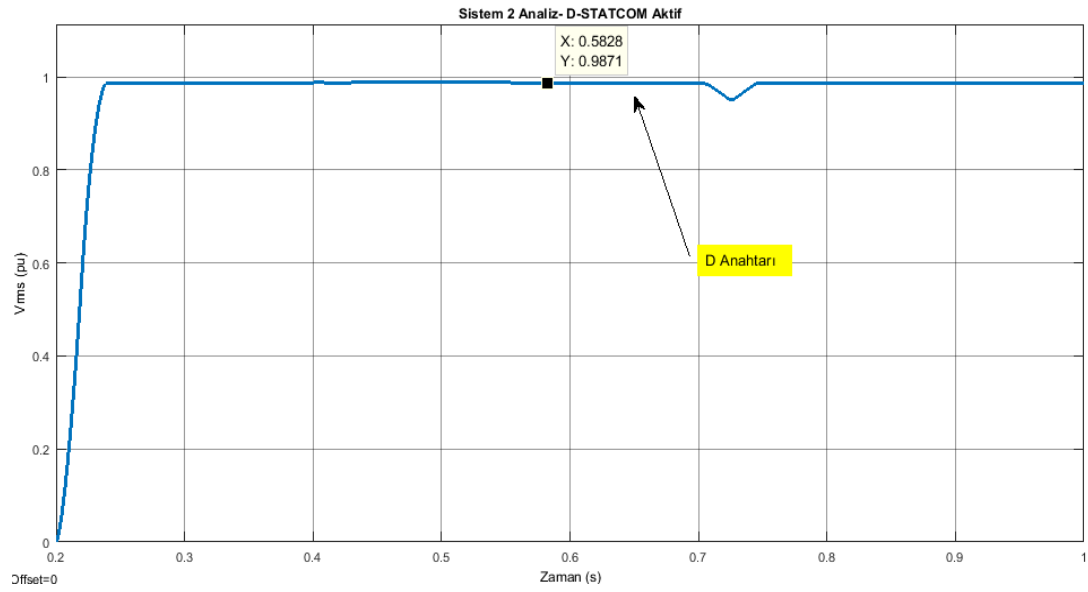
0.7s'de D anahtarı açılarak, yük gerilimi tekrar referans değere 1pu yaklaşmıştır. Üçüncü aşamada T:[1 1.3]s simülasyon periyodu boyunca, şebekede D-Statcom aktif değil iken B anahtarı kapatılarak, yüksek gerilim tarafına kapasitör bağlanmıştır. Gerilim yükselmesi sonucu etkin gerilim 1.28pu değerindedir. Vrms gerilimi referans değere göre %30 oranında artış göstermiştir.



Şekil 5.19. D-Statcom şebekeye bağlı değil iken, B anahtarı sonucu gerilim yükselmesi

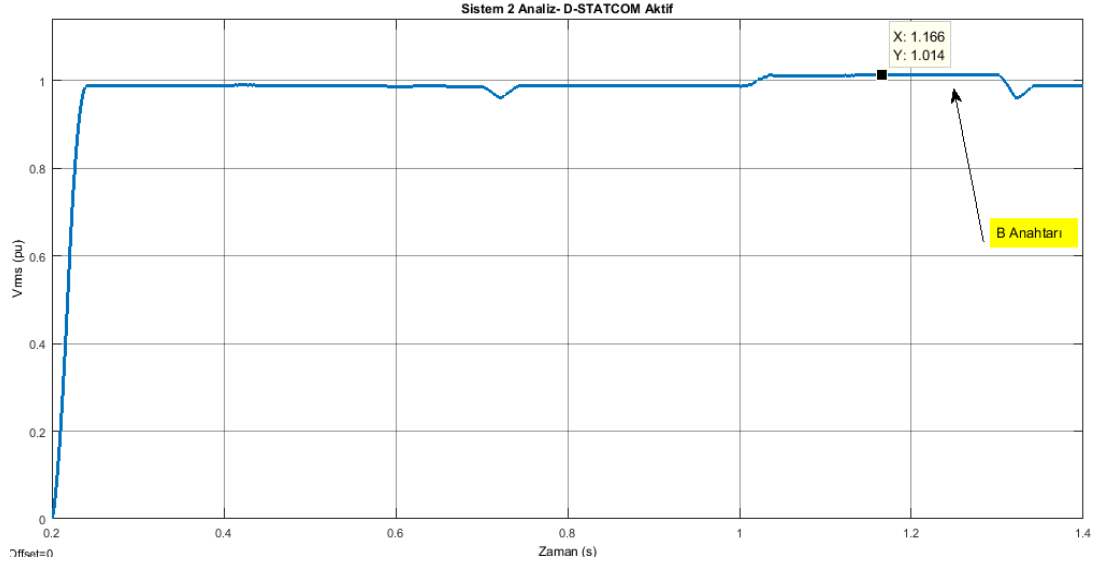
### 5.2.2. Şebekede D-STATCOM aktif iken analiz

Aynı anahtarlama senaryosu şebekede D-Statcom bulunuyor iken uygulandığında gözlemlenen gerilim sarkması/yükselmesi oranları paylaşılmıştır. T:[0.4 0.7]s süresince, D anahtarı kapatıldığında Vrms gerilimi 0.98 pu değerindedir. D-Statcom' un gerilim sarkması üzerindeki ciddi etkisi sarkma oranının büyük oranda azalması ile görülür. D-STATCOM, gerilim sarkmasını azaltmak için sisteme reaktif güç sağlamıştır. ( $V_{dc}=20kV$ )



Şekil 5.20. D-Statcom şebekeye bağlı iken, D anahtarı sonucu gerilim sarkması

Şebekede D-Statcom bulunuyor iken, B anahtarı 1-1.3s zaman aralığında kapatılmış, gerilim yükselmesi sonucu etkin gerilim değeri gözlenmiştir. Gerilim yükselmesi %2 oranındadır. D-Statcom' un gerilim denetlemedeki etkisi ile yükselmenin %28 oranında azaldığı görülür.



Şekil 5.21. D-Statcom şebekeye bağlı iken, B anahtarı sonucu gerilim yükselmesi



## BÖLÜM 6. SONUÇ

Elektrik enerjisinin sürekli ve güvenilir bir halde kullanılabilmesi için enerji kalitesini belirleyen parametrelerin ve enerji sistemini etkileyen olayların bilinmesi gereklidir. Enerji kalitesini etkileyen faktörlerden biri de gerilim sarkmasıdır. Gerilim sarkması iletim, dağıtım sistemi ve tüketiciler açısından kesintilere, ciddi problemlere yol açmaktadır. Bu problemlerin yaşanmaması için gerilim sarkması ile ilgili çalışmalar, önlemler ve uygulamalara önem verilmelidir.

Daha verimli bir elektrik güç üretimi ve iletimine duyulan ihtiyaç yeni teknolojileri de beraberinde getirmektedir. Tüm dünyada iletim sistemleri sürekli değişim halindedir ve yeniden yapılandırılmaktadır. İletim sistemlerine kullanıcı sayısının artması ile birlikte daha fazla yüklenilmektedir. Gelişen güç elektroniği elemanları sayesinde ortaya çıkan Esnek alternatif akım iletim sistemi (FACTS) yapıları ile güç sistemlerinin daha hızlı ve etkin bir şekilde denetlenebilmesi, güç akış kontrolü, paralel hatlar arasındaki yük paylaşımı, geçici kararlılığını iyileştirme, gerilim regülasyonu, reaktif güç kompanzasyonu ile akım, gerilim kontrolü mümkün olmuştur.

D-STATCOM (dağıtım statik senkron kompanzatorü), dağıtım sistemlerindeki güç kalitesi problemlerini çözmek için kullanılan güç elektroniği tabanlı cihazlardan biri ve FACTS denetleyicileri arasındaki en gelişmiş olanıdır. D-STATCOM' un esas avantajı, dağıtım sistemine enjekte edilen akımı etkili bir şekilde ayarlayabilen güç elektroniği tabanlı kontrole sahip olmasıdır. İkinci avantajı çok çeşitli uygulamalara sahip olmasıdır; sarkma ya da yükselmeye karşı dağıtım barasının gerilimini düzenleme, yükün reaktif güç ihtiyacının kompanzasyonu, zayıf yük güç faktörlerinin etkisini giderme, yük akımlarındaki harmonik içeriklerin etkisini azaltma ve daha fazlası gibi [5].

Bu tez çalışmasında orta gerilim şebekelerindeki gerilim sarkması veya yükselmesine D-STATCOM' un etkilerini incelemek üzere analiz ve simülasyon çalışması yapılmıştır. Tezin ikinci bölümünde güç kalitesi ve problemlerinden bahsedilmiştir. Gerilim sarkmasının tanımı, oluşma sebepleri, karakteristiği, orijini ve sınıflandırılması yapılmıştır. Üçüncü bölümde D-STATCOM' un temel yapısı olan gerilim beslemeli dönüştürücüler (VSC) ve D-STATCOM' un kontrol tekniklerinden olan sinüsoidal darbe genişlik modülasyon tekniği (SPWM) incelenmiştir. Dördüncü bölümde D-STATCOM detaylı bir şekilde açıklanmış, teorik bilgi, eşdeğer devre modeli ve çalışma prensibi incelenmiştir.

Şebekedeki gerilim sarkmalarına etkisini incelemek üzere D-STATCOM' un benzetimi MATLAB-Simulink Toolbox' ı kullanılarak yapılmıştır. D-STATCOM' un temel yapısı olan gerilim beslemeli dönüştürücü (VCS), iki seviyelidir ve anahtarlama stratejisinde sinüsoidal darbe genişlik modülasyon (SPWM) tekniği uygulanmıştır. Bu kontrol tekniğinin amacı, sistem bozulmalarına karşı hassas yükün bağlı olduğu noktada gerilimi sabit genlikte tutmaktır. Darbe genişlik modülasyon tekniği, yük noktasındaki etkin gerilimi ölçer, reaktif güç ölçümü gerektirmez. Bu karakteristik sinüsoidal darbe genişlik modülasyon (SPWM) tekniğini yaygın olarak tercih edilir kılar.

İki ayrı sistemin MATLAB Simulink ortamında benzetimi yapılarak, gerilim sarkması veya yükselmesi durumlarını incelemek üzere farklı durum senaryoları uygulanmıştır. Şebekede oluşan gerilim sarkmalarına karşı, D-STATCOM' un gerilim düzenlemedeki etkisini daha etkin bir şekilde göstermek için, simülasyon çalışmaları şebekeye D-STATCOM' un bağlı olduğu ve olmadığı durumlar karşılaştırılarak incelenmiştir. Simülasyon sonuçları D-STATCOM' un sağladığı etkin gerilim düzenlemesini açıkça göstermiştir. D-STATCOM' un şebekeye bağlı olduğu durumlarda, yük noktasındaki gerilim sarkması yüzdesi büyük oranda azalmıştır. D-STATCOM, şebekedeki gerilim sarkması, yükselmesi gibi bozulmaları düzeltmek için sisteme akım enjekte eder. İletim hattına paralel bağlı D-STATCOM, şebeke ile reaktif güç alışverişi yaparak, gerilim sarkması/yükselmesi problemlerini gidermede etkin rol oynamıştır.

Güç sisteminin kalite ve performansı reaktif güç kompanzasyonu ile geliştirilebilir. Güç elektroniği tabanlı FACTS denetleyicilerinden olan D-STATCOM' un şebekeye bağlı olması ile reaktif güç kompanzasyonu, güç sistemlerinin daha hızlı ve etkin bir şekilde denetlenebilmesine olanak sağlar. Yapısındaki güç elektroniği elemanları sayesinde kontrolörün denetlemesi hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Simülasyon sonuçları D-STATCOM' un etkin gerilim düzenleme kapasitesi ile güç kalitesi problemlerinden gerilim sarkma veya yükselme oranını büyük oranda azalttığını ve problemlerin giderilmesine etki ettiğini göstermiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Das. J.C.. Effects of Momentary Voltage Dips on the Operation of Inductm and Synchronous Motors, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 26, No. 4, pp. 711-717. July/Aug 1990.
- [2] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance," Load Representaion for Dynamic Performance Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 8 No.2, pp.472-81, May 1993.
- [3] Gyugyi,1988. L., Gyugyi, Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators, Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 4, pp. 483-494,1988.
- [4] Cheng, H., In, I. and Chen S., DC-Link Voltage Control and Performance Analysis of STATCOM.
- [5] Sunmer M., Abusorraha A., Thomas D. and Zanchetta P., 2006. Improved Power Quality Control and Intelligent Protection for Grid Connected Power Electronic Converters using Real Time Parameter Estimation, Industry Applications Conference, IEEE 41st IAS Annual Meeting, 4:1709-1715.
- [6] H. Award, M.H.J. Bollen, "Power electronics for power quality improvements," in Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2003, June 9-12, 2003, pp. 1129-1136.
- [7] Pérez, N.L., and Donsión, M.P., (2003). Technical Methods for the Prevention and Correction of Voltage Sags and Short Interruptions inside the Industrial Plants and in the Distribution Networks. Paper presented at The International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ'03), Vigo, Spain. Retrieved from <http://www.icrepq.com/>.
- [8] Dugan, R., McGranaghan, M., Santoso, S., and Beaty, W., (1996). Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, New York.
- [9] Bollen, M.H.J, Understanding Power Quality Problems : Voltage Sags and Interruptions, IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.
- [10] IEEE Std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 1995.

- [11] Bollen, M.H.J, Voltage Sags in Three Phase Systems, IEEE Power Engineering Review, Vol. 21 No.9 pp.8-11, September 2001.
- [12] Yılmaz, A.S., Kısa Süreli Gerilim Düşümleri, Tez Öneri Raporu, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2000.
- [13] IEEE Std 493-1997, IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems ( IEEE Gold Book), 1997.
- [14] Steciuk, P.B., and Redmon, J.R., Voltage Sag Analysis Peaks Customer Service, IEEE Computer Applications in Power Systems, Vol.9, No.4, pp.48-51, October 1996.
- [15] Leborgne, R. (2005). Voltage Sags Characterisation and Estimation.
- [16] Uzunovic, E., EMTP, Transient Stability and Power Flow Models and Controls of VSC Based FACTS Controllers, Phd. Thesis, Canada, 2001.
- [17] Bose, K. B., Modern Power Electronics and AC Drivers, Prentice Hall PTR, 2002.
- [18] Çöteli, R., 2006, "STATCOM ile Güç Akış Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi FBE, Elazığ.
- [19] Chen, B. S., Hsu, Y. Y., 2008, "A Minimal Harmonic Controller for a STATCOM" IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, Issue 2, pp. 655 – 664.
- [20] Canizaresa, C. A., Pozzi, M., Corsi, S., Uzunovic, E., 2003, "STATCOM modeling for voltage and angle stability studies", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, , Vol. 25, Issue 6, pp. 431 - 441.
- [21] Singh, B., Saha, R., Chandra, A., Al-Haddad, K., 2009, "Static synchronous compensators (STATCOM) : a review", IET Power Electronics, Vol. 2, Issue. 4, pp. 297 - 324.
- [22] Nazmul Islam Raju et al., Sinusoidal PWM Signal Generation Technique for Three Phase Voltage Source Inverter with Analog Circuits & Simulation of PWM Inverter for Standalone Load & Micro-grid System, International Journal of Renewable Energy Research, Vol.3, No.3.
- [23] Espinoza, J. R., 2006, "Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications", Chapter 15 : Inverters, Muhammad H. Rashid, Academic Press An imprint of Elsevier Inc., pp. 363.
- [24] Tan, J. S., (2006), "Flexibility in MLVR- VSC back - to - back link", Master of Science, University of Canterbury, New Zealand.

- [25] Yu, Z., Mohammed, A., Panahi, I., 1997, "A review of three PWM techniques", American Control Conference, Albuquerque, NM, Vol. 1, pp. 257 – 261.
- [26] Gyugyi, L., Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 9, Issue: 2, 904-908, 1994.
- [27] Cavaliere, C. A. C., Watanabe, E. H., Aredes, M., Comparison Between the Conventional STATCOM and the PWM STATCOM, 1999.
- [28] Larsen, E., Miller, N., Nilsson, S. and Lindgren, S., Benefit of GTO-Based Compensation Systems for Electric Utility Applications, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 7, No. 4, 2056-2064, 1992.
- [29] Hazım Faruk Bilgin, "Design and Implementation of a Current Source Converter Based Statcom for Reactive Power Compensation", Doktora Tezi, Nisan 2007.
- [30] Schauder, C., and Mehta, H., Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators, IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 4, pp.299–306, 1993.
- [31] M. Anuj Gargeya, 2013, "A New Proposal for Mitigation of Power Quality Problems Using DSTATCOM", International Journal of Scientific Engineering and Technology Volume 2 Issue 5, pp : 31 7-321.
- [32] Olimpo Anaya-Lara and E. Acha, 2002, "Modeling and Analysis of Custom Power Systems by PSCAD/EMTDC", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No.1, January 2002.
- [33] E. Uzunovic, C. A. Canizares Reeve J. Fundamental Frequency Model of Static Synchronous Compensator, North American Power Symposium (NAPS), Laramie, Wyoming, 49-54, 1997.
- [34] M. Ali Anadol, "Laboratuar Ölçekli Bir Karma İletim Hattında Statcom Kullanılarak Sistem Dinamik ve Sürekli Hal Davranışlarının İncelenmesi", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi FBE, Konya.
- [35] M. Mustafa Ertay, Zafer Aydoğmuş, "Statcom ile Bir Enerji İletim Sisteminde Gerilim Kontrolü", Dumlupınar Üniversitesi FBE, Sayı 21, Nisan 2010.
- [36] Alper Çetin, "Design and Implementation of a Voltage Source Converter based Statcom for Reactive Power Compensation and Harmonic Filtering", Doktora Tezi, Nisan 2007.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Esra Gencer, 11.05.1989'da Kocaeli'de doğdu. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Lisans derecesini tamamladıktan sonra yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde devam etti. 2016 yılı itibarıyla ABB Elektrik'de Elektrik Dizayn Mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.