

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

ORTA GERİLİM ŞEBEKELERİNDE KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞÜMLERİNE KARŞI ÖNLEMLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Semih ÖZKOL

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU

Haziran 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORTA GERİLİM ŞEBEKELERİNDE KISA SÜRELİ
GERİLİM DÜŞÜMLERİNE KARŞI ÖNLEMLER**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Semih ÖZKOL

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

Bu tez 18/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Ertan YANIKOĞLU
Jüri Başkanı



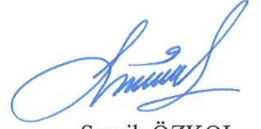
Dr. Öğr. Üyesi
Ahmet KÜÇÜKER
Üye



Dr. Öğr. Üyesi
M. Server FIRAT
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.



Semih ÖZKOL

06.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU' na yoğun çalışmalarım sırasında sabırla desteğini esirgemeyen eşim Meltem'e, sürekli çalışmama izin verdiği için küçük kızım Elif'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
 BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
 BÖLÜM 2.	
ELEKTRİK ENERJİSİ KALİTESİ	3
2.1. Geçici Olaylar	4
2.2. Gerilim Dengesizliği	5
2.3. Gerilim Dalgalanmaları	6
2.4. Dalga Formu Bozukluğu	7
2.4.1. Harmonikler	7
2.4.2. Çentik	9
2.4.3. Doğru akım/gerilim bileşeni	9
2.4.4. Gürültü	10
2.5. Uzun Süreli Gerilim Değişimleri	10
2.6. Kısa Süreli Gerilim Değişimleri	10
2.6.1. Kesinti	11
2.6.2. Gerilim yükselmesi	11
2.6.3. Gerilim düşümü	11

2.7. Kısa Süreli Gerilim Düşümünün Hassas Yüklere Etkisi	13
--	----

BÖLÜM 3.

ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ (FACTS)	15
3.1. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)	17
3.2. Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC)	18
3.3. Tristör Anahtarlama Reaktör (TSR)	18
3.4. Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)	18
3.5. Tristör Kontrollü Statik VAR Kapasitör (TCSVC)	19
3.6. Statik Senkron Seri Kompanzator (SSSC)	20
3.7. Statik Senkron Kompanzator (STATCOM)	21
3.8. Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (UPFC)	24

BÖLÜM 4.

ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİNDE (FACTS)

KULLANILAN EVİRİCİLER VE KONTROLÖRLER	26
4.1. Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler	27
4.1.1. Tek fazlı gerilim beslemeli dönüştürücüler	27
4.1.2. Üç fazlı gerilim beslemeli dönüştürücüler	29
4.2. Çok Seviyeli Eviriciler	30
4.2.1. Diyot kenetlemeli eviriciler	31
4.2.2. Kapasitör kenetlemeli eviriciler	31
4.2.3. Çok seviyeli kaskat evirici	32
4.2.4. Modüler çok seviyeli evirici	33
4.3. Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği	34
4.3.1. Sinüsoidal darbe genişlik modülasyon tekniği (SDGM)	35
4.3.2. Harmonik eliminasyonlu darbe genişlik modülasyon tekniği (HEDGM)	35
4.3.3. Uzay vektör darbe genişlik modülasyon tekniği (UVDGM)	36
4.4. Kontrol Sistemleri	36

BÖLÜM 5.

MATLAB / SİMULINK PROGRAMI İLE DEVRENİN TASARLANMASI

VE SİMÜLASYONU	39
5.1. Orta Gerilim Dağıtım Sisteminin Tasarlanması	40
5.1.1. Güç kaynağı bloğu	40
5.1.2. Güç transformatörü bloğu	41
5.1.2.1. Transformatör kısa devre çalışma deneyi	42
5.1.2.2. Transformatör boşa çalışma deneyi	44
5.1.3. Dağıtım hattı bloğu	46
5.1.4. Dağıtım transformatörü bloğu	46
5.1.5. Yük bloğu	47
5.1.6. Kesici bloğu	48
5.1.7. Kısa devre arıza bloğu	48
5.1.8. Kapasitör grubu bloğu	48
5.1.9. Orta gerilim şebekesi simulink modeli	49
5.1.10. D-STATCOM bloğu	50
5.1.11. Ölçüm bloğu	51
5.2. Simulasyon	51
5.2.1. Gerilim yükselmesi ve D-STATCOM'un tepkisi	51
5.2.2. Şebekede A noktasında devreye yük girmesi sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi	53
5.2.3. Şebekede A noktasında 3 faz + toprak arızası sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi	54
5.2.4. Şebekede A noktasında 3 faz arızası sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi	55
5.2.5. Şebekede A noktasında 1 faz + toprak arızası sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi	56
5.2.6. Şebekede B noktasında 3 faz + toprak arızası sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi	58
5.2.7. Şebekede B noktasında 3 faz arızası sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi	59

5.2.8. Şebekede B noktasında faz toprak arızası sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi	60
BÖLÜM 6.	
SONUÇ	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	67



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

DGM	: Darbe genişlik modülasyonu
D-STATCOM	: Dağıtım statik senkron kompanzatör
FACTS	: Flexible alternating current transmission systems (Esnek iletim hatları)
GTO	: Kapıdan kesmeli tristör
HEDGM	: Harmonik Eliminasyonlu Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği
IGBT	: Kapıdan izoleli bipolar tristör
MOSFET	: Metal oksit alan etkili transistör
SDGM	: Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu
SSSC	: Statik Senkron Seri Kompanzatör
STATCOM	: Statik senkron kompanzatör
TCR	: Tristör Kontrollü Reaktör
TCSC	: Tristör Kontrollü Seri Kapasitör
TCSVC	: Tristör Kontrollü Statik VAR Kapasitör
TSC	: Tristör Anahtarlama Kapasitör
TSR	: Tristör Anahtarlama Reaktör
UPFC	: Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü
UVDGM	: Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Örnek gerilim dengesizliği	6
Şekil 2.2. Bir dağıtım sisteminde ark fırınının neden olduğu gerilim dalgalanması	7
Şekil 2.3. Bir konvertör tarafından meydana gelen çentikler	9
Şekil 2.4. Gerilim azalmasının süresi ve genliğindeki değişim	12
Şekil 2.5. Tipik bir kısa süreli gerilim düşümü	12
Şekil 2.6. Ayarlanabilir hız sürücülerinde gerilim düşümü tolerans eğrisi	13
Şekil 2.7. Programlanabilir lojik denetleyici gerilim düşümü tolerans eğrisi.....	14
Şekil 2.8. Kişisel bilgisayarlar gerilim düşümü tolerans eğrisi	14
Şekil 3.1. Tristör kontrollü reaktör eşdeğer devresi.....	17
Şekil 3.2. TSC eşdeğer devresi	18
Şekil 3.3. Tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC) eşdeğer devresi.....	19
Şekil 3.4. TCSVC nin (a) yapısı ve (b) VI karakteristiği	20
Şekil 3.5. Statik senkron seri kompanzatör (SSSC) eşdeğer devresi	21
Şekil 3.6. STATCOM devre yapısı	21
Şekil 3.7. (a).STATCOM çıkış akımı iletim hattı geriliminden 90° ileride (Kapasitif) (b).STATCOM çıkış akımı iletim hattı geriliminden 90° geride (Endüktif)	22
Şekil 3.8. STATCOM V-I karakteristiği	23
Şekil 3.9. Birleştirilmiş güç akış kontrolörü (UPFC) 'nin devre yapısı	25
Şekil 4.1. Bir fazlı evirici yapısı	28
Şekil 4.2. Tek fazlı tam dalga dönüştürücü akım ve gerilim dalga şekilleri.....	28
Şekil 4.3. Üç fazlı gerilim beslemeli dönüştürücü	30
Şekil 4.4. (a)İki seviyeli evirici (b)Üç seviyeli evirici (c) n seviyeli evirici	30
Şekil 4.5. Beş seviyeli üç faz DKE'nin devre yapısı	31
Şekil 4.6. Beş seviyeli üç faz kapasitör kenetlemeli evirici 'nin devre yapısı	32

Şekil 4.7. Çok seviyeli kaskat evirici 'nin devre yapısı	33
Şekil 4.8. Modüler çok seviyeli evirici' nin devre yapısı	34
Şekil 4.9. Açık çevrim kontrol sistemi	36
Şekil 4.10. Kapalı çevrim kontrol sistemi	37
Şekil 4.11. PID kontrol edici genel gösterim	37
Şekil 5.1. Modellenecek radyal şebeke	40
Şekil 5.2. Güç kaynağı bloğu	40
Şekil 5.3. İki sargılı ve üç sargılı transformatör bloğu	41
Şekil 5.4. Primere indirgenmiş transformatör eşdeğer devresi	43
Şekil 5.5. Kısa devre deneyi transformatör eşdeğer devresi	43
Şekil 5.6. Boşta çalışma devre deneyi transformatör eşdeğer devresi	44
Şekil 5.7. Hat bloğu	46
Şekil 5.8. Dağıtım transformatörü bloğu	46
Şekil 5.9. Yük bloğu	47
Şekil 5.10. Kesici bloğu	48
Şekil 5.11. Kısa devre arıza bloğu	48
Şekil 5.12. Kapasitör bloğu	48
Şekil 5.13. Orta gerilim bölgesi simulink modeli	49
Şekil 5.14. D-STATCOM bloğu	50
Şekil 5.15. Ölçüm bloğu	51
Şekil 5.16. (a)Gerilim yükselmesi sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok	52
Şekil 5.16. (b)Gerilim yükselmesi sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var	52
Şekil 5.17. (a)Gerilim düşmesi sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok	53
Şekil 5.17. (b)Gerilim düşmesi sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var	54
Şekil 5.18. (a)3 Faz + toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok	54
Şekil 5.18. (b)3 Faz + toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var	55
Şekil 5.19. (a)3 Faz arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok	55
Şekil 5.19. (b)3 Faz arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var	56
Şekil 5.20. (a)Faz + toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok	56
Şekil 5.20. (b)Faz + toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var	57
Şekil 5.20. (c)Faz + toprak arızası sonucu arızalı faz ve arıza olmayan fazların durumu	57

Şekil 5.21. (a) 3 Faz + toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok	58
Şekil 5.21. (b) 3 Faz + toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var	58
Şekil 5.22. (a) 3 Faz arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok	59
Şekil 5.22. (b) 3 Faz arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var	59
Şekil 5.23. (a) Faz+toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok	60
Şekil 5.23. (b) Faz+toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var	60



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Gerilim harmonikleri için sınır değerler	8
Tablo 2.2. Akım harmonikleri için maksimum yük akımına göre sınır değerler ...	8
Tablo 2.3. Uzun süreli gerilim değişimleri etki süresi ve değişim sınırlarına göre sınıflandırılması	10
Tablo 2.4. Kısa süreli gerilim değişimleri etki süresi ve değişim sınırlarına göre sınıflandırılması	10
Tablo 5.1. 2018 yılı yaz puantı, kış puantı ve minimum yük şartlarında trafo merkezleri yüksek gerilim baralarında kısa devre akımları	41

ÖZET

Anahtar Kelimeler: DSTATCOM, Gerilim Düşmesi, Gerilim Yükselmesi, Güç Kalitesi

Teknolojiden beklentinin artması ile endüstriyel sistemlerin tasarımında hassas yüklerin kullanımı da artmıştır. Enerjinin güç kalitesi ve verimliği dağıtım hatlarının önemli problemleri haline gelmiştir. Tüketici sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Mevcut hatlar farklı hassasiyetlere sahip tüketicilerle yüklenirken bir diğer taraftan dağıtık yenilenebilir enerji üretim sistemleri de yaygınlaşmaktadır. Dağıtım hatlarında kısa devre arızaları, büyük güçlü yüklerin devreye girip çıkmaları, reaktif güç akışları kısa süreli gerilim düşümlerine sebep olmaktadır. Gerilim düşümleri kontrol elemanlarının kararlı çalışma sınırları dışında kaldığı zaman endüstriyel tüketicilerde büyük ekonomik kayıplara sebep olabilir ve düşük değerlerde bağlantı gücüne sahip tüketicilerde ise konforsuz tüketime sebep olmaktadır. Bu problemlerin giderilmesi için sistem dinamiklerindeki değişikliklere hızlı cevap veren Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Dağıtım Sistemi Statik Senkron Kompanzatör (D-STATCOM) dağıtım sistemlerinde kullanılan FACTS cihazlarından biridir. Bu çalışmada FACTS cihazlarından biri olan D-STATCOM radyal bir orta gerilim şebekesinde farklı senaryolarda oluşabilecek kısa süreli gerilim düşümlerine karşı bir önlem olarak kullanılmıştır. Matlab/Simulink programı ile modellenen radyal şebekede oluşturulacak kısa devre, ani yük artışı ya da gerilim yükselmesi gibi örnek olaylarda D-STATCOM devrede olduğu ve D-STATCOM devrede olmadığı durumlar simüle edilmiştir. Simulasyon sonuçları osilografik olarak sunulmuş ve sistem davranışları değerlendirilmiştir. Radyal şebeke üzerinde belirlenen noktalarda elde edilen simülasyon sonuçları, D-STATCOM cihazının bara gerilimlerini nominal değerde olmasını sağladığını göstermiştir.

PRECAUTIONS TAKEN AGAINST SHORT-TERM VOLTAGE DROPS IN MEDIUM VOLTAGE NETWORKS

SUMMARY

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

Using precision loads has increased in design of the industrial systems with increasing technology expectations. Power quality and productivity of energy have become problems of distribution lines. Number of consumers increase day by day. While available lines are used by users that have different sensitivities, on the other part, distributed renewable energy generation systems becomes widespread. Short circuit failures in distribution lines, large-scale loads which cut-in and out and reactive power flows cause short-term voltage drop. When the voltage drop stay out of steady state working limits of controllers, it causes great economic losses for industrial consumers and causes uncomfortable consumption for consumers with low power rating. In order to solve these problems, flexible Alternating Current Systems (FACTS) devices which respond to changes in system dynamics quickly are widely used. Distribution System Static Synchronous Compensator (D-STATCOM) is one of FACTS devices that are used in distribution systems. In this study, D-STATCOM which is one of the flexible alternative devices has been used as a precaution against short-term voltage drops that may occur in different scenarios in a radial medium voltage network. When D-STATCOM has been activated or not, it has been simulated for some cases such as short-circuit, sudden load increase or voltage rise current which is generated in a radial network that was modelled in matlab/simulink program. Simulation results has been presented oscillographically and evaluated system behaviors. Simulation results that obtained at determined points in radial network demonstrate d-statcom device achieves to keep bus voltages in nominal range.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Artan nüfus ve gelişen teknoloji ile enerji sistemlerinden talep edilen elektriksel güç ihtiyacı artmıştır. Enerji kalitesinden önemli ölçüde etkilenen hassas yükler, proses kontrol elemanları sınır değerleri dışında bir enerji ile beslendiklerinde ya çalışmalarında aksaklıklar olmakta ya da ekipmanlar zarar görebilmektedir.

Dağıtım sistemlerinde enerji kalitesini arttırmak gün geçtikçe daha karmaşık hale gelmektedir. Reaktif güç ihtiyacının karşılanması sistemin kapasitesinin artırılmasını sağlayacaktır ve enerji üretim tesislerinden daha verimli şekilde yararlanılması sağlanmış olacaktır. Mevcut sistemde reaktif güç ihtiyacının karşılanması ile ilgili geleneksel çözümlerden olan mekaniksel anahtarlama kompanzasyon sistemleri dinamik sistem cevabı olarak yavaş kalmaktadır. Yarı iletken teknolojisine paralel olarak FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) cihazları enerji sistemlerinin kapasitesini arttırmaya yönelik kullanılmaya başlanmıştır. FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) kavramı, ilk olarak 1980’de Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü (EPRI) tarafından ortaya atılmıştır[1].

Dağıtım şebekesinin herhangi bir noktasında devreye giren büyük güçlü motorlar ya da devreye alınan büyük yükler bağlı bulunduğu baralar dışında da sistem baralarında gerilim düşümlerine sebep olacaktır. Orta gerilim dağıtım hatlarında, yük uçlarında oluşan kısa devre arızaları kendi baraları haricinde de gerilim düşümlerine sebep olacaktır. Ortaya çıkan gerilim düşümleri endüstriyel tesislerde büyük ekonomik kayıplara neden olurken küçük güç talebiyle enerji sisteminden beslenen yüklerde de etkisini göstermektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim yapan enerji tesislerinin çoğalması, artan enerji ihtiyacının karşılanması konusunda yararı büyüktür. Klasik dağıtım sisteminde görülen tek yönlü yük akışı dağıtık üretim sistemlerinin yaygınlaşmasıyla yerini çift yönlü yük akışına bırakmış dağıtım sistemi daha karmaşık hale gelmiş ve gerilim kararlılığını kontrol etmek zorlaşmaya başlamıştır. Ülkemizde özellikle kırsal alanlarda arazi maliyetlerinin düşük olması dağıtık üretim sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Yatırımcıların kırsal alanlara yönelmesi elektrik şebekelerinde enerji talebinin düşük olduğu bu alanlarda, kurulu güçleri büyük olan dağıtık üretim tesisleri mevcut şebeke baralarında gerilim seviyelerini yükseltmektedir.

Dağıtım sistemleri gerilim yükselmeleri, gerilim düşümleri gibi sorunlarla karşı karşıya kaldığı anlarda sistemin kararlılığını sağlamak ve enerji kalitesini arttırmak için önlemlerin alınması gerektiği açıktır. D- STATCOM sistemden elde ettiği referans ölçüm değerini baz alarak kontrol ünitesi sayesinde hızlı bir şekilde cevap verebilen en gelişmiş Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) cihazlarından biridir.

Bu tez çalışmasında orta gerilim radyal şebekede kısa süreli gerilim düşümleri ve etkileri incelenerek alınacak önlemler hakkında bilgi verilmiştir. Matlab / Simulink ortamında modellenen Radyal şebekede farklı örnek olaylar oluşturularak kısa süreli gerilim düşümleri simüle edilmiş ve D-STATCOM modeli eklenerek simülasyonlar tekrarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarında elde edilen gerilim düşümleri ve D-STATCOM' un etkileri gözlenmiştir.

BÖLÜM 2. ELEKTRİK ENERJİSİ KALİTESİ

Ülkemizde enerji kalitesi ile ilgili standartlar ve yönetmelikler;

- Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik (2006) [2]
- Trafo Merkezleri O.G. – A.G. Güç Kalitesi Ölçüm Şartnamesi (2007) [3]
- TS EN 50160 standardı: Genel Elektrik Şebekeleri Tarafından Sağlanan Elektriğin Gerilim Karakteristikleri (2011) [4]
- Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği (2012) [2]
- Elektrik Şebeke Yönetmeliği (2014) [2]

ile enerji kalitesinde gerilimin genliği, gerilimin frekansı, gerilim dengesizliği, harmonik ve fliker şiddeti sınır değerleri gibi değerler belirlenmiştir. Literatürde enerji kalitesi ile ilgili yapılan çalışmalarda gerilim çökmesi, gerilim dengesizliği gibi olaylar için bağlayıcı bir kısıtlama bulunmadığı görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yapılan teşviklerle giderek artmaktadır. Tesis edilen dağıtık üretim sistemlerinin yeni sorunları ile birlikte şebekeye ekleneceğini tahmin etmek zor değildir. Mevcut şebekenin daha karışık bir dağıtım sistemine dönüşeceği düşünüldüğünde bağlayıcı yönetmeliklerin daha kapsamlı hale getirilmesi faydalı olacaktır.

Elektrik enerjisinin kalitesi tüketiciler tarafından ne kadar önemli ise temininden sorumlu kurum ve kuruluşlar için de önemlidir. Hatların reaktif güçle yüklenerek kapasitelerinin azalmasına, gerilim düşümlerinin artmasına, enerjinin verimli kullanılmamasına yol açmaktadır. Reaktif güç yönetmelik ve satış sözleşmeleri ile son tüketici sorumluluğuna bırakılmış olsa da dağıtım şirketleride Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi 'ne karşı sorumludur. Sınır değerler ilgili yönetmelik ve bağlantı

sözleşmelerinde belirtilmiştir. İletim hattını gereksiz yere reaktif güçle yüklememek için trafo merkezlerinde kompanzasyon sistemleri tesisi kurularak enerji kalitesinin problemlerinden biri çözülmeye çalışılmaktadır. Hattın endüktif reaktif ve kapasitif reaktif ihtiyacını mekaniksel kompanzasyon sistemlerinden daha hızlı karşılama kabiliyetine sahip olan FACTS cihazları gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu cihazlarla ilgili genel bilgi ilerleyen bölümlerde kısaca verilecek ve tezin son bölümünde modellenerek kullanılacaktır.

Güç kalitesi problemlerine sebep olan olaylar gerilimin genliğinde, dalga formunda ve gerilimin periyodunda değişikliklere sebep olabileceğinden gerilim kalitesi tanımıyla da karşımıza çıkabilir.

Güç kalitesi çok kapsamlı bir konu olduğundan literatürde birçok farklı sınıflandırma söz konusudur. IEEE 1159:1995 standardına göre güç kalitesi problemleri [5];

- Geçici olaylar,
- Uzun süreli değişimler,
- Kısa süreli değişimler,
- Gerilim dengesizliği,
- Dalga formu bozukluğu,
- Gerilim dalgalanmaları,
- Güç frekansı değişimleri olarak sınıflandırılmıştır.

2.1. Geçici Olaylar

Güç sisteminde akım ve gerilimde milisaniyeler içerisinde ortaya çıkan ani değişimler olarak tanımlanabilir. Etki süreleri kısadır ama şiddetleri çok yüksektir. Güç sistemleri için önlem alınması gereken başlıca problemlerden biridir. Enerji dağıtım ya da iletim hattına yıldırım düşmesi, güç sisteminde yapılan anahtarlama olayları örnek olarak gösterilebilir. Salınım biçimindeki geçici olaylar ve darbe biçimindeki geçici olaylar olarak sınıflandırılabilirler.

2.2. Gerilim Dengesizliği

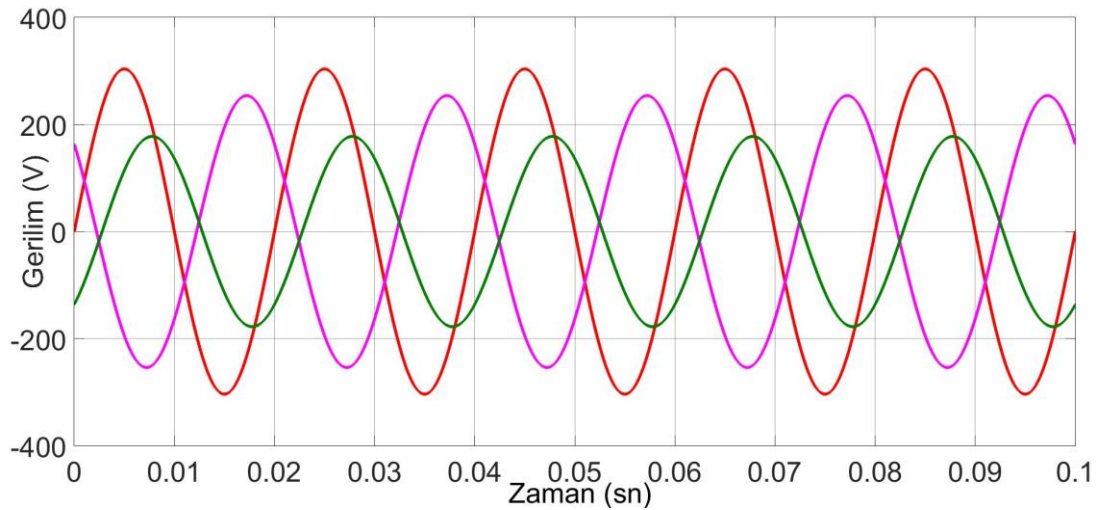
Faz gerilimlerinin genliklerinin birbirlerinden farklı olması veya faz açıları arasında 120° faz farkı olmaması gerilim dengesizliğini oluşturur [6].

Gerilim dengesizliğinin en temel sebebi bir fazlı yüklerin fazlara eşit dağıtılmamasıdır. Enerji müsaadesi verilirken dağıtım şirketleri tarafından tesisin tek hat şeması mevcut onay sürecinde istenmektedir. Ancak daha özenle fazların yük dağılımı incelenmeli ve sözleşme gücü kriteri yanında yüklerin faz dağılımına uygunluğu da özellikle ticari işletmelere sözleşme kriteri olarak eklenmelidir. Dağıtım şirketlerinin enerji kalitesine gösterdiği her türlü titizlik ülkenin enerji verimliliğine katkıda bulunacaktır.

Büyük gerilim dengesizlikleri bazı cihazlarda aşırı ısınmaya sebep olur. Aşırı ısınma cihazlarda verimin düşmesine, hatalı kontrol olaylarına, kalibrasyon sorunlarına ve dielektrik malzemeye sahip cihazların bozulmasına sebep olur [7].

Ülkemiz’de Enerji Piyasası Denetleme Kurulu (EPDK) tarafından 2006 tarihinde yayımlanan Elektrik Piyasasının Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmeliğin 22. Maddesine göre “ölçüm periyodu süresince ölçülen gerilimin negatif bileşeni etkin değerlerinin 10’ar dakikalık ortalamalarının en az %95’inin pozitif bileşenlere oranı en fazla % 2 olmalıdır. Ölçüm periyodu standartta 1 hafta olarak tanımlanmaktadır. Tek fazlı veya iki fazlı yüklerin beslendiği noktalarda bu oran %3’e kadar çıkabilir.” şeklinde gerilim dengesizliğinin ölçümü ve sınırlandırılması açıklanmıştır [2].

Şekil 2.1.’de örnek bir gerilim dengesizliği grafiği görülmektedir.

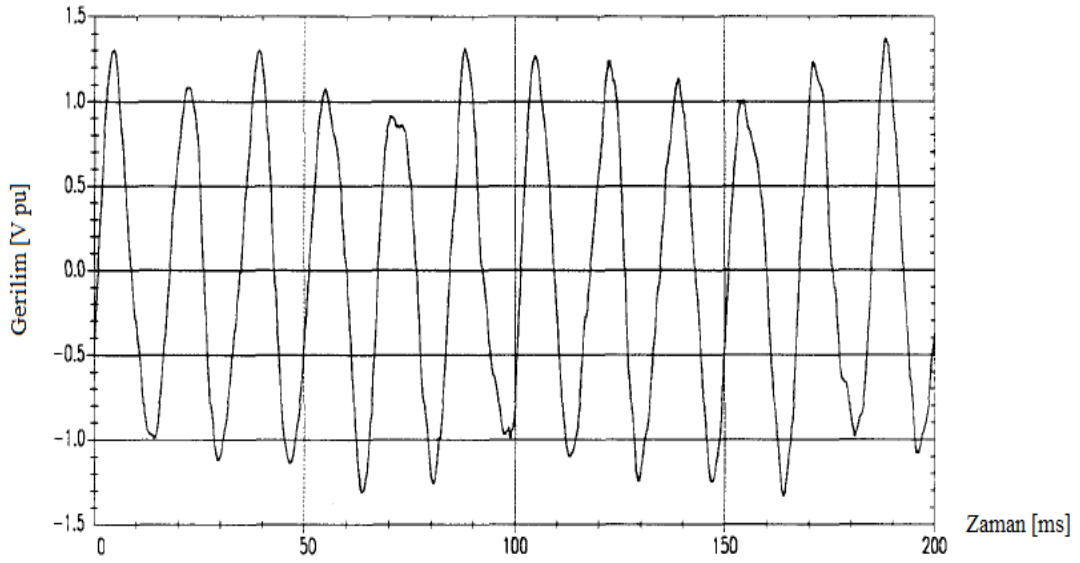


Şekil 2.1. Örnek Gerilim Dengesizliği

2.3. Gerilim Dalgalanmaları

Gerilim dalgalanması literatürde fliker olarak da kullanılmıştır. ANSI C84.1'e göre 0,9 ile 1,1 pu değerleri arasında rastgele veya sistematik gerilim değişimleridir[8].

İletim veya dağıtım sistemlerinde ani yük değişimi oluşturabilecek büyük güçlü asenkron motorlar, ark ocakları gibi yükler gerilim dalgalanması oluşturabilir. Gerilim dalgalanmasına sebep olan bu tür yüklere cevap verme yeteneği hızlı olan reaktif güç sağlayabilen FACTS cihazları ile kompanze edilmesi gerilim dalgalanmasını büyük ölçüde azaltmış olacaktır. Şekil 2.2.'de bir ark fırının neden olduğu gerilim dalgalanması görülmektedir.



Şekil 2.2. Bir Dağıtım Sisteminde Ark Fırınının Neden Olduğu Gerilim Dalgalanması[8]

2.4. Dalga Formu Bozukluğu

Temel frekanstaki dalga şeklinin saf sinüsten uzaklaşması olarak tanımlanabilir. Harmonikler, gürültü, çentik, doğru akım bileşeninin varlığı sinüs dalga formundaki bozulmalar olarak ayrı gruplar halinde incelenebilir.

2.4.1. Harmonikler

Harmonikler, teknolojinin gelişmesine bağlı olarak harmonik üreten cihazların artmasıyla kompanzasyon kadar önemli bir problem olmuş ve neredeyse artık her tüketici grubunda karşılaşılan bir güç kalitesi problemi haline gelmiştir.

Temel bileşen dışında var olan sinüsel dalga şekillerinin hepsi harmonik olarak tanımlanabilir. Ark ocakları, transformatörler, döner makineler, kesintisiz güç kaynakları, elektronik balastlar, statik var kompanzatörler, statcom gibi yarı iletken temelli FACTS cihazları, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen doğru gerilimin alternatif gerilime dönüştürülmesi için kullanılan dönüştürücüler, yaygınlaşan elektrikli araçların şebekeye bağlı olduğu zamanlarda ki etkileri harmonik üretemine sebep olmaktadır.

Enerji Piyasaları Denetleme Kurulu, Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği'nde harmonik sınırlarını belirlemiştir ve bu sınır değerler aşağıda tablo halinde sunulmuştur. Bağlantı sözleşmesine tabi dağıtım şirketleri ya da tüketiciler bu sınır değerleri sağlamakla yükümlüdür. Sınır değerler Tablo 2.1 ve Tablo 2.2.'de verilmiştir [2].

Tablo 2.1. Gerilim harmonikleri için sınır değerler[2]

Tek Harmonikler				Çift Harmonikler	
3'un Katları Olmayanlar		3'un Katları Olanlar			
Harmonik Sırası	Sınır Değer (%)	Harmonik Sırası	Sınır Değer (%)	Harmonik Sırası	Sınır Değer (%)
h		h		h	
5	% 6	3	% 5	2	% 2
7	% 5	9	% 1,5	4	% 1
11	% 3,5	15	% 0,5	6.....24	% 0,5
13	% 3	21	% 0,5		
17	% 2				
19	% 1,5				
23	% 1,5				
25	% 1,5				

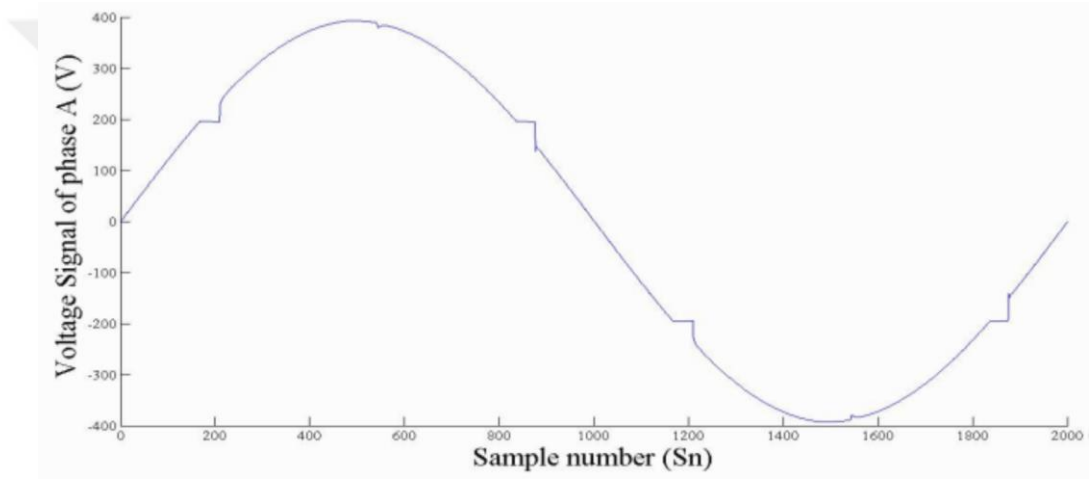
Tablo 2.2. Akım harmonikleri için maksimum yük akımına göre sınır değerler[2]

Tek Harmonikler						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TTB
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Çift harmonikler, kendinden sonraki tek harmonik için tanımlanan değerin %25'i ile sınırlandırılmıştır.

2.4.2. Çentik

Çentikler, her periyotta AC-DC konverterlerde ki komutasyon işlemi nedeniyle oluşan faz-faz kısa devresinin sonucu olarak oluşan periyodik transientlerdir. Bunun periyodik olması demek, bu bozulmanın aynı zamanda gerilim dalga şeklinin harmonik spektrumu tarafından da karakterize edilebilmesi demektir. Buna rağmen, ani anahtarlamalardan kaynaklanan keskin kenarlar aynı zamanda üretim izolasyonunu etkileyen yüksek frekans salınımları içerirler ve yüksek bir elektromanyetik girişiminin artmasına neden olabilirler. Bu etkiler, anahtarlama elemanlarına göre devreler tasarlanarak azaltılabilir [9].



Şekil 2.3. Bir Konvertör Tarafından Meydana Gelen Çentikler[10]

2.4.3. Doğru akım/gerilim bileşeni

Yarı iletken teknolojisinin gelişmesi ile güç elektroniği tabanlı devrelerin kullanılması artmıştır. Güç elektroniği elemanlarının kullanılmasıyla alternatif akım sistemlerinde DC bileşen görülür. Alternatif akım sistemlerinde DC bileşenin varlığı harmoniklerin oluşması, döner makina ve manyetik alan prensibiyle çalışan transformatörlerde verimsiz çalışmaya sebep olur. Ayrıca DC bileşen bağlantı elemanlarında ve topraklama elektrotlarında korozyona sebep olur.

2.4.4. Gürültü

Harmonik distorsiyon veya transiyentler gibi sınıflandırmalara girmeyen her türlü, istenmeyen bozulmalar olarak tanımlanabilir. Kontrol devreleri, ark makinası, anahtarlama güç kaynakları meydana gelmesinde etkili olan elemanlardır.

2.5. Uzun Süreli Gerilim Değişimleri

Gerilimin efektif değerinde 1 dakikadan uzun süren değişimlerdir. IEEE std. 1159-1995'e göre sınıflandırılan uzun süreli gerilim değişimleri ve etki süreleri Tablo 2.3.'de sunulmuştur[5].

Tablo 2.3. Uzun süreli gerilim değişimleri etki süresi ve değişim sınırlarına göre sınıflandırılması

	Etki Süresi	Değişim
Düşük Gerilim	>1 dak	0,8 - 0,9 pu
Aşırı Gerilim	>1 dak	1,1 - 1,2 pu
Kalıcı Kesinti	>1 dak	0,1 pu altına düşmesi

2.6. Kısa Süreli Gerilim Değişimleri

Kısa süreli gerilim değişimleri, ani oluşan olaylar etkisi ile yarım periyotla 1 dakika arasında etki süresine sahip gerilimdeki değişimler olarak tanımlanabilir. IEEE std. 1159-1995'e göre sınıflandırılan kısa süreli gerilim değişimleri ve etki süreleri Tablo 2.4.'de sunulmuştur[5].

Tablo 2.4. Kısa süreli gerilim değişimleri etki süresi ve değişim sınırlarına göre sınıflandırılması

	Etki Süresi	Değişim
Kesinti	0,5 periyot - 1 dk.	0,1 pu altına düşmesi
Gerilim Yükselmesi	0,5 periyot - 1 dk.	1,1 - 1,8 pu
Gerilim Düşümü	0,5 periyot - 1 dk.	0,1 - 0,9 pu

2.6.1. Kesinti

Kesintiler kendi içinde, enerji kalitesi ile ilgili standartlarda belirlenen aralıklara göre farklı alt gruplara ayrılmıştır. En genel tanımıyla gerilimin yarım periyot ile 1 dakika arasında 0,1 pu değeri altına düşmesidir. Dağıtım sistemindeki koruyucu elemanların açması sonucu oluşurlar.

2.6.2. Gerilim yükselmesi

Kısa süreli gerilim yükselmesi, gerilimin efektif değerinin yarım periyotla bir dakika arasında 1,1 - 1,8 pu arasında değişmesidir. Devreye alınan kapasitif yükler, devreden çıkartılan büyük güçlü endüktif ya da rezistif yükler, hattın yakınına yıldırım düşmesi gibi atmosferik olaylar, dağıtım sisteminde oluşacak faz toprak kısa devreleri gerilim yükselmesine sebep olabilir.

2.6.3. Gerilim düşümü

Kısa süreli gerilim düşümü yarım periyot ile 1 dakika arasında gerilimin efektif değerinin 0,1 – 0,9 pu arasında değişmesi olarak tanımlanabilir. Büyük güçlü yüklerin devreye girmesi, başka baralarda meydana gelen kısa devre arızaları gerilim düşümlerine sebep olur.

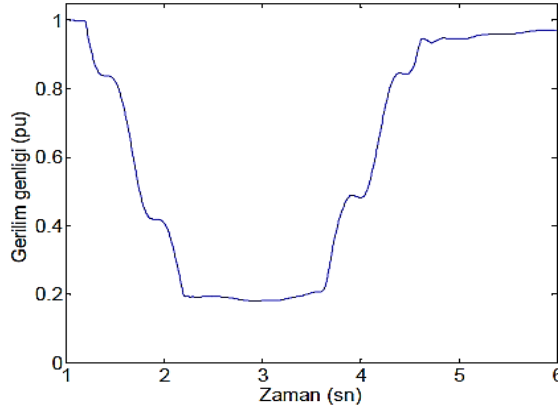
Oluşan gerilim düşümleri genlikleri ve süreleri ile tanımlanırlar. Gerilim azalmaları öncelikle zaman domeninde örneklendirilerek kayıt edilirler ve (2.1.) denkleminde göre gerilim azalmasının efektif değeri bulunur [11].

$$V_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N V_i^2} \quad (2.1)$$

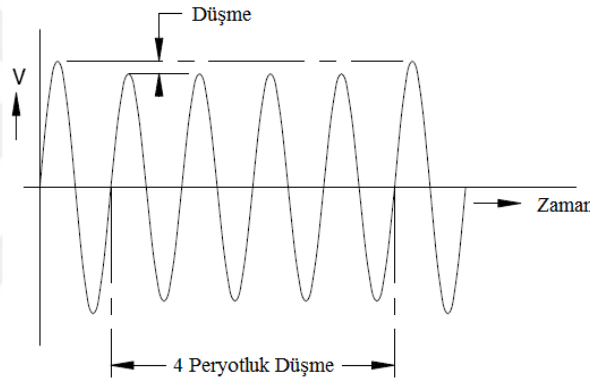
N = Bir periyottaki örnek sayısı

V_i = Örnekleme alınan noktada gerilimin aldığı efektif değer

Denklem 2.1 kullanılarak tam periyot da yapılan, gerilimin efektif değerinin bulunduğu bir örnek Şekil 2.4.'de verilmiştir.



Şekil 2.4. Gerilim azalmasının süresi ve genliğindeki değişim



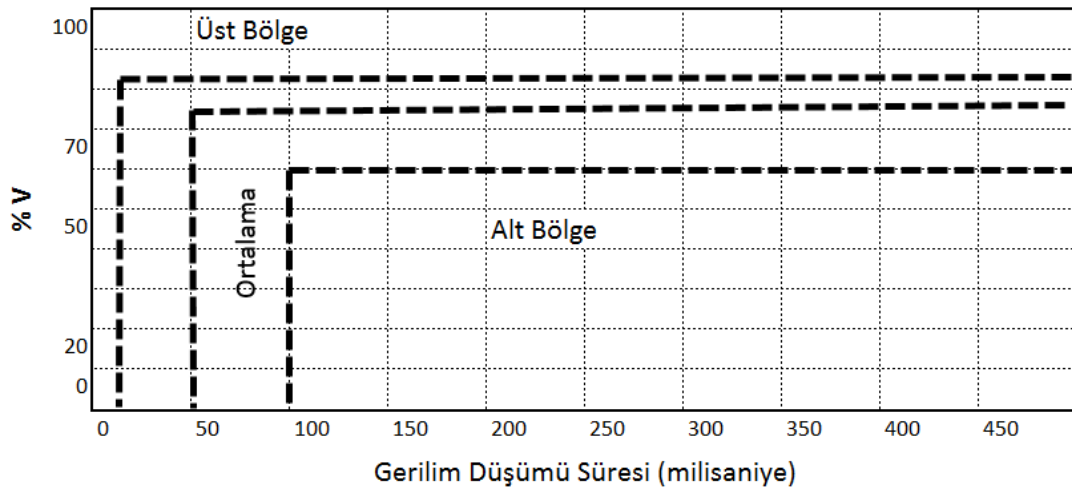
Şekil 2.5. Tipik bir kısa süreli gerilim düşümü[8].

Kısa devre kaynaklı gerilim düşümlerine dağıtım sistemlerinde iletim sistemlerine oranla daha çok rastlanılır. Bunun nedeni iletim sistemlerinin arıza temizleme süresinin kısa olmasıdır. Dağıtım sistemlerinde koruma cihazlarının açma sürelerinin daha uzun olması, kısa devre arızası sebebiyle bu sistemlerin gerilim düşümü problemi açısından daha riskli olması anlamına gelir. Radyal şebekelerde üretici ve tüketici arasında hatta meydana gelecek kısa devre arızası tüketici barasında kesintiye sebep olurken elektriksel olarak radyal şebekeye bağlantısı olan diğer tüketicilerde gerilim düşümü yaşanmaktadır. Bu gerilim düşümlerinin genliğini birçok sistem parametresi etkiler. Dağıtım hattı kesitleri, nominal yük akımları, nominal hat gerilimi, sistemin kısa devre kesme gücü, hata noktasına olan uzaklık gerilim düşümünün genliğini etkileyen sistemin önemli parametreleridir.

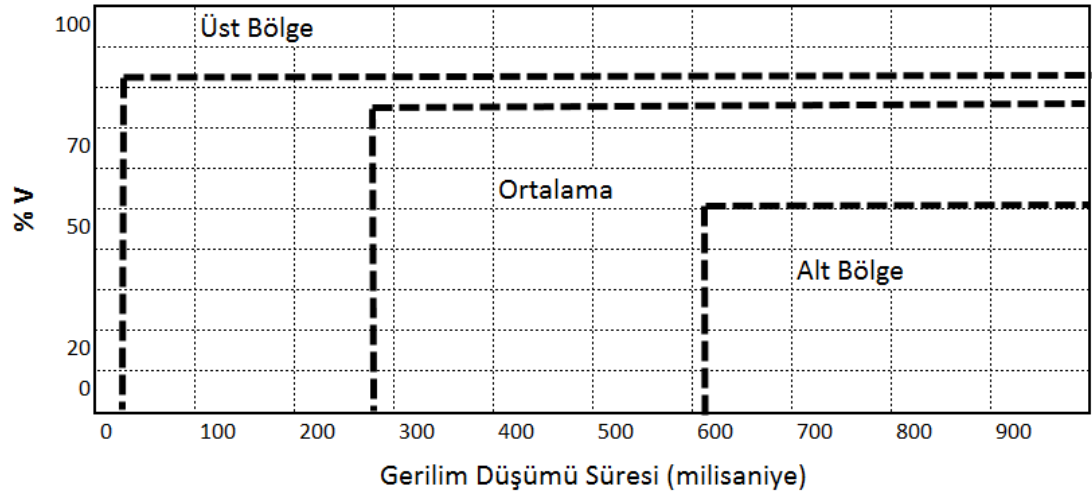
2.7. Kısa Süreli Gerilim Düşümünün Hassas Yüklere Etkisi

Elektrik dağıtım sisteminde meydana gelen bir kısa devre, aşırı yüklenme ya da büyük güçlü motorların devreye girmesi birçok tüketicide gerilim düşümüne sebep olmaktadır. Hata noktasına olan uzaklığa göre düşü seviyesi değişir. Gerilim düşümü güç kalitesi problemlerinden en etkili ve en maliyetli olan problemidir. Hassas yükler (Bilgisayarlar, PLC'ler, hız sürücüleri, kontrol cihazları vb.) gerilim düşümlerinden olumsuz etkilenerek ya çalışmalarında aksamalar olur ya da devre dışı kalabilirler. Kağıt, lastik, tekstil gibi hammadde işlenen endüstride gerilimdeki azalmadan dolayı hassas cihazların etkilenmesi sonucu üretim sisteminde olacak aksamalar düşünüldüğünde çok ciddi maddi kayıplar ortaya çıkabilir.

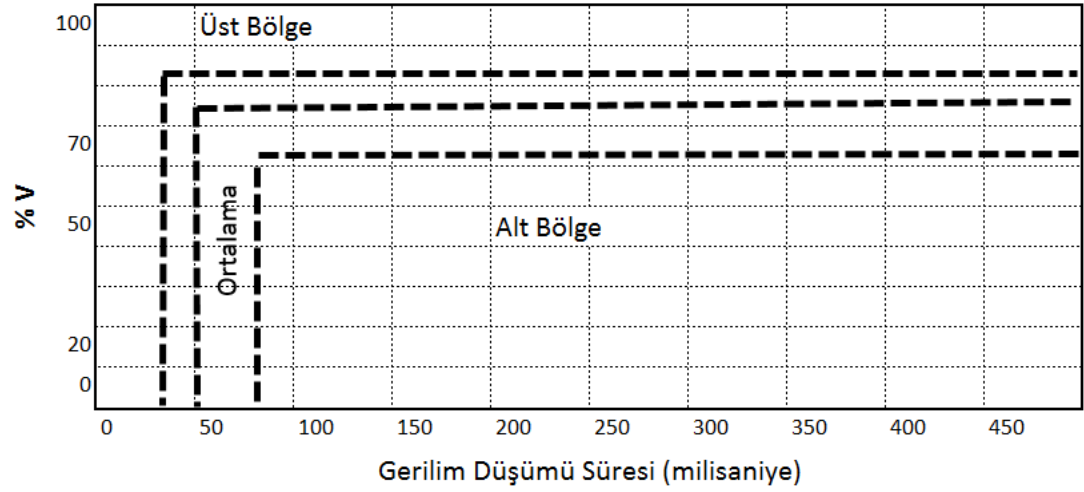
Mikroişlemci tabanlı hassas cihazların çalışabileceği gerilim düşümü sınırları denenerek, uluslararası standart yapıcı kuruluşlar tarafından belirlenmiştir. Bu sınırlar dışında cihazların verimleri değişebileceği gibi ayrıca kontrol dışı davranışlarda bulunma olasılığıyla çalıştırılmaması gerekmektedir. Bu cihazlardan endüstride en çok kullanılan ayarlanabilir hız sürücüleri, programlanabilir lojik denetleyiciler ve kişisel bilgisayarlara ait gerilim düşümü toleransları aşağıdaki şekillerde verilmiştir [12].



Şekil 2.6. Ayarlanabilir hız sürücüleri gerilim düşümü tolerans eğrisi



Şekil 2.7. Programlanabilir lojik denetleyici gerilim düşümü tolerans eğrisi



Şekil 2.8. Kişisel bilgisayarlar gerilim düşümü tolerans eğrisi

BÖLÜM 3. ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ (FACTS)

Günümüzde güç kalitesi problemlerinin çözümüne yönelik yapılan teknolojik gelişmeler yarı iletken temeline dayanmaktadır. Mekanik anahtarlamalı geleneksel güç kalitesi iyileştirici tasarımlar yarı iletken elemanlarla tasarlanan devre yapılarına oranla çok daha yavaş cevap verme sürelerine sahiptir. FACTS cihazları sahip oldukları kontrolörlerinin hassas ve hızlı olması sebebiyle gerilim çökmesi gibi olayları önleyerek geçici hal ve dinamik kararlılığı iyileştirebilme yeteneğine sahip olması bakımından çok daha avantajlıdır.

Reaktif güç kompanzasyonu büyük kapasiteli endüstriyel yükler için önemli problemlerden biridir. Dengesiz yüklenme sebebiyle güç kalitesinde ve enerji verimliliğinde birçok problemle karşılaşıldığından önceki bölümde bahsetmiştik. Fazların ayrı ayrı kontrol edilebilme özelliği ile FACTS cihazları dengesiz yüklenmenin önüne geçebilecek yapıdadır. Esnek alternatif akım iletim sistemleri yarı iletken temelli olduğu için ihtiyaca göre tasarlanabilecek kontrol devreleri sayesinde hassasiyetleri artırılabilir. Geleneksel yapıların yerini hızla alan ve gelişimine devam eden bu modern cihazların tanımında ki esnek ifadesi kontrol devrelerinin kapsamlı olabileceğinden gelmektedir.

Yarı iletken teknolojisinin gelişmesi ile enerji sistemlerindeki uygulamalarda standartlaşmanın oluşması ve FACTS cihazlarının tasarımında ortak reaksiyon sağlamak için 1980'lerden bugüne Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Institute) ve CIGRE (Conference Internationale des Grands Reseaux Electriques) olmak üzere birçok kuruluş çalışmalar yapmaktadır.

FACTS cihazlarını, geleneksel tristör tabanlı kontrolör ve gelişmiş konverter tabanlı kontrolör olarak ayırmak mümkündür. Tristör tabanlı kontrolörlerin anahtarlama ve kontrol düzenleri tristörler kullanılarak dizayn edilir. Tristör tabanlı cihazlar tasarım olarak geleneksel mekanik anahtarlama cihazlara benzerler ancak onlara göre çok daha hızlıdır [13].

Gelişmiş FACTS cihazları ise senkron gerilim kaynağı prensibine göre çalışan anahtarlama konverterler GTO gibi kendinden denetimli yarı iletken elemanlar kullanır. Konverter tabanlı cihazlar, geleneksel tristör tabanlı FACTS cihazları ile karşılaştırıldıklarında gerilim, hat empedansı ve faz açısı kontrolü için tekdüze uygulanabilme ve üstün performans karakteristikleri sağlarlar. Senkron gerilim kaynağı prensibinde, konverter eğer yeterli büyüklükte bir enerji depolama cihazı ile desteklenirse AC sisteme aktif ve reaktif güç sağlama kabiliyetine sahiptir [14,15].

Tristör tabanlı cihazlar;

- TCR (Tristör Kontrollü Reaktör)
- TSC (Tristör Anahtarlama Kapasitör)
- TSR (Tristör Anahtarlama Reaktör)
- TCSC (Tristör Kontrollü Seri Kapasitör)
- TCSVC (Tristör Kontrollü Statik VAr Kompanzatör)

Konverter tabanlı cihazlar;

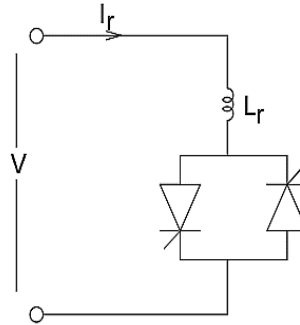
- SSSC (Statik Senkron Seri Kompanzatör)
- UPFC (Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü)
- STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör)

Gerilim sarkması gerilim yükselmesi gibi ani olayların dağıtım ve iletim sistemlerine zarar vermemesi endüstriyel tüketicilerin maddi kayıplarının önlenmesi enerji verimliliğinin sağlanması için Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM) gibi konverter tabanlı FACTS cihazlarının en gelişmiş olanları kullanılır.

FACTS sistemleri, mevcut ve yeni planlanan enerji sistemlerinin kalite ve güvenilirliğini esnek kontrol yapılarıyla arttırmaları en büyük avantajlarındandır. Ancak ilk yatırım maliyetlerinin fazla olması, tasarım, bakım ve onarımda deneyimli personel ihtiyacı, yarı iletken elemanların kontrol sistemlerinde kayıplara, harmonik, çentik gibi akım ile gerilimin dalga formunda sebep olabilecek bozulmalara karşı ek tertibat ve kontrol devrelerine ihtiyaç duymaları da dezavantaj olarak değerlendirilebilir.

3.1. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)

Tristör kontrollü reaktörün eşdeğer devresi Şekil 3.1.'de verilmiştir. Temel yapısında paralel ve ters bağlı iki tristör ile bunlara seri bağlı reaktörden oluşur. Tristörler uçlarındaki gerilimin sıfır geçiş anından itibaren ölçülen tetikleme açısına ya da iletim açısına bağlı olarak yarım periyotluk sürelerle tetikleme açısının 90° eşit olmasıyla iletimde olurlar. Bu durumda akım reaktif karakterde ve sinüsoidaldir. Tetikleme derecesinin 90° ile 180° arasında kısmi iletim söz konusudur. Tetikleme açılarının 0 ile 90° değerleri arasında olması durumunda doğru akım bileşenli asimetrik akımlar meydana geleceğinden bu arada işletimine pratikte müsaade edilemez [16].



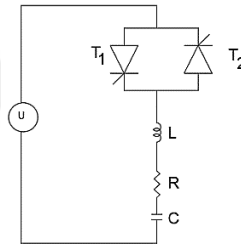
Şekil 3.1. Tristör Kontrollü Reaktör Eşdeğer Devresi

Tristör Kontrollü Reaktör (TCR), tristör tabanlı cihazların temel tiplerindendir. Güç sistemlerinde kullanımının birçok avantajı vardır. Ancak işletilmesi sırasında bağlı bulunduğu sistemde harmonik oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durumda göz önünde bulundurulmalıdır [17].

Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) , Tristör Anahtarlamaalı Kapasitör (TSC) ile birlikte kullanıldığında daha hızlı sonuç verir. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) devrelerinde kullanılan tristörler sadece gerilimin tepe değeriinde değil istenilen herhangi bir çalışma noktasında iletme geçirilebilir. Tristörlerin tetikleme açıları için ölçüm sürekli ve gerektiği kadar kısa sürelerde tasarlanan devrelerle alınabilir [18].

3.2. Tristör Anahtarlamaalı Kapasitör (TSC)

Şekil 3.2.'de eşdeğer devre yapısı verilen Tristör Anahtarlamaalı Kapasitör (TSC) alternatif akım kıyıcı ve seri bağılı kapasitörden meydana gelir. Paralel bağılı tristörlerin iletme ve kesime geçme aralıklarının kontrolü ile kapasitör etkin reaktansı adımli olarak değiştirilir. Kapasiteleri birbirine eşdeğer birden çok Tristör Anahtarlamaalı Kapasitör (TSC) aynı noktaya paralel bağlanarak, reaktif güç talebine göre tetikleme sinyalleri kontrolü sağlanıp istenilen sayıda TSC devreye alınabilir [19,20].



Şekil 3.2. TSC eşdeğer devresi

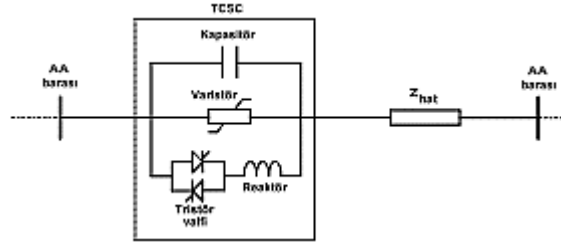
3.3. Tristör Anahtarlamaalı Reaktör (TSR)

Tristör Anahtarlamaalı Reaktör (TSR), reaktif güç tüketen bir tristör tabanlı kompanzatördür. Reaktör elemanları gerilimin tepe değeriinde devreye alınıp çıkartılarak aşırı gerilim ve geçici olaylara sebep olmaları engellenir. Tristör Anahtarlamaalı Reaktör (TSR) yapısında sadece alternans başlarında ($\pm 90^\circ$) tetikleme yapıldığından harmonik üretimi yapmamaktadırlar [19,21].

Üç fazlı uygulamalarda TSR cihazı üçgen olarak bağlanmaktadır [22].

3.4. Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)

Şekil 3.3.'de devre yapısı verilen Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC), Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) devresine paralel bağlı bir kapasitörün eklenmesinden oluşur. Tristör Kontrollü Reaktöre (TCR) paralel bağlanan varistör arıza sebebiyle oluşacak aşırı gerilimlere karşı Tristör Kontrollü Seri Kapasitörün (TCSC) korunmasını sağlar. Varistör metal oksitten yapılmış doğrusal olmayan bir direnç yapısındadır. Tristör tetikleme açısı uygun değerde seçilerek, kapasitif ya da endüktif olarak bağlı bulunduğu sistemin reaktans değerleri ayarlanabilir. Alternatif akım sistemlerinde, kararlılığın iyileştirilmesinde kullanılır [23].

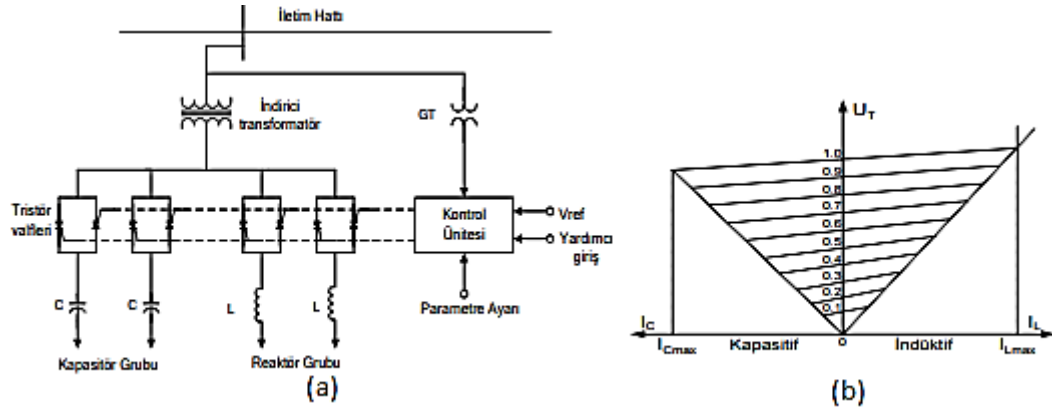


Şekil 3.3. Tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC) eşdeğer devresi

3.5. Tristör Kontrollü Statik Var Kapasitör (TCSVC)

Şekil 3.4.'de devre yapısı verilen Tristör Kontrollü Statik Var Kapasitör (TCSVC), 1970 yıllarda ilk olarak ark fırını kompanzasyonu için uygulanmış bir Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) cihazıdır. Şekilde görüldüğü gibi Tristör Anahtarlamalı Kapasitör (TSC) ve Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) yapılarını içerir. Yapısındaki reaktör ya da kapasitörleri sistemin ihtiyacına göre devreye alarak ya da devreden çıkartarak sistemin ihtiyacı olan reaktif güç ihtiyacını karşılar.

TCSVC bağlı bulunduğu barada gerilimi ayarlamak için ve sistemdeki geçici ve dinamik kararlılığı sağlamak içinde kullanılır [24]. Şekil 3.4.'de TCSVC nin yapısı ve VI karakteristiği görülmektedir [25, 26].



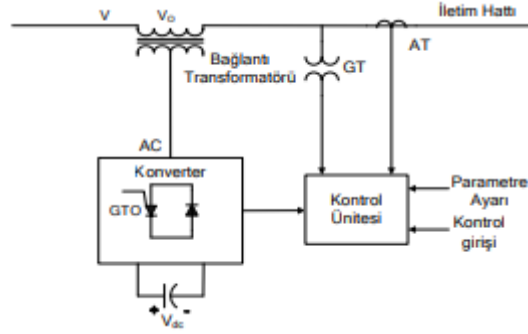
Şekil 3.4. TCSVC nin (a) Yapısı ve (b) VI karakteristiği[25]

3.6. Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC)

Statik Senkron Seri Kompanzatör konverter tabanlı Esnek Alternatif Akım İletim Sistemlerindendir. Literatürde Dinamik Gerilim İyileştirici (DVR) olarak da isimlendirilir. Şekil 3.5.'de görüldüğü gibi enerji iletim hattına seri bağlanır. Statik Senkron Seri Kompanzatör faz açısının ve genliğinin ayarlanabildiği üç fazlı gerilim üretir ve bu ürettiği gerilimi sisteme seri bağlı olarak enjekte eder. Bağlı bulunduğu barada nominal gerilimi sağlamak için ani olarak meydana gelen gerilim düşümü, gerilim yükselmesi gibi durumları önlemek için kullanılır.

Güç sisteminde gerilim düşmeleri çoğunlukla kısa devre arızaları ve büyük güçte ki yüklerin devreye alınması sırasında oluşan kalkış akımlarından dolayı oluşur [27].

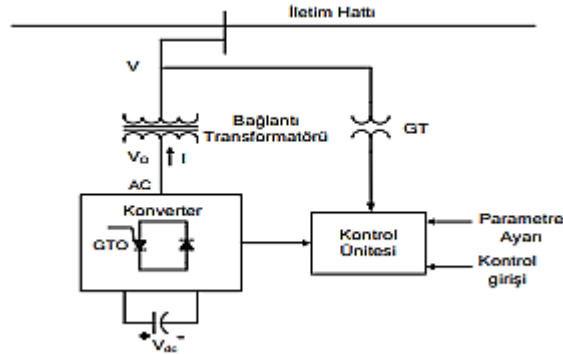
Tasarlanan kontrol devreleri sayesinde bağlı bulundukları sistemden alacakları örnekleme sinyallerini işleyerek sisteme endüktif veya kapasitif güç sağlarlar. Devre yapısında bulunan kapasitör sayesinde enerji depolama ve reaktif güç kontrol etme kabiliyetine sahiptir. Kapasitör yeterli büyüklükte ise kapasitesi oranında sisteme aktif güç de sağlayabilir.



Şekil 3.5. Statik senkron seri kompanzatör (SSSC) eşdeğer devresi[25]

3.7. Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)

Güç kalitesi problemleri iletim ve dağıtım sistemlerinin kapasitesini etkilediğinden ve gerilim kararlılığının tüketiciler açısından öneminden önceki bölümlerde bahsetmiştik. Sisteme giren büyük güçlü yükler, kısa devre arızaları, sistemde bulunan reaktif güçteki ani değişimler uzaklıklarına göre meydana gelen bara ve elektriksel olarak bağlantısı bulunan diğer baralarda gerilim düşümüne sebep olur. Gerilim düşümü seviyesi hassas cihazların tolerans değerleri dışına çıktığında, cihazlar ve sistem zarar görebilir. Bu problemlere karşı önlem almak için konverter tabanlı Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi cihazlarından olan Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM) kullanılır.

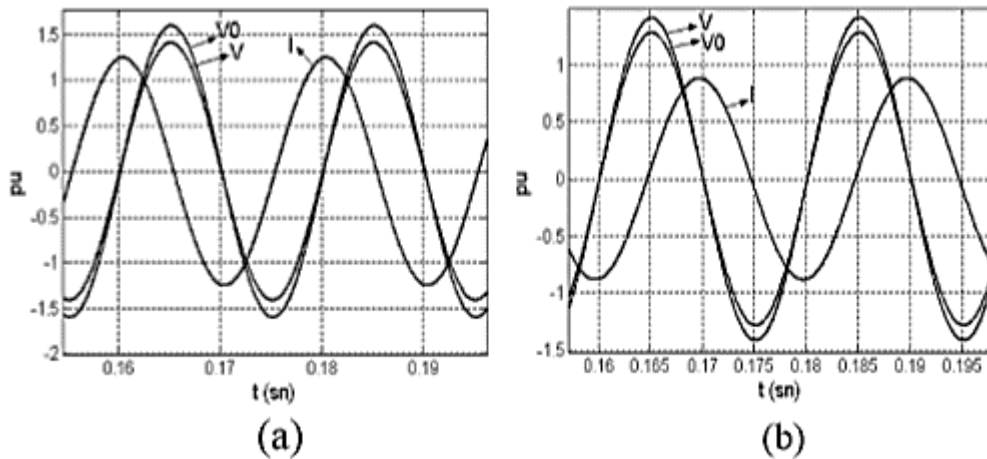


Şekil 3.6. STATCOM devre yapısı[25]

Şekil 3.6.'da STATCOM devre yapısı görülmektedir. Devre yapısından da görüldüğü gibi STATCOM sisteme paralel bağlı bağlantı transformatörü, konverter ve DC kapasitörden oluşur. Konverter için gerekli olan DC gerilimi sağlamak için devrede

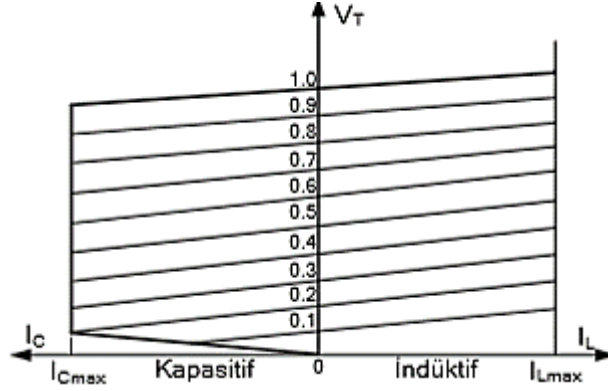
kapasitör kullanılmaktadır. Kapasitörün şarj veya deşarj olması sistem gerilimi ile STATCOM çıkış gerilimi arasındaki faz farkına bağlı olarak gerçekleşir. Sürekli durumda AC sistem gerilimi konverter çıkış geriliminden ileri fazda tutularak transformatör ve konverter kayıplarını sistemden çekilen aktif gücün karşılamışı sağlanır [28].

STATCOM çıkış geriliminin genliği (V_0), sistem gerilimi genliğinden (V) büyük ise I akımı transformatör reaktansı (X) üzerinden STATCOM cihazından AC sisteme doğru akar. Böylelikle STATCOM, AC sistem için reaktif güç üretmiş olur. Bu durumda I akımı sistem geriliminden 90° ileridedir, cihaz kapasitif çalışmış olur. Kapasitif çalışmaya ait gerilim ve akım grafikleri Şekil 3.7(a) 'da verilmiştir. STATCOM çıkış geriliminin genliği (V_0), sistem gerilimi genliğinden (V) küçük ise I akımı transformatör reaktansı (X) üzerinden AC sistemden STATCOM cihazına doğru akar. Böylelikle STATCOM, AC sistemden reaktif güç tüketmiş olur. Bu durumda I akımı sistem geriliminden 90° geridedir, cihaz endüktif çalışmış olur. Endüktif çalışmaya ait gerilim ve akım grafikleri Şekil 3.7 (b) 'de verilmiştir. STATCOM çıkış geriliminin genliği (V_0), sistem gerilimi genliği (V) ile eşit ise cihaz ve AC sistem arasında reaktif güç alış veriş olmaz [26,29].



Şekil 3.7 (a).STATCOM çıkış akımı iletim hattı geriliminden 90° ileride.(Kapasitif)

(b).STATCOM çıkış akımı iletim hattı geriliminden 90° geride. (Endüktif)[25]



Şekil 3.8. STATCOM V-I karakteristiği[25]

Şekil 3.8.'de STATCOM V-I karakteristiği verilmiştir. Şekil 3.4.'de verilen TCSVC 'nin V-I karakteristiği ile karşılaştırıldığında, STATCOM 'un akım sağlama kapasitesinin daha üstün olduğu görülmektedir. Şekilde görülen V-I karakteristiğine göre STATCOM herhangi bir sistem geriliminde maksimum endüktif ya da maksimum reaktif güç sağlayabilecek yapıdadır [19].

STATCOM un bu özelliği sistemde meydana gelecek hatalarda gerilim kararlılığını sağlayabileceğini gösterir.

STATCOM hem dağıtım sistemlerinde hem iletim sistemlerinde kullanılan bir FACTS cihazıdır. Dağıtım sistemlerinde kullanıldığında D-STATCOM olarak adlandırılır. Geniş bir çıkış gerilim aralığına sahiptirler [25].

Şekil 3.6.'da verilen STATCOM devre yapısına göre cihazın çalışma durumunda çıkış akımı denklem 1' de, sistem ile cihaz arasında güç alışverişi yapıldığında sistemden çekilen veya sisteme verilen reaktif güç denklem 2' de, aktif gücün ifadesi ise denklem 3' de verilmiştir [26].

$$I = \frac{(V_0 - V)}{X} \quad (3.1)$$

$$Q = \frac{V \cdot (V_0 \cdot \cos\alpha - V)}{X} \quad (3.2)$$

$$P = \frac{V \cdot V_0}{X} \cdot \sin\alpha \quad (3.3)$$

STATCOM cihazının iletim ya da dağıtım sisteminde bağlı bulunduğu barada üreteceği ya da tüketeceği gücü kontrol etmek için evirici çıkışındaki gerilimin (V_0) kontrol edilmesi gerekir. STATCOM çıkış gücünü kontrol etmenin bir diğer yoluda DC gerilimi sabit tutarak modülasyon indeksinin değiştirilmesi ile olur.

Modülasyon indeksi hesaplamalarda $0 < m_a < 1$ aralığında seçilirse m_{aend} ve m_{acap} değerlerinin aritmetik ortalaması olacak şekilde belirlenir.

$$m_a = \frac{m_{acap} + m_{aend}}{2} \quad (3.4)$$

$$m_{aend} < m_a < m_{acap}$$

$$m_a = 0,74 \text{ alınırsa} \quad 0.66 < 0.74 < 0.82 \text{ alınabilir.}$$

İstenilen güç değerine ulaşana kadar modülasyon indeksi değiştirilerek bulunur.

STATCOM DC gerilimi modülasyon indeksine bağlı olarak şu şekilde bulunabilir;

$$V_{dc} = \frac{V_{ef}}{m_a} \cdot 2 \quad (3.5)$$

$$V_{ef} = \frac{V_s}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \quad (3.6)$$

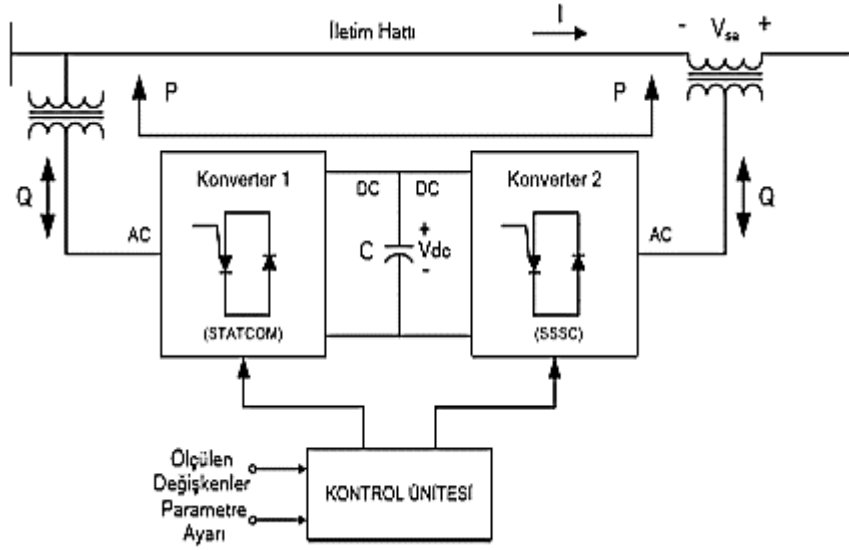
V_{dc} = STATCOM DC gerilimi

V_{ef} = Efektif hat gerilimi

m_a = Modülasyon indeksi

3.8. Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (UPFC)

Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM) ve Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC) cihazlarının birleşimiyle oluşturulmuş çok yönlü bir Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) cihazıdır. 1991’lerde Laszlo Gyugyi tarafından alternatif akım sistemlerinin kompanzasyonunu sağlamak için önerilmiştir. Yapısındaki STATCOM ve SSSC ortak DC kapasitörden beslenir.



Şekil 3.9. Birleştirilmiş güç akış kontrolörü (UPFC)'nin devre yapısı[25]

UPFC, gerilim kararlılığı ve güç kalitesi iyileştirmek için yapısında birbirinden bağımsız birçok denetim elemanı bulundurur. Bağlı bulunduğu sistemde reaktif güç kompanzasyonu, yapısında bulunan enerji depolama elemanın kapasitesine göre aktif güç denetimi, gerilim regülasyonu sağlama kabiliyetine sahiptir.

BÖLÜM 4. ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİNDE (FACTS) KULLANILAN EVİRİCİLER VE KONTROLÖRLER

Eviriciler, DC kaynaktan elde edilen gerilimi, belirlenen tetikleme açılarının etkisiyle hedeflenen frekansta, genlikte ve faz açısında sinüsoidal forma dönüştüren güç elektroniği tabanlı devre yapılarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları, kesintisiz güç kaynakları, FACTS cihazları, çeşitli sürücü devreleri, doğru akım iletim sistemlerinde sıkça kullanılırlar. Kullanım alanı ve amacına göre doğru gerilim, doğrudan şebekeden ya da şarj edilmiş devre elemanından elde edilebilir.

Eviricilerin tasarımında yarı iletken teknolojisinden yararlanılır. Genel olarak kapıdan söndürmeli tristör (GTO), kapı devresi ile söndürülen tristör (IGCT), yalıtılmış kapılı iki kutuplu transistör (IGBT), metal oksit yarı iletkenli alan etkili transistör (MOSFET), transistör, tristör gibi yarı iletkenler kullanılır. Düşük güçlü uygulamalarda, transistör ve MOSFET kullanılırken daha büyük güçlü uygulamalarda tristör, GTO, IGBT, IGCT kullanılır [30].

Eviriciler gerilim kaynaklı eviriciler ve akım kaynaklı eviriciler olarak iki ayrı grupta incelenebilir. Akım kaynaklı eviricide DC tarafta endüktans elemanı bulunurken gerilim kaynaklı eviricide DC tarafta kondansatör elemanı bulunur. En temel eviriciler iki seviyeli eviricilerdir ihtiyaca göre çok seviyeli eviriciler tasarlanmıştır. Çok seviyeli eviriciler kendi içerisinde diyot kenetlemeli eviriciler, kapasitör kenetlemeli eviriciler ve kaskat eviriciler olarak gruplandırılır [30]. Bunların dışında modüler çok seviyeli eviricilerde mevcuttur [31].

4.1. Gerilim beslemeli eviriciler

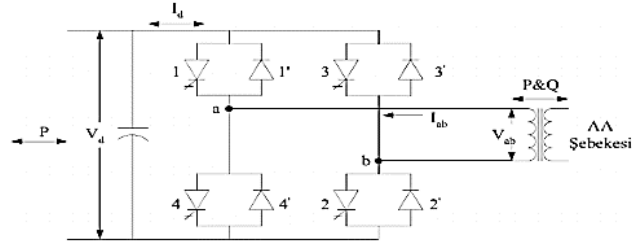
Gerilim beslemeli eviricilerde kaynak olarak gerilim kaynağı kullanılır ve çıkışta gerilim üretilir. Gerilim beslemeli dönüştürücülerde doğru gerilim bir polariteye bağlıdır gücün ters dönüşü doğru akımın ters dönüşü ile sağlanır. Bu nedenle gerilim beslemeli dönüştürücülerde tek yönlü gerilim tutma kapasiteli yarı iletken anahtarlar kullanılır. Akım beslemeli dönüştürücülere göre performanslarında olan üstünlük ve maliyetinden kaynaklı avantaj sebebiyle FACTS uygulamalarında daha çok tercih edilir [32].

DC gerilim değerinin genliği değiştirilerek çıkıştaki alternatif gerilimin genliği değiştirilir. Üç fazlı gerilim kaynaklı eviriciler 6 adet yarı iletken elemandan oluşur. Gerilim beslemeli eviricilerde DC akım iki yönde de aktığından evirici iki yönlü akım geçirecek yapıda olmalıdır. Geri besleme diyodu yük akımı yön değiştirdiği zaman denetimli anahtarları korumak için paralel bağlanır. Gerilim beslemeli dönüştürücülerde gerilim yön değiştirmedeği için yarı iletkenler hep ileri yönde kalırlar. 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 [33].

4.1.1. Tek fazlı gerilim beslemeli dönüştürücüler

Esnek Alternatif Akım İletim Sistemlerinde genellikle üç fazlı gerilim beslemeli dönüştürücüler kullanılmasına rağmen dönüştürücülerin temel tipi olan bir fazlı gerilim beslemeli dönüştürücülerin çalışma prensibinin anlaşılması önemlidir. Temel yapısı Şekil 4.1.'de verilen tek fazlı tam dalga dönüştürücüde, akım alternatif akımdan

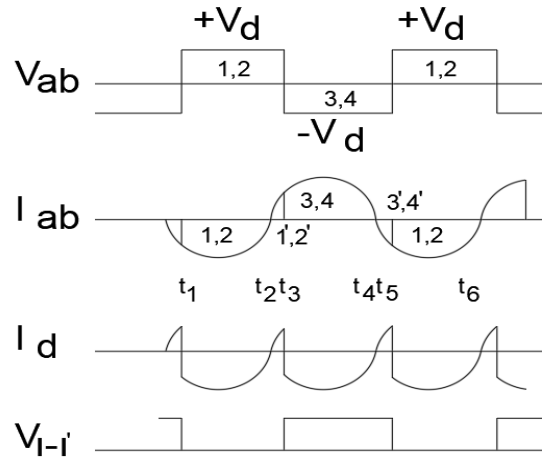
doğru akım tarafına akıyorsa doğrultucu, doğru akım tarafından alternatif akım tarafına akıyorsa evirici olarak düşünülür.



Şekil 4.1. Bir fazlı evirici yapısı

Şekil 4.1.'de verilen bir fazlı evirici yapısı 4 anahtarlama elemanı ile kondansatör ve şebekeye bağlantı için transformatörden oluşur.

1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları ilettime sokulursa 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 bu defa V_{ab} gerilimi $-V_d$ olur. Oluşan alternatif gerilim, alternatif akımın genliği, dalga şekli ve faz açısından bağımsız meydana gelir [34].



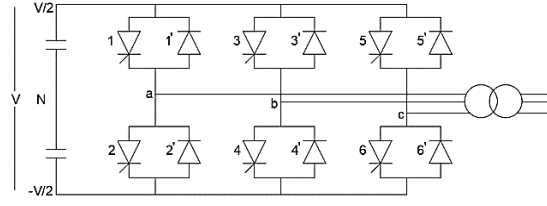
Şekil 4.2. Tek fazlı tam dalga dönüştürücü akım ve gerilim dalga şekilleri

- 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.

Devrede anahtarlama elemanları sıralı olarak açılıp kapatıldığında alternatif gerilimin şekli bir kare dalga olur.

4.1.2. Üç fazlı gerilim beslemeli dönüştürücüler

Şekil 4.3.'de üç fazlı iki seviyeli verilen dönüştürücüde 6 adet denetim anahtarlama eleman ve bunlara paralel bağlı 6 adet diyot bulunur. Diyotların devrede ki kullanım amacı, endüktif yük akımında kesime geçen denetimli anahtarlama elemanlarının üzerinden akımın geçmemesidir. Üç-fazlı evirici, her birinin çıkışı 120° kaydırılmış, üç adet tek-fazlı evirici olarak düşünülebilir. Her faz bacağına çıkışında (a, b, c noktalarında) alternatif kare dalga oluşur. N noktasından ve herhangi bir faz bacağından alınan gerilim tek faz gerilimini verir. Her bir faz bacağındaki elemanlar toplam 180° iletimde kalır.

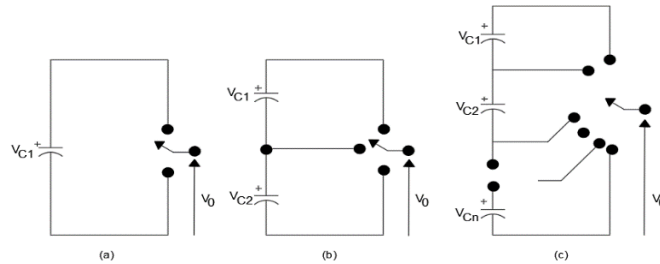


Şekil 4.3. Üç fazlı gerilim beslemeli dönüştürücü

Her bir yarı iletken elemanının iletme ve kesime girme zamanı evirici çıkışında elde edilmek istenen dalga formuna göre kontrol edilerek uygulanmalıdır. Kontrol sinyali kare veya PWM gerilim olabilir. Genellikle eviricilerde Sinüsoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SPWM) tekniği kullanılır. Sinüsoidal Darbe Genişlik Modülasyonunda (SPWM) referans sinüsoidal sinyali daha yüksek frekanslı üçgen taşıyıcı testere dalga ile karşılaştırarak üretir. Referans sinyalin frekansı, eviricinin çıkış gerilimi frekansını belirler, referans sinyalin tepe değeri, ortalama çıkış gerilimini kontrol eder ve her yarı periyotta ki darbe sayısı P , taşıyıcı frekansı tarafından belirlenir.

4.2. Çok Seviyeli Eviriciler

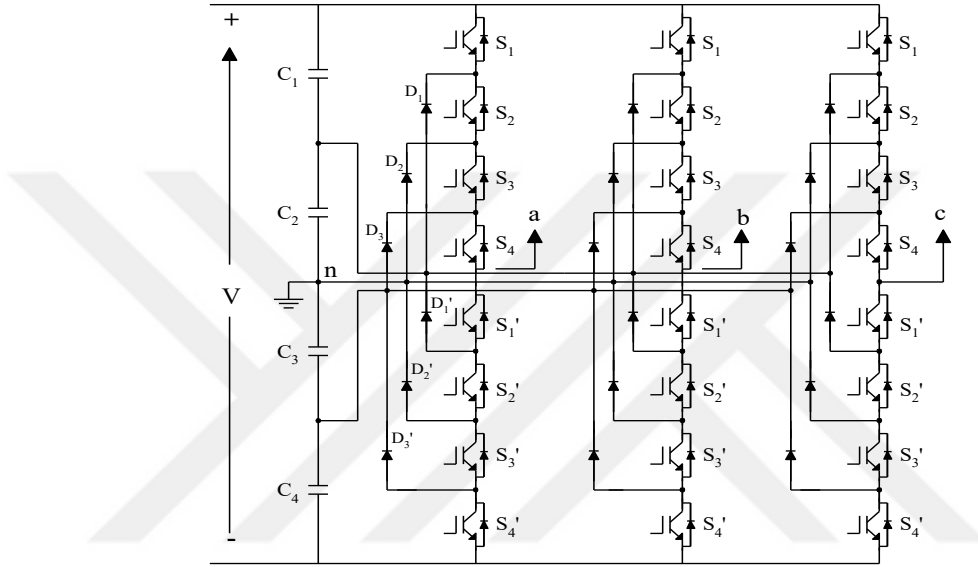
Yüksek güçlü uygulamalarda tercih edilen evirici tipidir. Girişlerine uygulanan DC gerilimden sinüsoidal dalga şekline benzeyen alternatif gerilim elde ederler. Çıkışlarında düşük harmonik bozulum oluştururlar. Şekil 4.4.'de ideal anahtarlara sahip iki seviyeli ve çok seviyeli eviricinin bir fazı verilmiştir. İki seviyeli evirici kondansatörün negatif ucuna göre iki farklı çıkış verirken, üç seviyeli evirici üç farklı çıkış verebilmektedir. Çok seviyeli evirici üç seviyeliden itibaren başlar [35].



Şekil 4.4.a) İki Seviyeli Evirici b)Üç Seviyeli Evirici c) n Seviyeli Evirici

4.2.1. Diyot kenetlemeli eviriciler

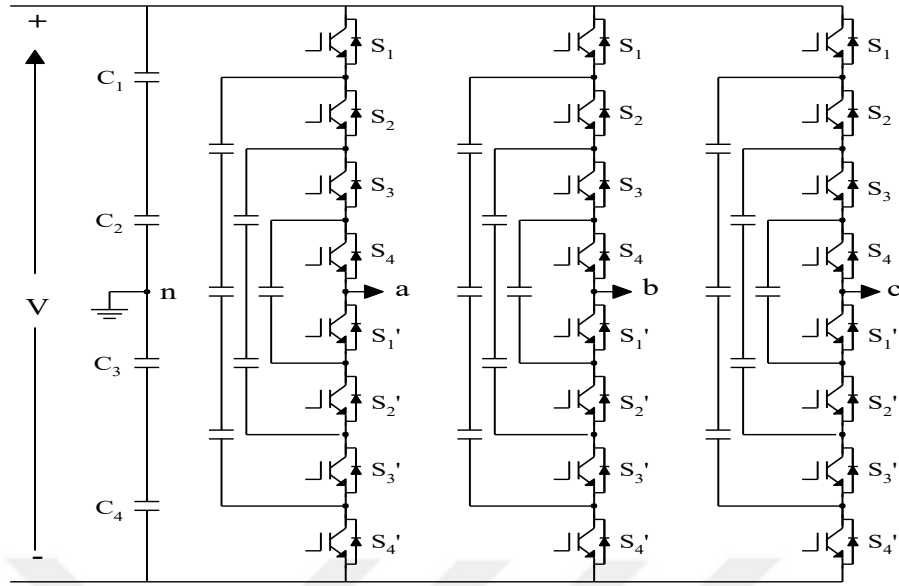
Şekil 4.5.'de temel yapısı verilen diyot kenetlemeli eviricide giriş gerilimi, birbirine seri bağlı kapasitörler arasından alınarak farklı seviyelere bölünebilir. Eğer seviye sayısı yeteri kadar yüksek olursa toplam harmonik bozunum az olur. Anahtarların tamamı temel bileşen frekansında anahtarlandığı için evirici verimi yüksek olur. Çıkış voltajı sınırlıdır [36].



Şekil 4.5. Beş seviyeli üç faz DKE'nin devre yapısı [36].

4.2.2. Kapasitör kenetlemeli evirici

Kapasitör kenetlemeli eviricinin diyot kenetlemeli eviriciden farkı kenetleme elemanı olarak kapasitör kullanılmasıdır. Şekil 4.6.'da kapasitör kenetlemeli eviriciye ait tek faz eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 4.6. Beş seviyeli üç faz kapasitör kenetlemeli evirici 'nin devre yapısı [36].

Kapasitör kenetlemeli eviricinin çıkış gerilim seviyesi kapasitör değerlerinin toplamı ve anahtarlama elemanlarının durumlarına göre belirlenir [37,38].

Kapasitör kenetlemeli çok seviyeli eviricide kondansatörler, üzerlerindeki gerilim seviyesi farklı olması için merdiven şeklinde sıralanırlar. Seviye sayısı k olan bir çıkış üretebilmek için $k-1$ adet kondansatör kullanılır ve $(k-1).(k-2)/2$ adet yardımcı kondansatör gereklidir. Her fazın yapısı aynıdır ve DC bara kondansatörleri tüm fazlar için ortaktır [39,40].

Diyot kenetlemeli evirici de olduğu gibi kapasitör kenetlemeli eviricinin seviyesi yüksek olursa harmonik bozunumu düşük olur [36].

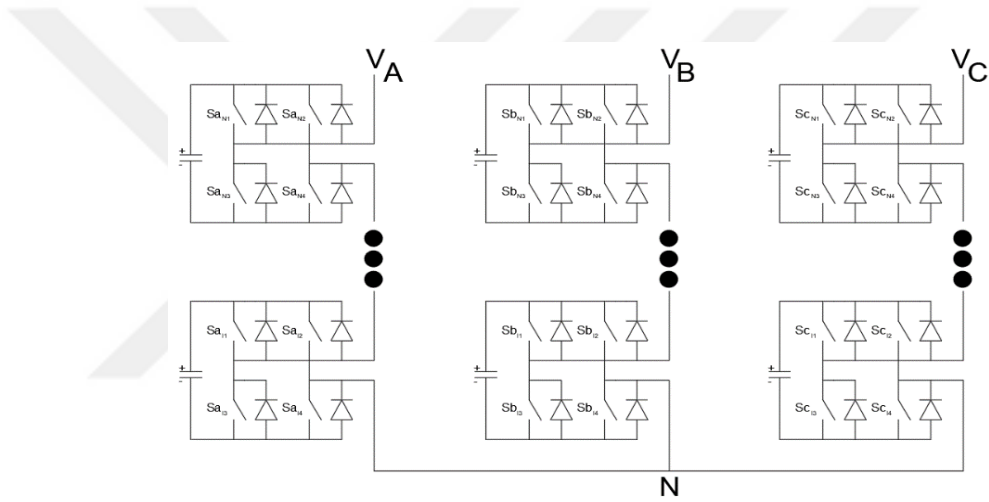
4.2.3. Çok seviyeli kaskat evirici

Çok seviyeli eviriciler içerisinde en az devre elemanı ile tasarlanan eviricilerdir. AC güç kaynaklarında, iletim ve dağıtım sistemlerinin kompanzasyonunda kullanılmaktadır. Çok seviyeli kaskat eviriciler birbirleriyle seri bağlanabilen, ayrı denetlenebilen H- köprüleri ve çıkış gerilim seviyelerini belirleyen DC kaynak oranlarına sahiptir. Faz bacaklarındaki H-köprü evirici miktarlarının artmasıyla evirici

çıkışındaki güç ve gerilim seviyesi arttırılabilir. Bağlantı trafosuna gerek kalmadan orta gerilim hattına direk bağlanabilir [41].

Kaskat eviriciler, AC kısımda seri bağlı pek çok H köprülerden oluşur. H köprülerinin hepsine ait bağımsız kondansatörlerinin olması dengesiz sistem gerilimlerini düzenlemek için bağımsız denetime imkan sağlar [42].

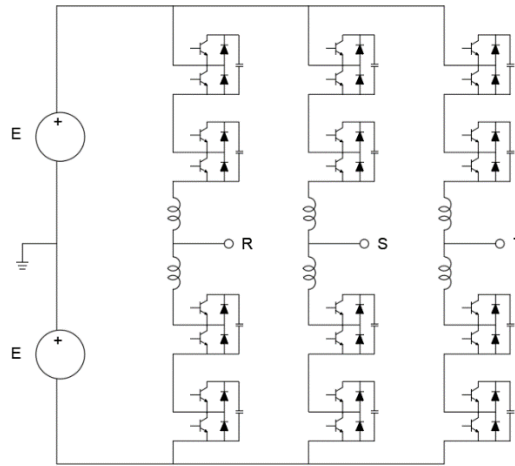
Bu avantajlara sahip olan çok seviyeli kaskat evirici STATCOM gibi cihazlar için en uygun evirici yapısıdır. Şekil 4.7.'de çok seviyeli kaskat eviricilerin devre yapısı verilmiştir.



Şekil 4.7. Çok seviyeli kaskat evirici'nin devre yapısı

4.2.4. Modüler çok seviyeli evirici

Daha esnek ve yedeklemeli yapıları, çalışma aralıklarının geniş olması, harmonik bozulmalarının düşük olması gibi üstünlükleri sayesinde geleneksel evirici yapılarına göre öne çıkmıştır. Yapılarında doğru akım bara kondansatörü gibi merkezi bir enerji depolama birimi bulunmaz. Kol endüktansı akımı sınırlamak için gereklidir. AC tarafında büyük filtre yapılarına gerek yoktur. Yarı iletkenler için düşük gerilim değerleri, yüksek gerilim uygulamaları için avantajlıdır. Yarı iletken arızasında korumaya ihtiyacı olan bir modüldür. Modüllerde bulunan kondansatörlerin gerilim dengelemesi için ayrı bir kontrole ihtiyaç vardır. Şekil 4.8.'de modüler çok seviyeli eviricilerin devre yapısı verilmiştir.



Şekil 4.8. Modüler çok seviyeli eviricinin devre yapısı

4.3. Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği

Darbe genişlik modülasyon tekniği inverter çıkışındaki gerilimi kontrol etmek ve gerilimdeki harmonikleri azaltmak için kullanılır. Darbelerin genliği gerilim beslemeli dönüştürücü tasarımında belirlenir, darbelerin genişliği ve süresi ise modülasyon teknikleri ile belirlenir [43].

Darbe genişlik modülasyon tekniğinde dönüştürücü çıkış gerilimi ve reaktif güç cevap hızını arttırmak için modülasyon oranı ve faz açısını kontrol etmek gerekir. AC sistem gerilimi ile dönüştürücü çıkış gerilimi arasındaki faz farkının kontrolü ile kapasitörün şarj ve deşarj durumu belirlenir, ayrıca aktif güç çıkışı kontrol edilebilir [44].

Darbe genişlik modülasyon tekniği ile çıkışta oluşturulan kare dalga şeklindeki darbeler, genişlikleri değiştirilerek çıkıştaki dalganın ana harmoniği değiştirilir. Darbelerin sayılarının arttırılmasıyla ana harmoniklerin frekansı yükseltilir ve yük endüktansının akımı sınırlanmış olur. Genel olarak darbe genişlik modülasyon sinyalleri yüksek frekanslı üçgen taşıyıcı dalga ile düşük frekanslı modülasyon dalgasının karşılaştırılmasıyla elde edilir. Darbe Genişlik Modülasyonunda farklı dalga formunda sinyaller taşıyıcı olarak kullanılabilir [45].

İnverterelerin kontrolünde kullanılan darbe genişlik modülasyonları;

- Sinüsoidal Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği (SDGM).
- Harmonik Eliminasyonlu Darbe Genişlik Modülasyonu (HEDGM).
- Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM).

4.3.1. Sinüsoidal darbe genişlik modülasyon tekniği (SDGM)

Sinüsoidal darbe genişlik modülasyon tekniği gerilim kaynaklı inverterlerde en yaygın kullanılan kontrol tekniğidir. Bu yöntemde referans sinyal olarak sinüsoidal bir işaret kullanıldığı için sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu adını almıştır. Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonunda sinüsün tepe değerinin (V_R), üçgen taşıyıcının tepe değerine (V_C) oranına modülasyon indeksi (M_a) denir. Çıkış geriliminin ana harmonik genliği modülasyon indeksinin değiştirilmesi ile ayarlanır. Modülasyon indeksi (M_a) $[0 - 1]$ aralığında değiştirilmesi ile çıkış gerilimi genliği doğrusal olarak değişir. Ancak bu bölgede ana harmonik genliği yeterince büyük değildir. $M_a > 1$ değer aldığı anda temel harmonik genliği artar ancak inverter çıkış geriliminde daha önceden olmayan harmonikler ortaya çıkar. $M_a > 1$ olması durumu aşırı modülasyon olarak tanımlanır. Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonunda üçgen taşıyıcı dalga frekansının (f_s) referans dalga frekansına (f_m) oranına frekans modülasyon oranı (m_f) denir. m_f ne kadar büyük olursa harmonik bileşenler ana harmonikten o derece uzaklaşır. Dolayısıyla inverterin çıkış kalitesi artar [46].

4.3.2. Harmonik eliminasyonlu darbe genişlik modülasyon tekniği (HEDGM)

Harmonik eliminasyonlu darbe genişlik modülasyon tekniği anahtarlama açılarının önceden hesap edilerek anahtarlama yapılmasını sağlayan tekniktir. Anahtarlama açıları değiştirilerek çıkış dalga şeklindeki bazı harmonikler elenir ve temel bileşenin genlik kontrolü sağlanmış olur. Çok seviyeli eviricilerde harmonik eliminasyonlu darbe genişlik modülasyonu tekniği diğer darbe genişlik modülasyon tekniklerine göre düşük anahtarlama frekanslarında daha yüksek çıkış gücü kalitesine sahiptir [47].

4.3.3. Uzak vektör darbe genişlik modülasyon tekniği (UVDGM)

Uzak vektör darbe genişlik modülasyonu inverter çıkışlarındaki gerilimin genliğini ve frekansını ayarlamak için kullanılan tekniklerden biridir. Harmonik performansı, DC giriş geriliminin optimum kullanımı düşük akım dalgalanması gibi avantajlara sahiptir [48].

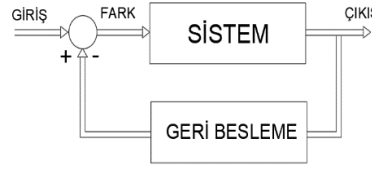
4.4. Kontrol sistemleri

Belirli bir iş ya da işlem için bir araya getirilmiş, birbirleri ile etkileşimli elemanların insan gücü olmaksızın denetlenmesiyle amacıyla geliştirilen yapılardır. Açık çevrim kontrol sistemleri ve kapalı çevrim kontrol sistemleri olarak iki ayrı grupta incelenebilirler.



Şekil 4.9. Açık çevrim kontrol sistemi

Açık çevrim kontrol sisteminde giriş bağımsız bir değişkendir. Çıkışın, giriş üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Çıkış, girişin bir fonksiyonudur. Örneğin bir elektrik motoruna elektrik enerjisini bir şalter üzerinden uygulandığını düşünelim. Motorun dönme hızı ile şalterin çalışması arasında hiçbir denetim yoktur. Bu durum da şalter motoru durdurup çalıştırma görevi yapar. Elektrik motorunu yüklendiğinde devri düşer, şalter burada devrin düşmesini önleyici bir tedbir almaz. Böyle bir görevi yoktur. Ancak piyasada kullanılan değişik tiplerde şalterler vardır. Bunlar motorun aşırı yüklenmesinden dolayı koruyucu özelliği olan şalterler vardır. Bu tip şalterler, aşırı akım röleleri ile birleştirilmiş şalterlerdir.

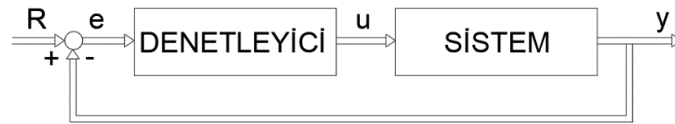


Şekil 4.10. Kapalı çevrim kontrol sistemi

Bu tip kontrol sisteminde çıkış, yalnızca girişin bir fonksiyonu değildir. Çıkıştan alınan bir geri besleme ile giriş her zaman kontrol altına alınır. Çıkış, giriş ile geri beslemenin toplamının bir fonksiyonudur. Diğer bir deyişle bu tip sistemlerde çıkış girişi denetlemektedir, geri besleme işlemi vardır.

Otomatik kontrol sisteminde kontrol elemanı, sistemin herhangi bir çıkış değişkeni üzerinde istenilen değer etrafında çalışması gereken bir duyarlılıkla sistemi kontrol eder. Çıkış büyüklüğüne, duyarlılığa ve konuma göre çeşitli kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Bunlar;

- Açık – Kapalı (Off – On) kontrol
- Oransal Kontrol (Proportional P)
- Oransal + İntegral Kontrol (PI)
- Oransal + Türevsel Kontrol (PD)
- Oransal + İntegral + Türevsel (PID)
- Zaman Oransal (Time Proportional)
- Bulanık Mantıkla Kontrol



Şekil 4.11. PID kontrol edici genel gösterim

Otomatik kontrol sistemlerinden en çok kullanılan PID kontroldür. Şekilde genel yapısı verilen PID kontrol sistemi; değişken giriş değeri (R) ile çıkış değeri (y) arasındaki fark değişken hata (izleme) değerini (e) verir. Hata sinyali PID kontrol sistemi tarafından değerlendirilir denetleyici bu sinyalin türev ve integralini hesaplar.

Denetleyicide K_p , K_i , K_d kazanç değerleri (u) sinyalini oluşturur. Denetleyiciden geçen (u) sinyali sisteme gönderilir ve yeni çıkış elde edilir, yeni çıkışa göre tekrar hata sinyali hesaplanır ve süreç istenen cevap elde edilene kadar devam eder.

PID tasarlarken amaç sistemin transfer fonksiyonu elde edildikten sonra K_p , K_i , K_d katsayıları hesaplanarak sistemde istenen tepkinin gözlenmesidir. Denklemlerle oluşturulan parametreler sistem cevabına yakın olsa da sistemin yine de hesaplamalardan sonra manüel olarak ayarlanması gerekir. PID parametreleri Matlab /Simulink programı kütüphanesinde bulunan PID modülü kullanılarak tasarlanırsa PID TUNER arayüzü kullanılarak hesaplatılabilir. Ayrıca bu arayüz kullanılarak yapılan hesaplamalarda elde edilen parametreler manuel olarak ayarlanarak sistemde elde edilmek istenen cevaba en yakın tasarım yapılabilir. PI kontrol, sistem için yeterli tepkiyi verdiği gözlenirse türevsel (D) denetleyici PID tasarımına eklenmez.

K_p : Oransal kontrolör, girişindeki işareti, referans ile sistem çıkışı arasındaki hatayı belli bir oranda kuvvetlendirerek sisteme girişini sağlayan bir kontrol tekniğidir.

K_i : İntegral kontrolün amacı, sürekli durumda sistemin çıkış işaretiyle referans işareti arasındaki hatayı en aza indirir. Kararlı hal hatasının azaltılmasında etkisi vardır.

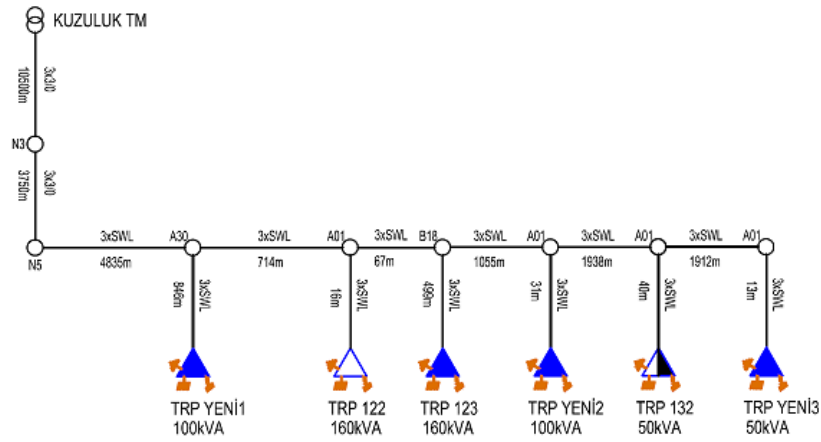
K_d : Türevsel kontrolörün amacı, sistemdeki yüksek kazancı düşürerek Sistemin kararlılığını artırır ve geçici tepkiyi düzeltir.

BÖLÜM 5. MATLAB / SİMULİNK PROGRAMI İLE DEVRENİN TASARLANMASI VE SİMÜLASYONU

Bilgisayar destekli analiz programları elektrik güç sistemleri devrelerini modellenmesinde önemli rol oynar. Planlama aşamasında yatırımların gerçeğe yakın devre parametreleri elde edilip hesaplama programlarında analizi yapıldığında karşılaşılabilecek problemler ve yatırım faydaları görülür böylece yapım aşamasında elde edilen veriler değerlendirilir. Matlab / Simulink programı elektrik enerji sistemlerini modelleyecek zengin bir kütüphaneye ve belirlenen senaryolara göre olaylar oluşturulup simüle etme yeteneğine sahiptir. Örneğin matematiksel denklemlerle hesapladığımız bir iletim sistemindeki faz- faz arızasını ilgili devre oluşturup modellenerek gerçekleyebilir sonuçlarını per unit cinsinden, etkin değer cinsinden, akım gerilimlerin grafiksel değişimini buna benzer birçok çıktı olarak elde edebiliriz.

Tez çalışmasında Sakarya ilinde bulunan Kuzuluk trafo merkezinden besli radyal şebekenin bir parçası modellenmiştir. Modelleme yapılırken şebekeye ait tek hat şeması verilerinden yararlanılmış gerçek değerleri temin edilemeyen şebekeye ait değerler elemanların değerleri ürün katalog bilgilerinden elde edilip hesaplatılmıştır. Güç transformatörü, dağıtım transformatörü, dağıtım hattı değerleri hesaplanarak simulink kütüphanesinde bu elemanları temsil eden blok elemanların parametreleri kısmına veri girişi yapılmıştır. Hesaplanan değerler ve veri girişi sonraki bölümlerde detaylı olarak sunulmuştur.

5.1. Orta Gerilim Dağıtım Sisteminin Tasarlanması

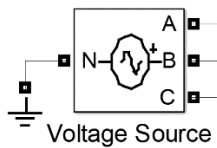


Şekil 5.1. Modellenecek radyal şebeke

Radyal Şebekeler ülkemizde yaygın olarak kullanılan şebeke tipleridir. Tek bir besleme noktası tarafından beslenirler. Genelde yerleşimin az olduğu yerlerde daha çok bu yapı mevcuttur. Ring şebeke gibi çift taraflı beslemeye sahip olmadığından hatta problem olduğunda tüketici baralarının diğer uçtan besleme imkanına sahip değildir. Diğer şebeke türlerine göre tesis bedeli ucuzdur. Dağıtım trafosundan uzaklaştıkça gerilim düşümü artar ve hatlarda gerilim eşitliği yoktur. Dağıtım merkezi radyal şebekenin mümkün olduğu kadar merkezine gelecek şekilde şebeke tasarlanır ve genelde gerilim düşümünü kontrol edebilmek için hat kesitleri uzaklık arttıkça azalır.

Modellenecek şebekede alçak gerilim kısmı dahil edilmemiştir, tez çalışmasında orta gerilim bölgesinde gerilim düşümlerine D-STATCOM 'un etkisi incelenmiştir.

5.1.1. Güç kaynağı bloğu



Şekil 5.2. Güç kaynağı bloğu

Modellenen sistem de trafo merkezi 154 kV gerilimle beslenmektedir. Simülink kütüphanesinde Şekil 5.2.'de verilen üç fazlı güç kaynağı kullanılmıştır.

Şebekeye ait R ve X değerleri TEİAŞ'ın 2017 yılında ilan ettiği kısa devre raporlarından yararlanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.1. 2018 yılı yaz puantı, kış puantı ve minimum yük şartlarında trafo merkezleri yüksek gerilim baralarında kısa devre akımları

BARA NO	BARA ADI	GERİLİMİ (kV)	ÜÇ FAZ		FAZ TOPRAK	
			AKIM(KA)	AÇI (°)	AKIM(KA)	AÇI (°)
213322	KUZULUK	154	7,96	-79,60	5,41	-79,84
213322	KUZULUK	154	8,23	-78,83	5,53	-79,08
213322	KUZULUK	154	8,39	-79,23	5,74	-79,51

En yüksek kısa devre akımı 8,39 kA ve kısa devre kesme gücü 1000 MVA alınarak;

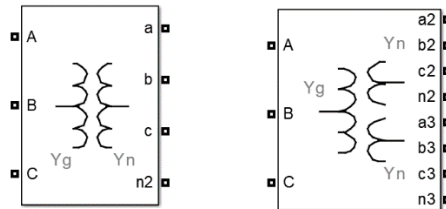
$$I_k'' = \frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot Z_s} \quad Z_s = \frac{154}{\sqrt{3} \cdot 8.39} = 10,59 \, \Omega$$

$$X_s = \frac{Z_s}{1,005} = 10,53 \, \Omega$$

$$R_s = 0,1 \cdot X_s = 1,053 \, \Omega$$

Değerleri bulunmuştur. Güç kaynağı bloğuna seri bağlanan RL devre ile şebeke modellenmiştir.

5.1.2. Güç transformatörü bloğu



Şekil 5.3. İki sargılı ve üç sargılı transformatör bloğu

Trafo merkezinde bulunan 154 kV 50MVA transformatör simulink kütüphanesinde Şekil 5.3.'de verilen blok ile modellenmiştir. Radyal şebekeler uzunluğu 20 kilometreye kadar 10 kV – 20 kV gerilim seviyelerinde beslenebilir.

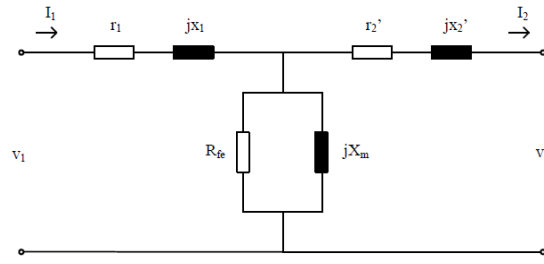
D-STATCOM cihazı ile ilgili bilgi verilen önceki bölümlerde D-STATCOM cihazının sisteme paralel bağlandığından bahsetmiştik trafo merkezinde tesis edildiği varsayıldığı durumda 3 sargılı transformatör üzerinden bağlantısı yapılmıştır. Kritik yük olarak bir yük seçildiği noktada yük girişine transformatörsüz de bağlasak D-STATCOM un davranışını yine de gözlemlemiş oluruz çünkü her durumda D-STATCOM çıkış gerilimi hat gerilimi ile aynı değerdedir.

Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği 6. Maddesinde 154 kV yüksek gerilim sargılı trafo merkezlerinde trafonun yıldız/yıldız bağlı ve primerin doğrudan topraklanması sekonderin ise faz toprak arıza akımının sınırlanması için direnç ya da reaktansı üzerinden topraklanması gerektiği belirtilmiştir. Devre tasarımı bu bağlantı şekli ile gerçekleştirilmiştir.

Transformatör bloğunda sargıların direnç ve endüktansı transformatör kısa devre deneyi, nüvenin direnç ve endüktansı transformatör boшта çalışma deneyi hesaplamaları kullanılarak hesaplanmış ve parametreler kısmına girilmiştir. Transformatör deney bilgileri literatürden alınmıştır.

5.1.2.1. Transformatör kısa devre çalışma deneyi

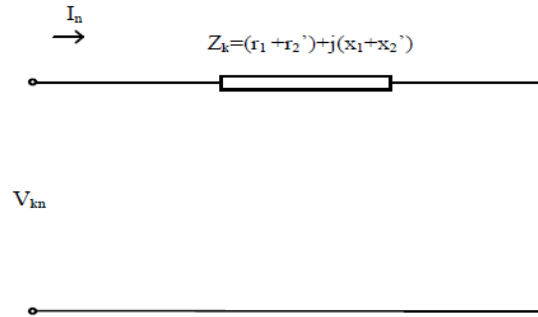
Transformatörler gerilimi primer ve sekonder sargıları oranında dönüştürürler. Transformatörlerin sargı direnç ve endüktansları yok sayılamayacak derecededir kısa devre hesaplamalarında etkisi ihmal edilmesi uygun değildir. Şekil 5.4.'de transformatör eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 5.4. Primere indirgenmiş transformatör eşdeğer devresi[49]

r_1 ve r_2' transformatörün sargı dirençlerini, x_1 ve x_2' transformatörün sargı endüktanslarını, R_{fe} nüve direnci ve X_m nüve endüktansını gösterir. Sargılara ait direnç ve endüktans değerleri kısa devre deneyinden, nüveye ait direnç ve endüktans boşa çalışma deneyinden hesaplanarak elde edilir.

Kısa devre deneyinde, transformatör çıkışı kısa devre edilerek transformatör girişinden nominal akım uygulanır. Uygulanan nominal akımda bağlı kısa devre gerilimi belirlenir. Manyetik devreden geçen çok küçük olacağından ihmal edilir. Şekil 5.5.'de kısa devre deneyi eşdeğer devresi verilmiştir[49].



Şekil 5.5. Kısa devre deneyi transformatör eşdeğer devresi[49]

Deneye göre elde edilen kısa devre kaybına ait denklem çıkarılırsa;

$$P_k = \sqrt{3} \cdot V_k \cdot I_n \cdot \cos\phi_k \quad (5.1)$$

Eşdeğer devre empedansı eşitliğini oluşturabiliriz.

$$Z_k = \frac{V_{kn}}{I_n} \quad (5.2)$$

Buradan aşağıdaki ifadelerle belirtilen kısa devre sargı direnci ve kaçak reaktansı elde edilir.

$$R_k = Z_k \cdot \cos\varphi_k \quad (5.3)$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin\varphi_k \quad (5.4)$$

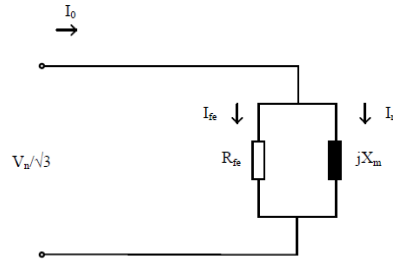
Birincil ve primere indirgenmiş ikincil sargı dirençleri ve endüktans çok yakın değerlerde olduğu için eşit kabul edilirler.

$$R_k = r_1 + r'_2 \quad (5.5)$$

$$X_k = x_1 + x'_2 \quad (5.6)$$

5.1.2.2. Transformatör boşa çalışma deneyi

Boşa çalışma deneyinden transformatörün sargı çıkışı açık devre bırakılarak girişten nominal gerilim uygulanır yük bağlı olmadığı için transformatör boşa çalışma akımı çeker. Açık bırakılan sargı akımı sıfırdır, sargı direnci ve reaktansı transformatörün nüve direnç ve reaktansına göre çok küçük olduğundan ihmal edilir. Boşa çalışma deneyi transformatör eşdeğer devresi Şekil 5.6.'da verilmiştir[49].



Şekil 5.6. Boşa çalışma devre deneyi transformatör eşdeğer devresi[49]

Deneye göre elde edilen boşa çalışma kaybına ait denklem çıkarılırsa;

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_0 \cdot \cos\varphi_0 \quad (5.7)$$

Şekil 1.3.'te nüve demir kayıpları R_{fe} ile, mıknatıslanma reaktansı X_m ile temsil edilmiştir. Boşa çalışma akımı bileşenlerinin direnç ve reaktanstan geçtiği görülmektedir. Bu akımların açık ifadesini yazalım;

$$I_{fe} = I_0 \cdot \cos\varphi_0 \quad (5.8)$$

$$I_m = I_0 \cdot \sin\varphi_0 \quad (5.9)$$

Sonuç olarak direnç ve reaktans eşitlikleri eşdeğer devreye göre elde edilir.

$$R_{fe} = \frac{V_n/\sqrt{3}}{I_{fe}} \quad (5.10)$$

$$X_m = \frac{V_n/\sqrt{3}}{I_m} \quad (5.11)$$

50 MVA Güç transformatörü parametre hesabı:

$$P_k=167510 \text{ W} \quad V_{kn}=14460 \text{ V} \quad \%u_k=11,40 \quad P_0=32290 \text{ W} \quad I_0=0,629 \text{ A}$$

$$u_r = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100 = \frac{167510}{50 \cdot 10^6} \cdot 100 = 0,33$$

$$u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = 11,39$$

$$R_t = \frac{u_r \cdot u_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{0,33 \cdot 154^2}{100 \cdot 50} = 1,56$$

$$r_1 = r_2' = 1,56/2 = 0,78 \Omega \quad r_2 = 0,78/a^2 = 0,039 \Omega$$

$$X_t = \frac{u_x \cdot u_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{11,39 \cdot 154^2}{100 \cdot 50} = 54,02 \Omega$$

$$x_1 = x_2' = 54,02/2 = 27,01 \Omega \quad L_1 = 0,086H$$

$$x_2 = 27,01/a^2 = 1,355 \Omega \quad L_2 = 4,31 \cdot 10^{-3}H$$

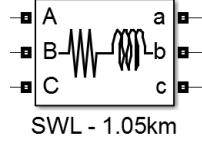
$$P_0 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_0 \cdot \cos\varphi_0 \quad \cos\varphi_0 = 0,859 \quad \sin\varphi_0 = 0,511$$

$$I_{fe} = I_0 \cdot \cos\varphi_0 = 0,629 \cdot 0,859 = 0,540 \text{ A} \quad R_{fe} = \frac{U_n}{I_{fe}} = 36865 \Omega$$

$$I_\mu = I_0 \cdot \sin\varphi_0 = 0,629 \cdot 0,511 = 0,321 \text{ A} \quad X_\mu = \frac{U_n}{I_\mu} = 61970 \Omega \quad L_\mu = 197,35 \text{ H}$$

5.1.3. Dağıtım hattı bloğu

Radyal şebeke ait hat parametreleri Şekil 5.1.'de verilen tek hat şemasındaki metraj ve kesit bilgisine uygun olarak Simulink kütüphanesinde bulunan Şekil 5.7.'de ki blok kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 5.7. Hat bloğu

Modellenen devrede per unit birimlerle ölçüm yapıldığından hat parametreleride per-unit değer olarak hesaplanıp veri girişi yapılmıştır.

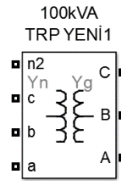
3/0 hat karakteristik özellikleri : $R=0,3366 \Omega/\text{km}$ $X_L=0,335 \Omega/\text{km}$

SWALLOW hat karakteristik özellikleri : $R=1,0742 \Omega/\text{km}$ $X_L=0,371 \Omega/\text{km}$

Hat empedans bilgileri Elektrik Mühendisleri Odası kitapçığından alınmıştır.

5.1.4. Dağıtım transformatörü bloğu

Modellenen radyal şebekede dağıtım transformatörleri Şekil 5.1.'de verilen tek hat şemasına uygun olarak Şekil 5.8.'de verilen simulink kütüphanesinde bulunan iki sargılı transformatör kullanılarak modellenmiştir. Şebekede 50 kVA, 100 kVA, ve 160 kVA olarak dağıtım transformatörleri bulunmaktadır. Transformatör parametreleri üretici firma katalog bilgileri kullanılarak hesaplanmıştır. Örnek olarak 100 kVA trafonun parametreleri hesaplanmış diğer trafoların hesabıda aynı şekilde yapılmıştır. Blok içerisine gerçek değerler olarak veri girişi yapıp pu dönüşümü blok içerisinde seçilerek yapılmıştır.



Şekil 5.8. Dağıtım transformatörü bloğu

$$100 \text{ kVA} \quad 154/11 \text{ kV} \quad P_k=1750 \text{ W} \quad P_o=320 \text{ W} \quad \%u_k=4 \quad \%i_o=2.1$$

$$u_r = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100 = \frac{1750}{100 \cdot 10^3} \cdot 100 = 1,75$$

$$u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = 3,5$$

$$R_t = \frac{u_r \cdot u_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{1,75 \cdot 11000^2}{100 \cdot 100000} = 21,175$$

$$r_1 = r_2' = 21,175/2 = 10,58 \Omega \quad r_2 = 10,58/a^2 = 0,014 \Omega$$

$$X_t = \frac{u_x \cdot u_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{3,59 \cdot 11000^2}{100 \cdot 100000} = 43,43 \Omega$$

$$x_1 = x_2' = 43,43/2 = 21,72 \Omega \quad L_1 = 0,069 \text{ H}$$

$$x_2 = 21,72/a^2 = 0,0287 \Omega \quad L_2 = 9,14 \cdot 10^{-5} \text{ H}$$

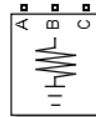
$$P_0 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_0 \cdot \cos\varphi_0 \quad \cos\varphi_0 = \frac{320}{\sqrt{3} \cdot 3,03 \cdot 400} = 0,152 \quad \sin\varphi_0 = 0,988$$

$$I_{fe} = I_0 \cdot \cos\varphi_0 = 3,03 \cdot 0,152 = 0,460 \text{ A} \quad R_{fe} = \frac{U_n}{I_{fe}} = 502 \Omega$$

$$I_\mu = I_0 \cdot \sin\varphi_0 = 3,03 \cdot 0,988 = 2,99 \text{ A} \quad X_\mu = \frac{U_n}{I_\mu} = 77,11 \Omega \quad L_\mu = 0,245 \text{ H}$$

5.1.5. Yük bloğu

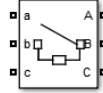
Modellenen şebekede yükler tahmini değerler verilerek Simulink kütüphanesinde Şekil 5.9.'da verilen blokla modellenmiştir. Yük bloğu parametreler kısmına aktif güç, reaktif güç trafoların kapasitesine göre tahmini olarak girilmiştir.



Şekil 5.9. Yük bloğu

5.1.6. Kesici bloğu

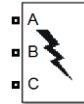
Modellenen şebekede devreye alınması veya çıkarılması gereken yüklerin simülasyon esnasında belirli zaman aralıklarında devreye alma ve çıkarma işlemi Şekil 5.10.'da verilen blok kullanılarak modellenmiştir. Blok kullanılarak gerilim yükselmesini sağlayacak kapasitör grubu, baralarda gerilim düşümü oluşturmak için büyük güçlü yük bloğunun devreye alınması ve devreden çıkarılması sağlanmıştır.



Şekil 5.10. Kesici bloğu

5.1.7. Kısa devre arıza bloğu

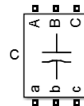
Simülasyon sırasında belirlenen aralıklarda kısa devre arızası oluşturmak için Şekil 5.11.'de verilen blok kullanılmıştır. Blok parametre girişleri yapılırken arızanın cinsi (faz – faz, faz – toprak, üç faz), hata direnci, oluşma ve bitme zaman aralığı belirlenebilir. Kısa devre arıza bloğu etkisiyle oluşturulan arızanın, sistemde kısa süreli gerilim yapması sağlanmıştır.



Şekil 5.11. Kısa devre arıza bloğu

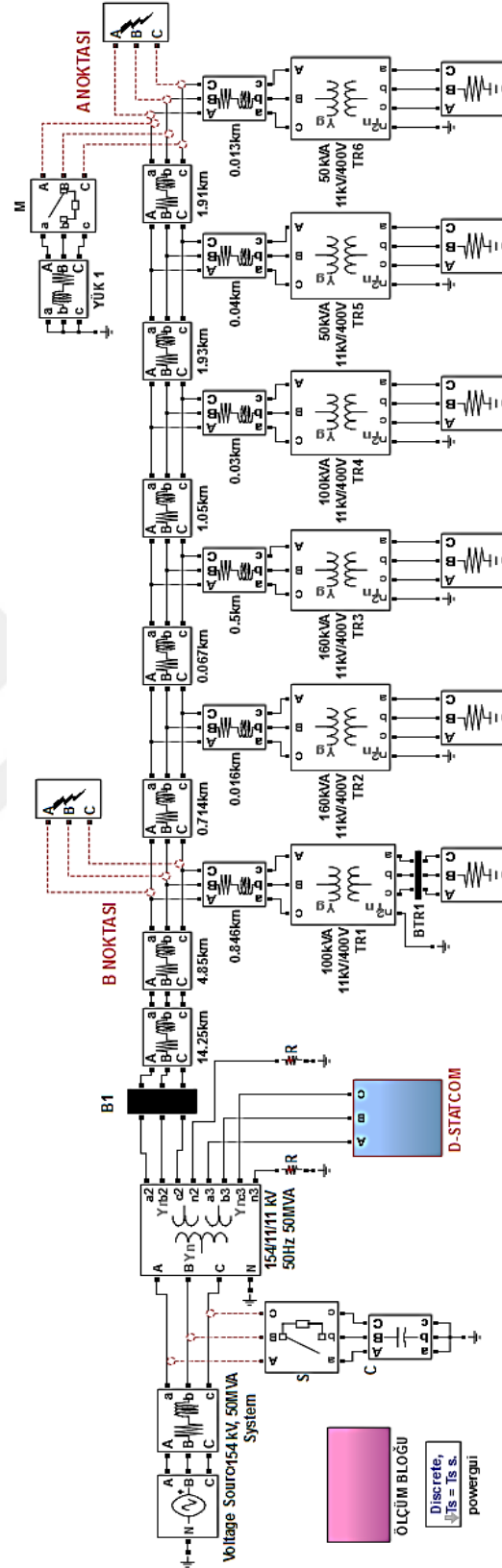
5.1.8. Kapasitör grubu bloğu

Simülasyon sırasında gerilim yükselmesi sağlamak için Şekil 5.12.'de verilen üç faz kapasitör bloğu kullanılmıştır.



Şekil 5.12. Kapasitör bloğu

5.1.9. Orta gerilim şebekesi simulink modeli



Şekil 5.13. Orta gerilim bölgesi simulink modeli

Şekil 5.1.'de prensip şeması verilen radyal şebeke Matlab/Simulink ortamında modellenerek Şekil 5.13.'de sunulmuştur.

5.1.10. D-STATCOM bloğu

Bu tez çalışmasında orta gerilim dağıtım bölgesinde kısa süreli gerilim düşümü ve gerilim yükselmesine karşı Şekil 5.14.'de verilen IGBT konfigürasyonlu gerilim kaynağı beslemeli D-STATCOM modeli kullanılmıştır.

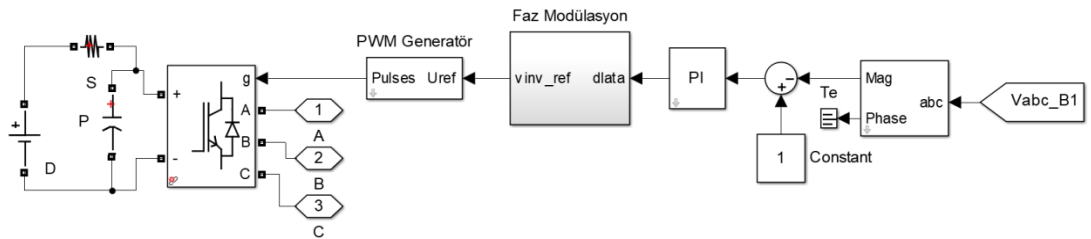
Ölçüm barası olarak kullanılan B1'den alınan gerilim bilgisi pozitif, negatif, sıfır dizen bileşenlerine ayrılır. PI kontrolörüne gerilim bilgisinin pozitif bileşeni sistem girişi olarak uygulanır, PI kontrolör B1 bara geriliminin 1 pu olması için geri besleme olarak uygulanan '1' bilgisi ile sistem bilgisi olan B1 barası pozitif bileşen bilgisini karşılaştırır ve gerekli ' θ ' açısını üretir. Üretilen ' θ ' açısı ile faz modülasyon bloğunda PWM Generatörüne uygulanmak için 120 derece farkla 3 fazın V_{ref} gerilimi üretilir.

$$V_A = \sin(\omega + \theta) \quad (5.12)$$

$$V_B = \sin(\omega + \theta - 120) \quad (5.13)$$

$$V_C = \sin(\omega + \theta + 120) \quad (5.14)$$

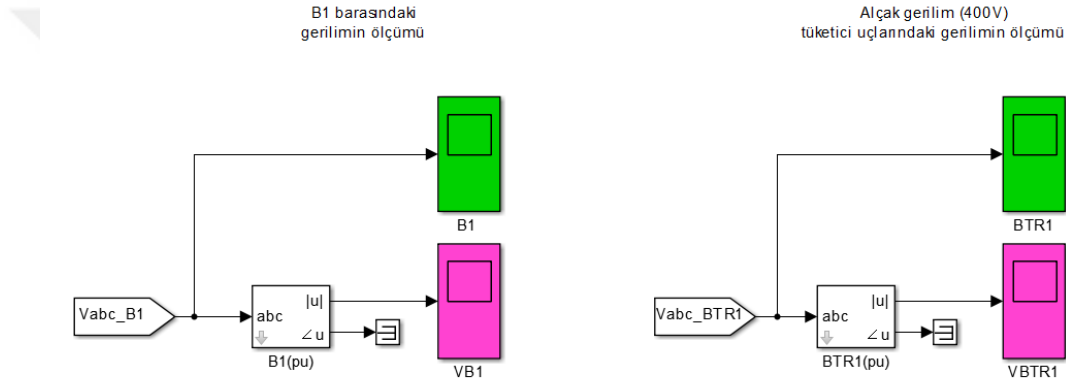
Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu (SPWM) e uygulanan V_{ref} gerilimi taşıyıcı testere sinyali ile karşılaştırılarak üretilen 6 darbeli sinyal ile 2 seviyeli IGBT konfigürasyonlu dönüştürücü çıkış gerilimi kontrol edilmiş olur.



Şekil 5.14. D-STATCOM bloğu

5.1.11. Ölçüm bloğu

Nominal gerilim sağlanması istenen noktada B1 barası konumlandırılmıştır. D-STATCOM cihazının nominal gerilimi sağlaması ve bağlı bulunduğu barada reaktif güç karşılanması gibi kullanım amaçları için sadece gerilim bilgisinin ölçülmesi ve kontrolör tarafından işlenmesi yeterlidir. B1 barasından per unit olarak yapılan ölçümler simülasyon sonuçlarında değerlendirilmiştir. BTR1 barası ve buna bağlı ölçüm diyagramı tüketici uçlarındaki gerilim değeri gözlenmek istenirse faydalanmak için oluşturulmuştur. D-STATCOM ve kontrolörlerin çalışmasını etkileyecek bir ölçüm yapmamaktadır.



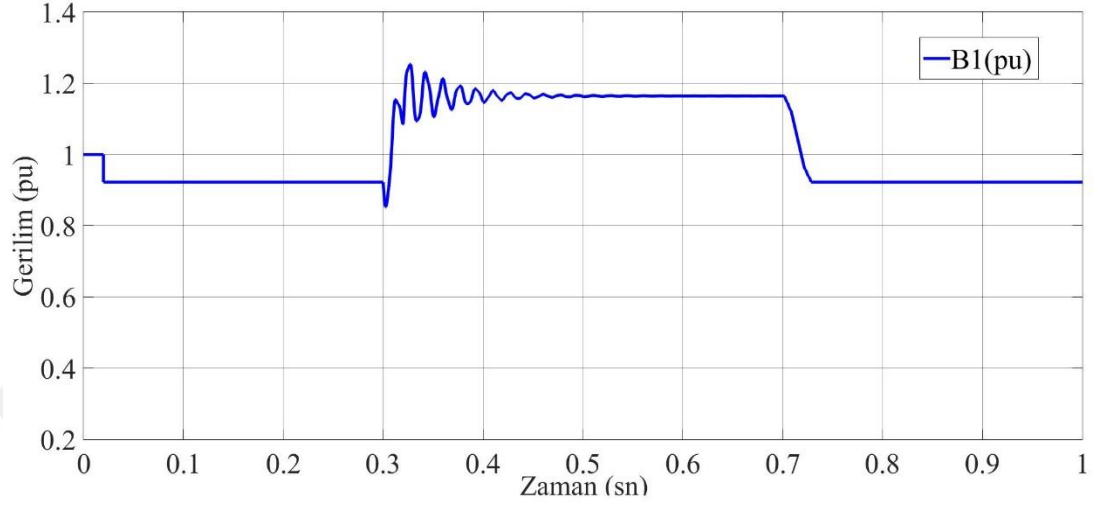
Şekil 5.15. Ölçüm bloğu

5.2. Simulasyon

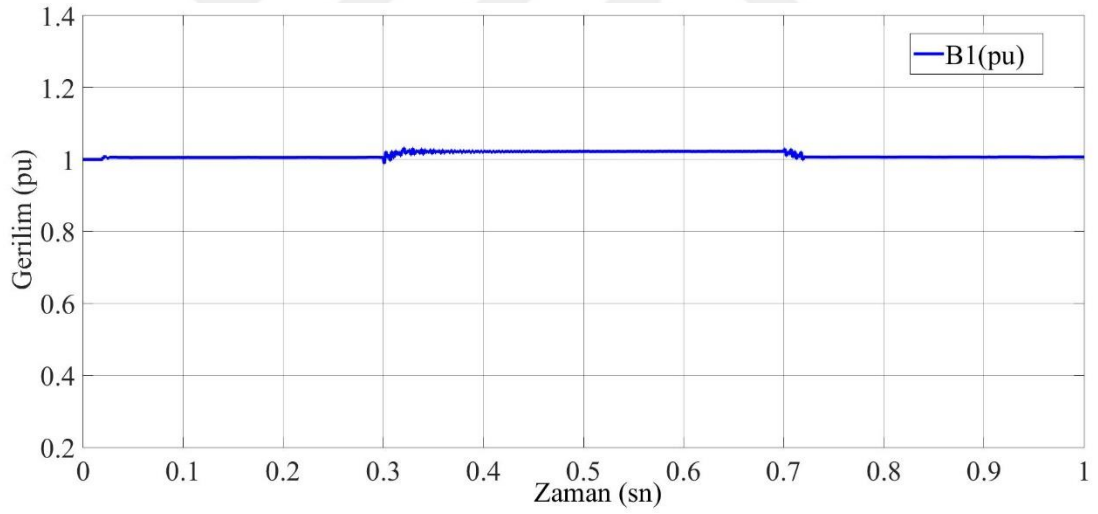
5.2.1. Gerilim yükselmesi ve D-STATCOM'un tepkisi

Gerilim yükselmesi dağıtım şebekelerinde karşılaşılan problemlerden biridir. Modellenen devrede yüksek gerilim tarafında S anahtarının 0,3-0,7 sn aralığında kapatılması ile bağlanan kapasitör grupları gerilim yükselmesi oluşmasını sağlamıştır. D-STATCOM cihazı devrede değilken B1 barasından alınan gerilim grafikleri Şekil 5.16.(a).’da sunulmuştur. Gerilim yükselmesi normal işletme koşulları gerilim değerinden 1.19 pu değerine çıkmıştır. Şekil 5.16.(b).’de aynı simülasyon D-STATCOM devrede bağlıyken gerçekleştirildiğinde 0,3–0,7 sn aralığında yükselen bara geriliminin 1.01 pu değerinde tutulduğu görülmüştür. Şebekeden kaynaklı gerilim yükselmesinin tüketicilere yansımaları D-STATCOM önlemiştir. Ayrıca şebekenin

reaktif güç ihtiyacından kaynaklı 0,3–0,7 sn dışındaki zaman dilimlerinde 0,94 pu değerine düşen geriliminde 0,1 pu değerinde tutulduğu görülmektedir.



Şekil 5.16. (a) Gerilim yükselmesi sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok

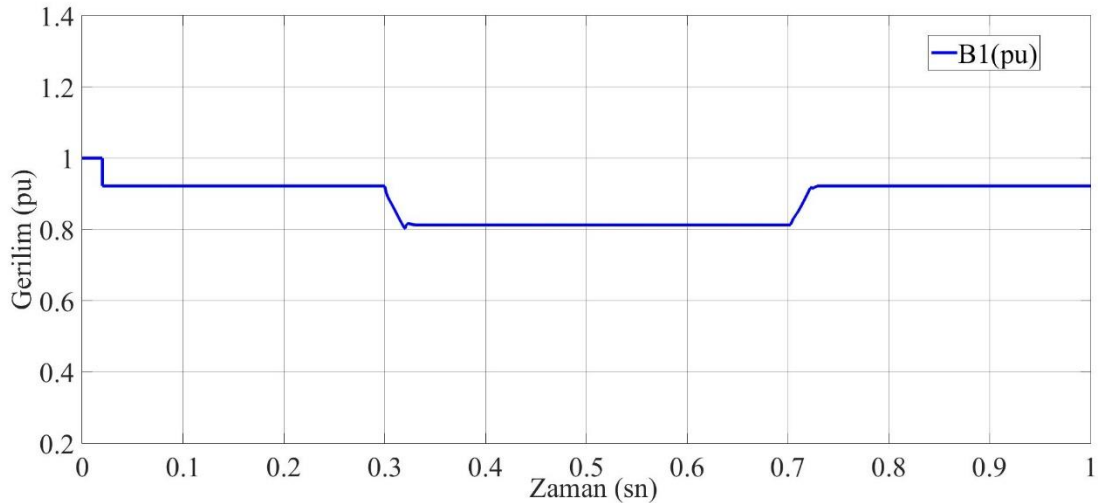


Şekil 5.16. (b) Gerilim yükselmesi sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var

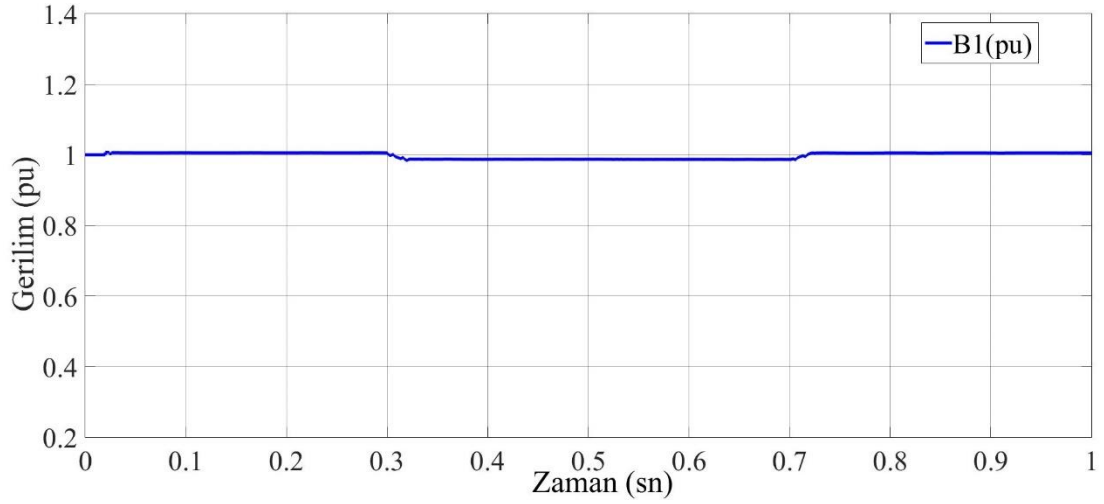
5.2.2. Şebekede A noktasında devreye yük girmesi sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi

Şekil 5.13.'e göre A noktasında 0,3 – 0,7 sn aralığında M anahtarının kapatılması ile devreye alınan büyük güçlü yükün B1 barasında oluşturduğu gerilim düşümü şekil 5.17.(a).’da sunulmuştur Gerilim seviyesinin 0,8 pu değerine düştüğü görülmektedir. Şebekeden besli yük barasında bu etkiyi gösteren bir yük devreye girdiği noktada hat empedanslarını ve bağlı bulunan yükleride düşündüğümüzde ciddi bir gerilim düşümüne sebep olacaktır. Karmaşıklığa yol açmaması açısından ve D-STATCOM ‘un etkisinin bağlı bulunduğu baradaki tepkisini görmemizin yeterli görüldüğünden orta gerilim seviyesinde bir adet ölçüm noktası oluşturulmuştur. Şebekeden uzaklaştıkça, bölüm 2’de değindiğimiz hassas yüklerin gerilim düşümüne göre tolerans eğrileri göz önünde bulundurulduğunda cihazlar için riskli olabileceği düşünülmektedir.

D-STATCOM devreye bağlanarak simülasyon tekrarlandığında gerilim düşümünün 0,99 pu değerine yükseltildiği ve bara geriliminin aynı zamanda diğer yüklerin gerilim seviyesinin nominal değerde tutulduğu görülmektedir.



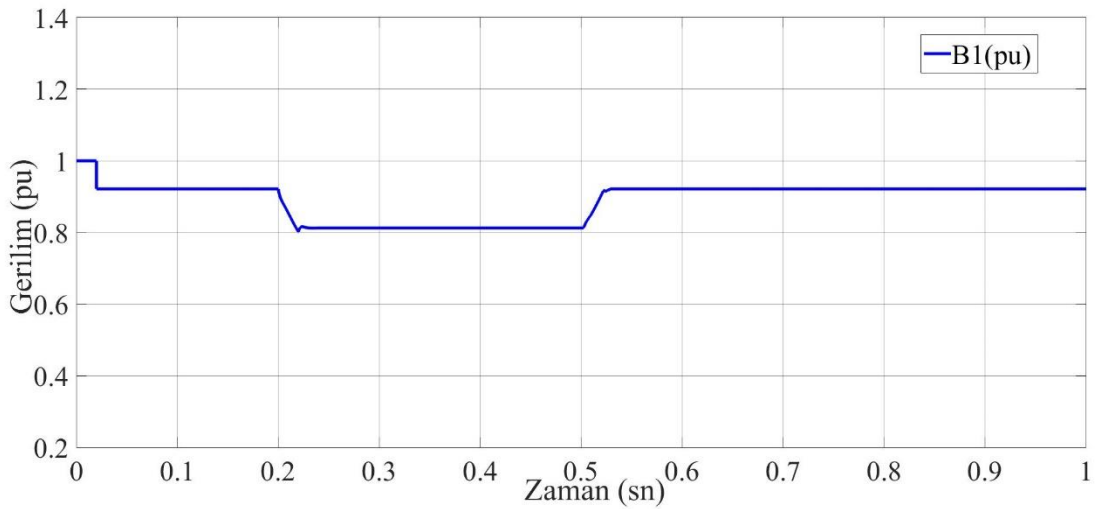
Şekil 5.17. (a) Gerilim düşmesi sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok



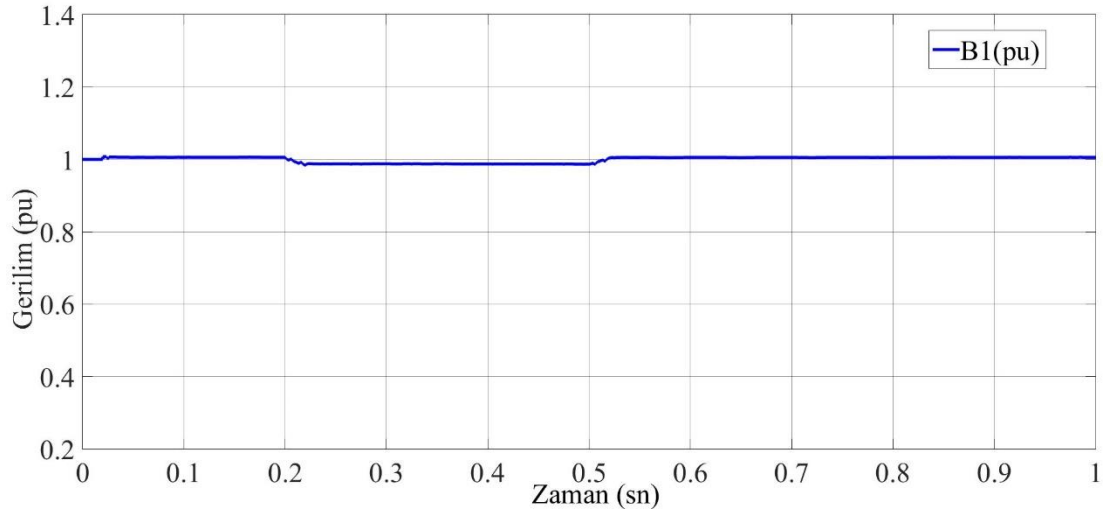
Şekil 5.17. (b) Gerilim düşmesi sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var

5.2.3. Şebekede A noktasında 3 faz + toprak arızası sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi

Şekil 5.13.'e göre A noktasında 0,2–0,5 sn aralığında 3 Faz + Toprak arızası oluşması sonucu B1 barasındaki gerilimin grafiği Şekil 5.18.(a).’da sunulmuştur. Gerilimin değeri 0,8 pu civarındadır. D-STATCOM devreye alınarak simülasyon tekrarlandığında, şekil 5.18 (b).’de görüldüğü gibi gerilim yaklaşık 1.0 pu civarına yükselmiştir. D-STATCOM gerilimin nominal değerlerde tutulmasını sağlamıştır.



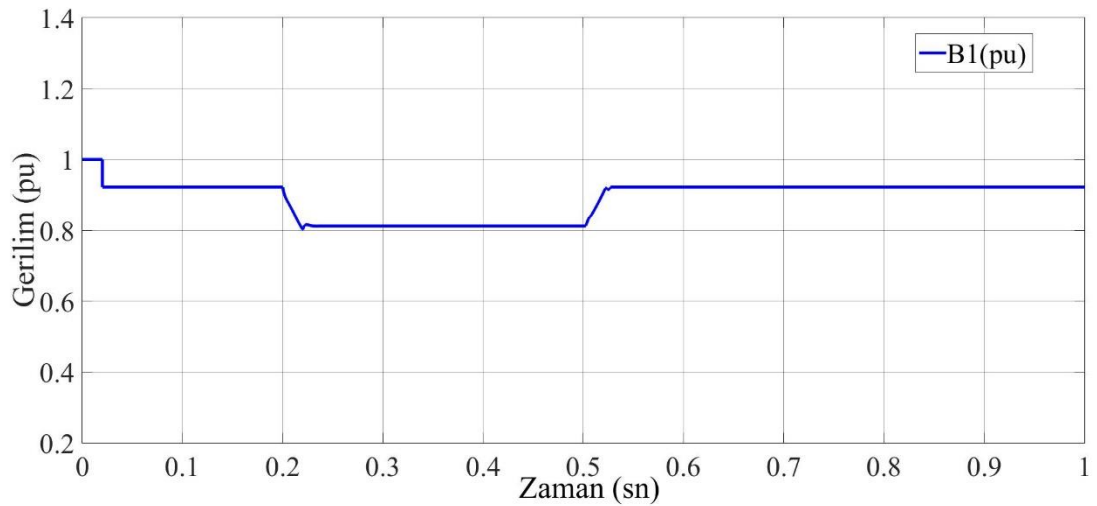
Şekil 5.18. (a) 3 Faz + tprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok



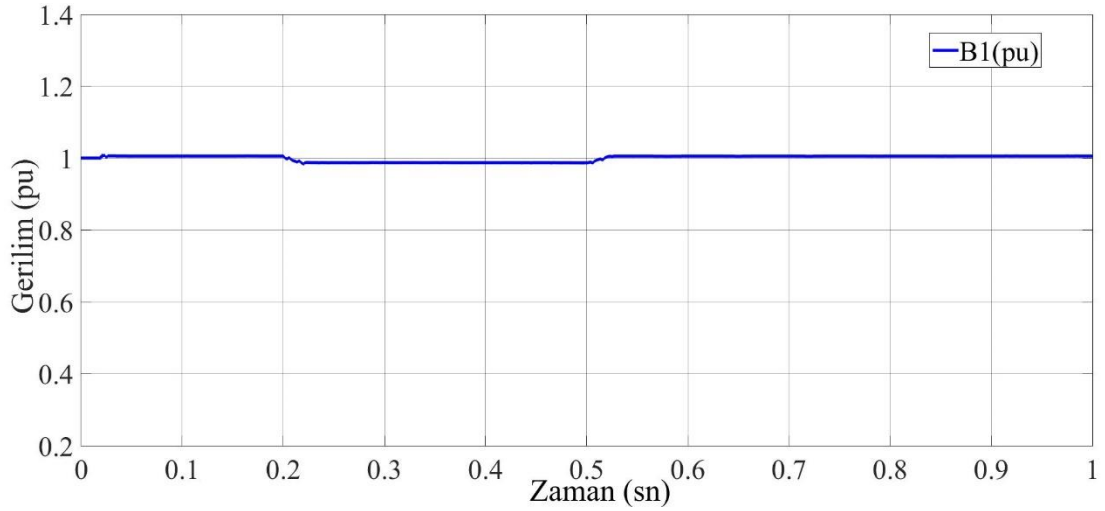
Şekil 5.18. (b)3 Faz + toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var

5.2.4. Şebekede A noktasında 3 faz arızası sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi

Şekil 5.13.'e göre A noktasında 0,2 – 0,5 sn aralığında 3 Faz arızası oluşması sonucu B1 barasındaki gerilimin grafiği Şekil 5.19 (a).’da sunulmuştur. Gerilimin değeri 0,8 pu civarındadır. D-STATCOM devreye alınarak simülasyon tekrarlandığında, Şekil 5.19 (b).’de görüldüğü gibi gerilim yaklaşık 1.0 pu civarına yükselmiştir. D-STATCOM gerilimin nominal değerlerde tutulmasını sağlamıştır.



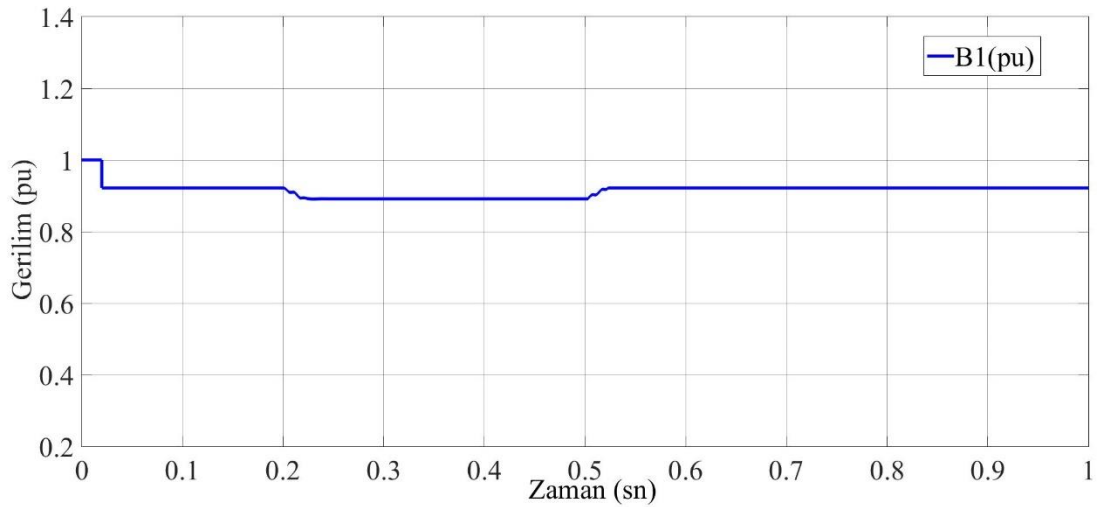
Şekil 5.19. (a)3 Faz arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok



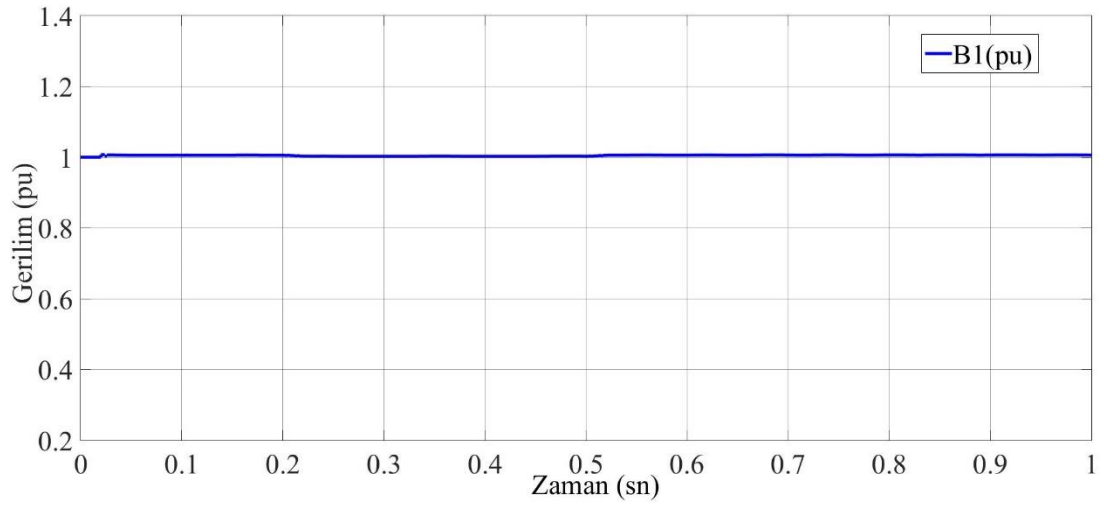
Şekil 5.19. (b)3 Faz arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var

5.2.5. Şebekede A noktasında 1 faz + toprak arızası sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi

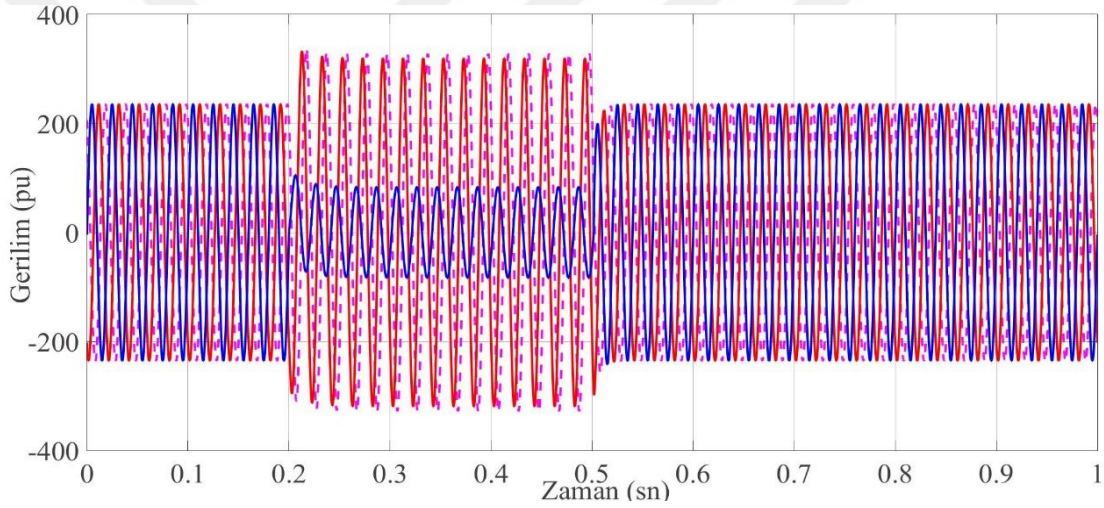
Şekil 5.13.'e göre A noktasında 0,2 – 0,5 sn aralığında Faz Toprak arızası oluşması sonucu B1 barasındaki gerilimin grafiği Şekil 5.20.(a).’da sunulmuştur. Gerilimin değeri 0,9 pu civarındadır. D-STATCOM devreye alınarak simülasyon tekrarlandığında, Şekil 5.20.(b).’de görüldüğü gibi gerilim yaklaşık 1.0 pu değerine yükselmiştir. D-STATCOM gerilimin nominal değerlerde tutulmasını sağlamıştır.



Şekil 5.20. (a)Faz + toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok



Şekil 5.20. (b)Faz + toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var

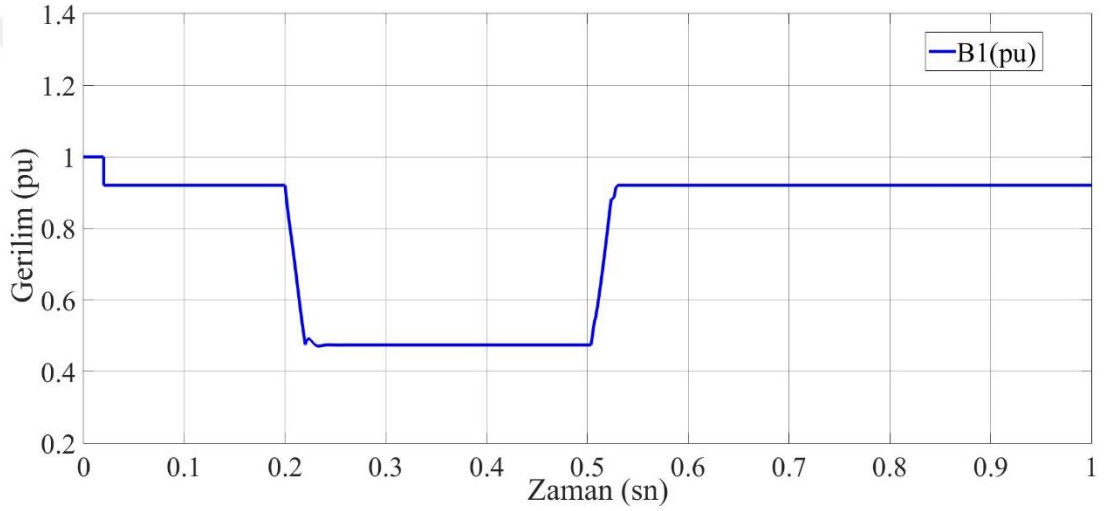


Şekil 5.20. (c)Faz + toprak arızası sonucu arızalı faz ve arıza olmayan fazların durumu

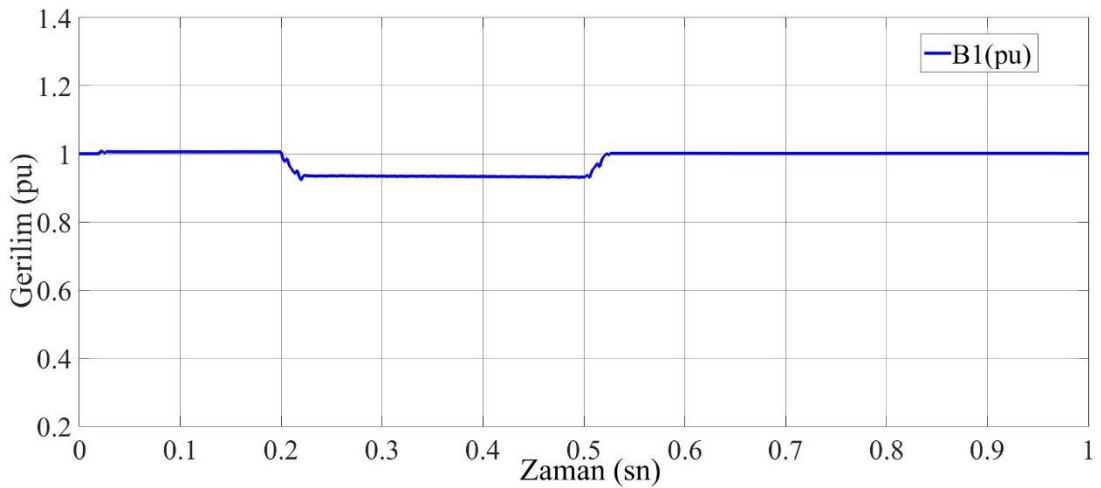
Faz toprak arızası meydana geldiğinde arıza noktasından farklı baralarda gerilimin durumunu gösteren grafik Şekil 5.20 (c).’de sunulmuştur. Ölçüm alınan nokta Şekil 5.13.’e de TR1 isimli dağıtım trafosunun alçak gerilim bölgesine ait tüketici uçlarıdır. Şekilden de görüldüğü gibi arızalı fazda gerilim düşümü olurken diğer iki fazda gerilim yükselmesi olmaktadır.

5.2.6. Şebekede B noktasında 3 faz + toprak arızası sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi

Şekil 5.13.'e göre B noktasında 0,2 – 0,5 sn aralığında 3 Faz Toprak arızası oluşması sonucu B1 barasındaki gerilimin grafiği Şekil 5.21 (a).’da sunulmuştur. Gerilimin değeri 0,44 pu civarındadır. Şekil 5.18.'a ya göre ölçüm noktası arıza noktasına yaklaştıkça gerilim düşümü arttığı görülmüştür. D-STATCOM devreye alınarak simülasyon tekrarlandığında, Şekil 5.21 (b).’de görüldüğü gibi gerilim yaklaşık 0.98 pu değerine yükselmiştir. D-STATCOM gerilim düşümünü önemli ölçüde azaltmıştır.



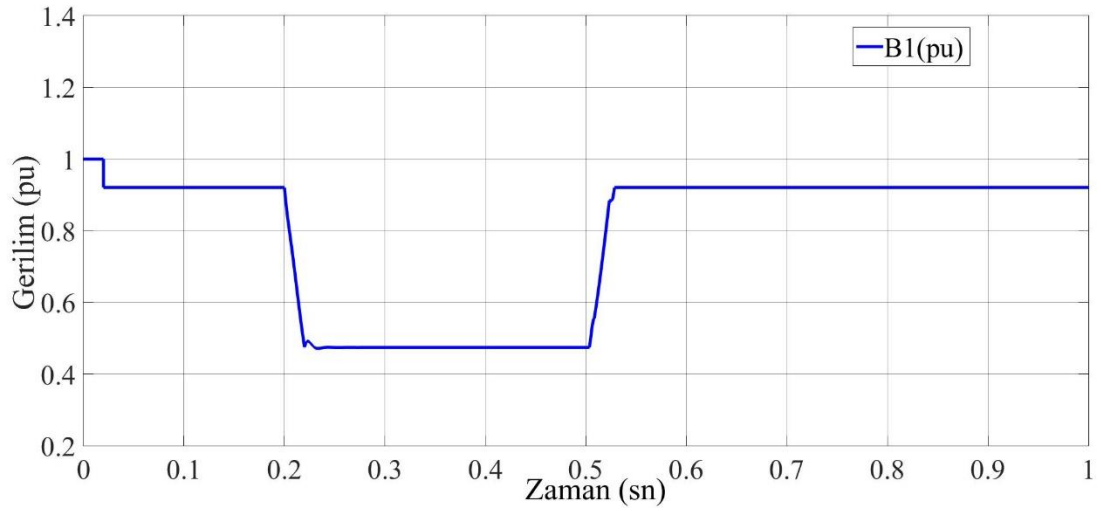
Şekil 5.21. (a) 3 Faz + toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok



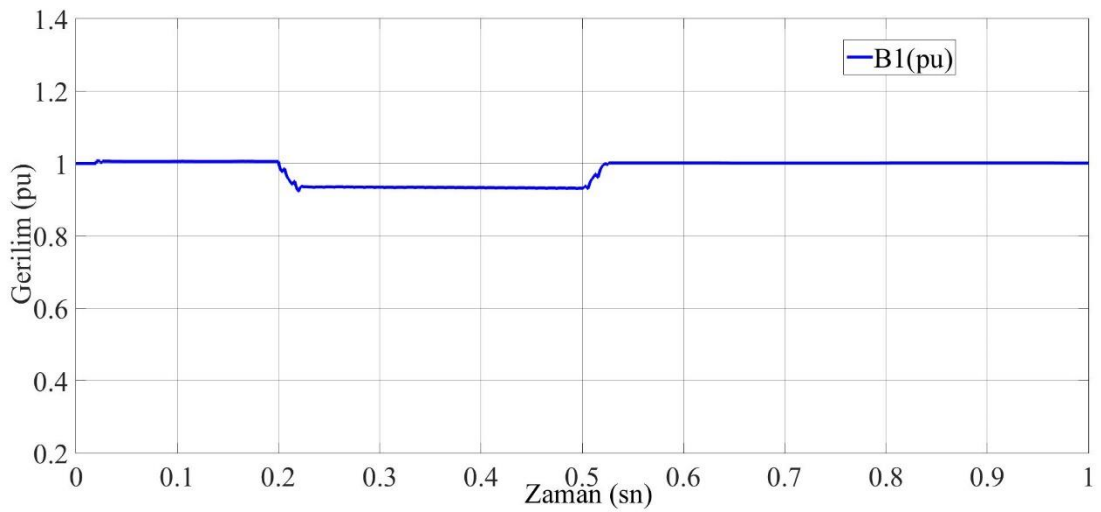
Şekil 5.21. (b) 3 Faz + toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var

5.2.7. Şebekede B noktasında 3 faz arızası sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi

Şekil 5.13.'e göre B noktasında 0,2 – 0,5 sn aralığında 3 faz arızası oluşması sonucu B1 barasındaki gerilimin grafiği Şekil 5.22 (a).’da sunulmuştur. Gerilimin değeri 0,42 pu civarındadır. Şekil 5.19.'a ya göre ölçüm noktası arıza noktasına yaklaştıkça gerilim düşümü arttığı görülmüştür. D-STATCOM devreye alınarak simülasyon tekrarlandığında, Şekil 5.22 (b).’de görüldüğü gibi gerilim yaklaşık 0.98 pu değerine yükselmiştir. D-STATCOM gerilimin nominal değerlerde tutulmasını sağlamıştır.



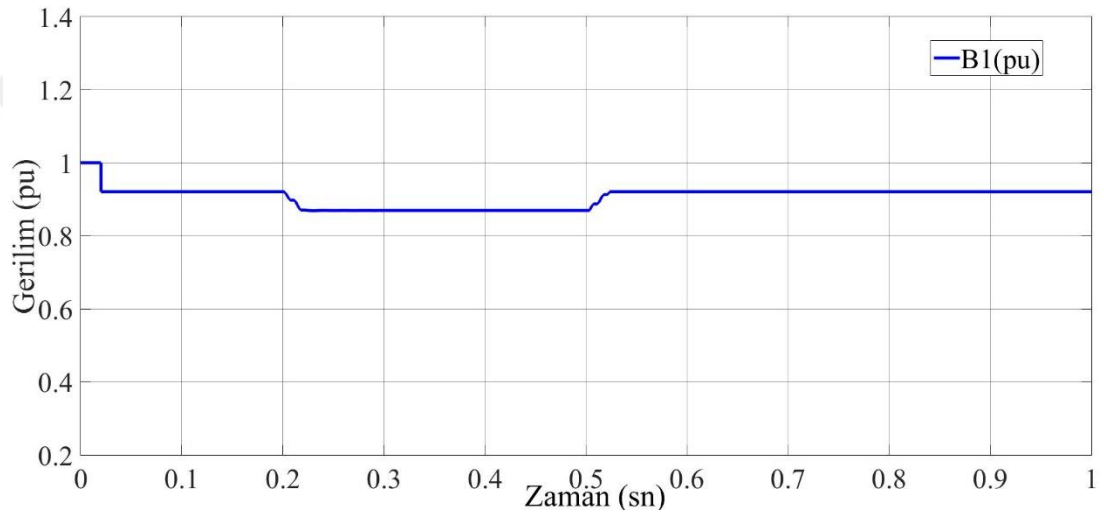
Şekil 5.22. (a) 3 Faz arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok



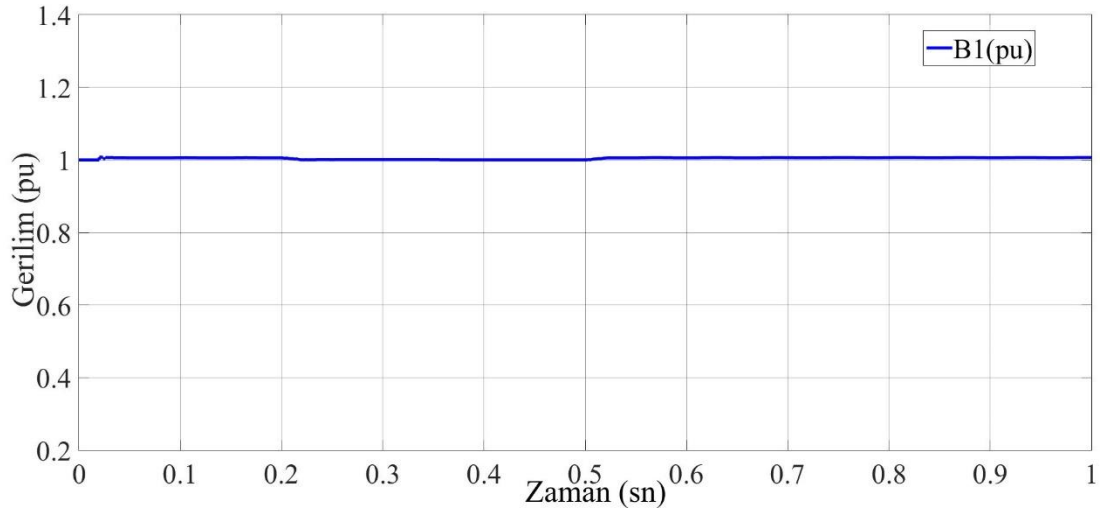
Şekil 5.22. (b) 3 Faz Arızası Sonucu Bara Gerilimi / D-STATCOM Var

5.2.8. Şebekede B noktasında faz toprak arızası sonucu oluşan gerilim düşümü ve D-STATCOM'un tepkisi

Şekil 5.13.'e göre B noktasında 0,2 – 0,5 sn aralığında Faz Toprak arızası oluşması sonucu B1 barasındaki gerilimin grafiği Şekil 5.23 (a).’da sunulmuştur. Gerilimin değeri 0,84 pu civarındadır. D-STATCOM devreye alınarak simülasyon tekrarlandığında, Şekil 5.23 (b).’de görüldüğü gibi gerilim yaklaşık 1.0 pu değerine yükselmiştir. D-STATCOM gerilimin nominal değerlerde tutulmasını sağlamıştır.



Şekil 5.23. (a) Faz+toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM yok



Şekil 5.23. (b) Faz + toprak arızası sonucu bara gerilimi / D-STATCOM var

BÖLÜM 6. SONUÇ

Bu çalışmada elektrik enerjisi sistemleri için enerji kalitesi, gerilim kararlılığı gibi birbirleri ile yakından ilişkili kavramlar hakkında bilgi verilmiştir. Enerji (Güç) kalitesi problemlerine kısaca değinilmiş tez konusu olan kısa süreli gerilim düşümleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Kısa süreli gerilim düşümlerinin tüketiciler için önemli bir problem olduğu ve bazı cihazların bu düşüme göre tolerans eğrileri hakkında literatürden alınan eğriler sunulmuştur. Enerji sistemlerinde oluşacak kısa süreli gerilim düşümlerine karşı önlem olarak kullanılan güç elektroniği tabanlı devre elemanları hakkında bilgi verilmiş. Bu devre elemanlarını oluşturan yapılara değinilmiştir. Tez çalışmasının son beşinci bölümünde Matlab/Simulink ortamında prensip şeması verilen radyal şebekenin bir parçası modellenmiştir.

İlgili devre modellenirken devre elemanlarına ait parametreler katalog bilgileri, ilgili kurumların yayımladıkları kısa devre bilgileri gibi gerçek değerler kullanılarak hesaplanmış, ulaşılamayan bilgiler ise literatürden alınmıştır. Modellenen devrede farklı senaryolarda kısa süreli gerilim düşümleri ve gerilim yükselmesi oluşturulmuş D-STATCOM cihazının gerilim seviyesine etkisi incelenmiştir. Kısa süreli gerilim düşümleri ani büyük güçlü yükün devreye girmesi, kısa devre arızaları gibi senaryolarla, gerilim yükselmesi ise kapasitor grubunun devreye alınması ile oluşturulmuştur. Kısa devre arızalarında hata noktasının uzaklığı, kısa devre arıza tipi, hata direncinin ölçüm yapılan bara üzerindeki gerilim düşümü değerini değiştirdiği simülasyon sonuçlarında görülmüştür. Gerilim yükselmesi şebekede devreye alınan kapasitör yükü etkisiyle olabileceği gibi faz toprak arızası etkisi ile de arızanın olmadığı diğer iki fazda gerilim yükselmesi oluşacağı simülasyon sonuçlarından görülmektedir. Oluşturulan farklı senaryolarla gerilimin genliğine yapılan bozucu etkilerin D-STATCOM tarafından hızlı şekilde ve önemli ölçüde giderildiği gözlenmiştir.

Dağıtım şebekelerinde enerji verimliliği sağlanması yönünden, kısa süreli gerilim düşümlerine karşı yarı iletken tabanlı, hızlı ve hassas cevap verme yeteneğine sahip cihazların kullanılmasını ilgili kurum ve kuruluşların bağlayıcı yönetmelikler ile teşvik sağlaması önerilir.



KAYNAKLAR

- [1] Cigre Study committee 14 working Group 14.14, FACTS Tutorial Draft 1 1993.
- [2] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, <http://www.epdk.gov.tr>, Erişim Tarihi: 15.02.2019.
- [3] Trafo Merkezleri OG-AG Güç Kalitesi Ölçüm Teknik Şartnamesi, TEDAŞ Sistem İşletme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2007.
- [4] TS EN 50160 Standardı , TSE, Ankara, 2011.
- [5] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, std. IEEE 1159-1995.
- [6] Reineri C. A., Gómez J. C., Balaguer E. B. and Morcos M., "Experimental study of induction motor performance with unbalanced supply", Electric Power Components and Systems, Volume 34, No. 7, pp. 817-829, 2006.
- [7] Dugan, R.C., Mcgranaghan, M.F., Beaty H.W., Santoso S., "Electrical Power Systems Quality 2nd ed.", McGraw-Hill Comp., New York, 59-71, 78, 260-71 1996.
- [8] Kumru C. F., "Dağıtım Sistemlerinin Enerji Kalitesi Bakımından İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [9] Arrillaga, J., Watson, N. R., ve Chen, S., Power System Quality Assessment, John Wiley & Sons, Chicester, 2001.
- [10] Erhan K., Usta Ö., Yumak K., Borbuev A., "Gerilim Çentiği Tesbiti İçin Yeni Bir Algoritma Tasarımı", ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, pp.138-142, Bursa, 2012.
- [11] Bollen M.H.J., Voltage Sag Indices s-Draft 1.2 working document for IEEE Pl564 and CIGRE WG 36-07, December 2000.
- [12] IEEE Recommended Practice For Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment, Std 1346-1998.

- [13] Abido M. A., "Power System Stability Enhancement Using Facts Controllers: A Review", The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 34, Number 1B, 153-172, 2008.
- [14] Gyugyi L., "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solidstate Synchronous Voltage Sources", IEEE Transactons on Power Delivery, Vol 9, No 2, April, 1994.
- [15] Song Y. H. and Johns A. T., "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", London, UK: IEE Press, 1999.
- [16] Bobman L. J., Lasseter R. H., "Equivalent Circuit for Frequency Responce of a Static Var Compensator", IEEE Trans., Vol. PWRS-1, No.4, pp69-73, November 1986.
- [17] Uzunoğlu, M., Kocatepe, C., Yumurtacı, R., ve Gülez, K., "The Various Operating Conditions, Harmonics Effects and Stability of Thyristor Controlled Reactor", IEEE TENCON, Kuala Lumpur, Malaysia, 2000
- [18] Arifoğlu U., Güç sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi, Alfa Yayınevi, İstanbul, 2002.
- [19] Hingorani N. G., Gyugyi L., "Understanding FACTS: Concepts and Technolgy Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press, NewYork, 1999.
- [20] Gelen A., Yalçınöz T., "Simulation of TSC on Voltage Regulation for Static and Dynamic Load Models Using MATLAB", The 38th North American Power Symposium, September 17, 18, and 19, USA, 2006.
- [21] Mathur R. M., Varma R. K., "Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems", IEEE Press, USA, 2002.
- [22] Gelen A., Yalcinoz T., "Analysis of TSR-based SVC for a Three-Phase System with Static and Dynamic Loads", IEEE Int. Conf. on Elect. Eng., (ICEE 2007), Lahore, Pakistan, pp:1-6, ISBN:1-424408938, 11-12 April 2007.
- [23] Piwko, R.J., Larsen, E.V., Damsky, B.L. Furumasa, B.C., Mitltlestadti W., Eden, J.D., "Thyristor Controlled Series Compensation Prototype Installation at the Slatt 500kV Substation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8-3, 1460- 1469, 1993.
- [24] Hingorani N. G., Flexible AC transmission, IEEE reprinted from IEEE Spectrum, Volume 30, No.4 , pp.40-45., 1993.

- [25] Ertay M. M., Aydoğmuş Z., "Güç Sistemlerinde FACTS Uygulamaları", 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Turkey 2011.
- [26] Çöteli R., Aydoğmuş Z., "DGM-Statcom ile Reaktif Güç Kompanzasyonu," Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic, 10(2), pp.123-128, 2007.
- [27] Kangarlu M.F., Hosseini S.H., Babaei E., Sadigh A.K., Transformerless DVR topology based on multilevel inverter with reduced number of switches, in Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), Tehran-Iran, 371-375, 17-18 Şubat, 2010.
- [28] Eminoğlu U., Herdem S., Yalçınöz T., "İnvertör temelli facts cihazları kullanarak Reaktif güç kompanzasyonu ile gerilim kontrolü", Elekt.-elektro.-bilg. Müh. 10. Ulusal kongresi, 152-155, 2002.
- [29] Uzunovic E., Canizares A. Reeve C. J., "Fundamental Frequency Model of Static Synchronous Compensator", North American Power Symposium (NAPS), Laramie, Wyoming, 49-54, 1997
- [30] Muhammad R. H., Power Electronics Devices, Circuits and Applications, Pearson, Nobel Yayınevi, Türkçe çeviri, 2014.
- [31] Marquardt R., Lesnicar A. and Hildinger J., "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range," IEEE 2003 PowerTech Conf., Bologna, Italy, pp. 23-26, 2003.
- [32] Uzunovic E., "EMTP, Transient Stability and Power Flow Models and Controls of VSC Based FACTS Controllers", Phd. Thesis, Canada 2001.
- [33] Bose K. B., Modern Power Electronics and AC Drivers, Prentice Hall PTR, 2002.
- [34] Çöteli R., "Statcom ile Güç Akış Kontrolü", Y. Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2006.
- [35] Deniz E., "Beş Seviyeli İnverterlerin SDGM İle Kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Elektrik Elektronik Müh., 2005.
- [36] Tuncer S., "Çok Seviyeli İnverterler Ve Dgm Teknikleri," Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, pp.18-24, 2004.
- [37] Nabae A., Takahashi I., Akagi H., "A New Neutral-Point- Clamped PWM Inverter," IEEE Tran. On Industry Appl., pp. 518-523, 1981.
- [38] Nordvall A., "Multilevel Inverter Topology Survey," Master of Science Thesis in Electric Power Engineering, Chalmers University Of Techn., pp.17,2011.

- [39] Sirisukprasert S., "The Modelling and Control A Cascaded Multilevel Converter Based STATCOM," Thesis of Doctor of Philosophy, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA. 2004.
- [40] Kazdaloğlu A., Çakır B., Demir M., Güneroğlu A., Özdemir E., Uçar M., "Fotovoltaik Elektrik Üretim Sistemlerinde Kullanılan Çok Seviyeli Eviricilerin İncelenmesi," 4. Enerji verimliliği ve kalitesi semp., , pp. 48-53, KOCAELİ, 2011.
- [41] Chen A., He X., "Research on Hybrid-Clamped Multilevel- Inverter Topologies," IEEE Tran. on Ind. Elec., 53(6), pp. 1898-1907, 2006.
- [42] An T., Powell M. T., Thanawala H. L., Jenkins N., "Assesment of Two Different STATCOM Configurations for FACTS Application in Power Systems," IEEE International Conf. on Power System Techn., POWERCON '98, Beijing, China, Vol. 1, pp. 307-312, 1998.
- [43] Tan J. S., "Flexibility in MLVR- VSC back - to - back link", Master of Science, University of Canterbury, New Zealand, 2006.
- [44] Canizaresa, C. A., Pozzi, M., Corsi, S., Uzunovic, E., "STATCOM modeling for voltage and angle stability studies", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, , Vol. 25, Issue 6, pp. 431 – 44, 2001.
- [45] Deniz E., ALTUN H., " Beş Seviyeli İzole DC Kaynaklı Kaskat İnverterin SPWM Tekniği ile Kontrolü", SAÜ. Fen Bilünleri Dergisi, 11. Ci lt, 1. Sayı,s.1-9,2007.
- [46] Chen, Y. M., Hsieh, C. H., Cheng, Y. M., "Modified SPWM controlschemes for three-phase invertes", IEEE Power Electronics and DriveSystems, 651-656, 2001.
- [47] Sirisukprasert, S.; Jih-Sheng Lai; Tian-Hua Liu, 2000 "Optimum harmonic reduction with a wide range of modulation indexes for multilevel converters", Industry Applications Conference. Conference Record of the 2000 IEEE, 8-12 October 2000.
- [48] Haoran Z., Jouanne A.V., Dai S., Wallace, A.K., Wang F., Multilevel inverter modulation schemes to eliminate common-mode voltages, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, 1645 –1653, 2000.
- [49] Erim B., "154 Kv Bir İletim Şebekesinin Kapalı (Ring) Sisteme Dönüşmesiyle Çift Taraflı Beslenen Trafo Merkezlerinde Bara Kısa Devre İncelemesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Semih Özkol, 1989'da İzmit'te doğdu. Kocaeli Anadolu Meslek Lisesi (Elektrik Bölümü), Kocaeli Üniversitesi Karamürsel Meslek Yüksek Okulu (Mekatronik Bölümü), Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi (İşletme Bölümü), Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (Elektrik Mühendisliği Bölümü) ile lisans eğitimini tamamladıktan sonra Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Elektrik Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Halen bir kamu kurumunda çalışmaya devam etmektedir. Evli ve bir kız çocuk babasıdır.