

**T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SİMETRİK VE ASİMETRİK ARIZA DURUMLARINDA ESNEK  
ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMİ CİHAZLARININ  
KARARLILIĞA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Onur TURAN**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK  
MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Yavuz SARI**

**Ağustos 2019**

T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SİMETRİK VE ASİMETRİK ARIZA DURUMLARINDA ESNEK  
ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMİ CİHAZLARININ  
KARARLILIĞA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

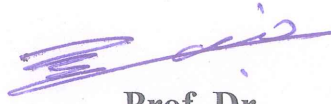
Onur TURAN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK  
MÜHENDİSLİĞİ

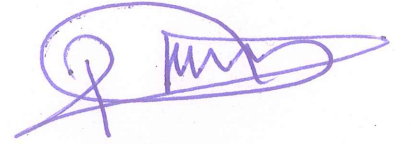
Bu tez ~~27/08~~2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



Doç. Dr.  
Yavuz SARI  
Jüri Başkanı



Prof. Dr.  
Yılmaz UYAROĞLU  
Üye



Prof. Dr.  
Raşit KÖKER  
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.



Onur TURAN

27/08/2019

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez yazım sürecim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışman hocam Doç. Dr. Yavuz SARI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca ders döneminde kendilerinden çok kıymetli bilgiler öğrendiğim değerli bölüm hocalarıma da ayrı ayrı teşekkür ederim.

Tez yazım süresi boyunca verdiği destek ve gösterdiği anlayış için değerli eşim Elif'e teşekkür ederim.

Son olarak, bu günlere gelmemde her türlü maddi ve manevi desteklerini gördüğüm aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
KISALTMALAR.....	v
SİMGELER.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xii
SUMMARY.....	xiii

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
------------	---

### BÖLÜM 2.

LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	6
2.1. Genel Bilgiler.....	6
2.2. Aktif Güç (P).....	7
2.3. Reaktif Güç (Q).....	9
2.4. Görünür Güç (S).....	9
2.5. Reaktif Güç Kompanzasyonu .....	9
2.5.1. Reaktif güç kompanzasyonu faydaları.....	12
2.5.2. Sistem kapasitesine etkileri.....	13
2.5.3. Kayıpların azaltılması.....	14

2.5.4. Gerilim düşümünün azaltılması.....	15
2.5.5. Şebekeden reaktif güç çeken alıcılar.....	15
2.5.6. Reaktif güç ihtiyacının tayini.....	16
2.5.6.1. Aktif gücün sabit olması durumu.....	17
2.5.6.2. Görünür gücün sabit olması durumu.....	17
2.5.7. Reaktif güç kompanzasyonu prensipleri.....	18
2.6. Kompanzasyon Tesis Çeşitleri.....	19
2.6.1. Bireysel kompanzasyon.....	19
2.6.2. Grup kompanzasyon.....	20
2.6.3. Merkezi kompanzasyon.....	21
2.7. Güç Sistem Kararlılığına Genel Bakış.....	22
2.7.1. Gerilim ve frekans sınırları.....	23
2.8. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS).....	24
2.8.1. Esnek alternatif akım iletim sistemlerinin özellikleri.....	27
2.8.2. Esnek alternatif akım iletim sistemi cihazları.....	28

### **BÖLÜM 3.**

<b>STATİK VAR KOMPANZASYON SİSTEMLERİ (SVC) .....</b>	<b>30</b>
3.1. Örnek Bir Svc Sistemi Simulasyonu.....	34
3.1.1. Modellenen sistemin çalışma prensibi.....	38
3.1.2. Sonuçlar .....	43
3.2. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) .....	45
3.2.1. Tristör kontrollü reaktör matematiksel modeli.....	49
3.2.2. Sabit kondansatörlü (FC) tristör kontrollü reaktör.....	52
3.3. Tristör Anahtarlamalı Kapasitör (TSC).....	53
3.4. Statik Senkron Kompanzator (STATCOM).....	54
3.4.1. STATCOM ve SVC sistemleri karşılaştırması.....	56
3.5. Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC).....	58
3.5.1. Seri kondansatörün güç iletimine etkisi.....	60
3.6. Statik Senkron Seri Kompanzator (SSSC).....	61
3.7. Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (UPFC).....	62

## **BÖLÜM 4.**

<b>ÜÇ FAZLI SİSTEMLERDE ARIZALAR .....</b>	<b>63</b>
4.1.Kısa Devre Kavramı.....	63
4.2. Üç Fazlı Sistemlerde Simetrik ve Asimetrik Arıza Kavramları.....	63
4.3. Simetrik Kısa Devre Arızaları.....	64
4.4. Asimetrik Kısa Devre Arızaları.....	64
4.4.1. Faz-toprak kısa devresi.....	64
4.4.2. Faz-faz kısa devresi.....	65
4.4.3.İki faz - toprak kısa devresi.....	65

## **BÖLÜM 5.**

<b>TASARIM YÖNTEMİ VE BENZETİM ÇALIŞMALARI.....</b>	<b>67</b>
5.1. Uygulama Yapılan Sistem.....	68
5.2. Asimetrik Hata Durumunda SVC'nin Kararlılığa Etkisi.....	69
5.3. Simetrik Hata Durumunda SVC'nin Kararlılığa Etkisi.....	73
5.4. Asimetrik Hata Durumunda STATCOM'un Kararlılığa Etkisi.....	75
5.5. Simetrik Hata Durumunda STATCOM'un Kararlılığa Etkisi.....	78

## **BÖLÜM 6.**

<b>TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>82</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>84</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>89</b>

## KISALTMALAR

A	: Amper
AA	: Alternatif Akım
AG	: Alçak Gerilim
AT	: Akım Trafosu
B	: Suseptans
C	: Kapasitans
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
FACTS	: Flexible Alternating Current Transmission System
FC	: Fixed Capacitor
GT	: Gerilim Trafosu
GTO	: Gate Turn-off Thyristor
HTG	: Hidrolik Türbin Governor
I	: Akım
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
Kt	: Kontaktör
M	: Motor
L	: Endüktans
OG	: Orta Gerilim
P	: Aktif Güç
PLL	: Phase Locked Loop
PSS	: Power System Stabiliser
Pu	: Per Unit
R.G.K	: Reaktif Güç Kontrol Rölesi
RMS	: Kareköklerin ortalaması
S	: Görünür Güç



SVC	: Static VAr Compensator
STATCOM	: Statik Senkron Kompanzatör
Ş	: Şalter
TCR	: Thyristor Controlled Reactor
TCSC	: Tristör Controlled Series Capacitor
TSC	: Thyristor Switched Capacitor
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
VA	: Volt Amper
VSI	: Voltage Source Inverter
YG	: Yüksek Gerilim
Z	: Empedans
Q	: Reaktif Güç

## SİMGELER

$B_{svc}$	: SVC Suseptansı
$B_{Cmax}$ , $B_{lmax}$	: Suseptans Eğrisi Parametreleri
$Cos\varphi$	: Güç Faktörü
$f$	: Frekans
$I_{svc}$	: SVC Akımı
$K_i$	: İntegral Kazancı
$t$	: Zaman
$V_{ref}$	: Referans Gerilim
$V_r$	: Alıcı Uç
$V_s$	: Gönderici Uç
$Z_{ref}$	: Toprak Empedansı
$\alpha$	: Tetikleme Açısı
$\sigma$	: İletim Açısı
$\varphi$	: Faz Farkı
$\delta$	: Faz Açısı
$\omega$	: Açısal Hız
$X$	: Reaktans

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1 : FACTS cihazlarının sürekli durum uygulamaları.....	29
Tablo 3.1 : Programlanabilir gerilim kaynağı değerleri.....	43
Tablo 3.2 : TCR tabanlı SVC tipleri.....	48
Tablo 4.1 : Asimetrik ve simetrik arızaların oluşma sıklıkları.....	63
Tablo 5.1 : SVC'li sistemde kullanılan generatörlerin parametreleri.....	70
Tablo 5.2 : STATCOM'lu sistemde kullanılan generatörlerin parametreleri.....	75
Tablo 5.3 : STATCOM parametreleri.....	76
Tablo 5.4 : STATCOM ve SVC sistemleri karşılaştırma tablosu.....	81

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 : Tasarlanan SVC sistemi.....	2
Şekil 1.2 : Tasarlanan iki makinalı sistem.....	3
Şekil 2.1 : Güç üçgeni gösterimi.....	6
Şekil 2.2 : Omik (a), endüktif (b) ve kapasitif (c) sistemlerde akım ve gerilim arasındaki faz farklarının görüldüğü örnek grafik.....	8
Şekil 2.3 : Aktif güç, faz açısı ilişkisi.....	8
Şekil 2.4 : Reaktif güç kompanzasyonu örneği .....	10
Şekil 2.5 : Faz farkının olmadığı örnek bir ideal gerilim-akım grafiği.....	10
Şekil 2.6 : Kompanzasyondan önce şebekede güç dolaşımı.....	11
Şekil 2.7 : Kompanzasyondan sonra şebekede güç dolaşımı.....	11
Şekil 2.8 : Bir tüketicinin dağıtım hattından beslenmesi durumu.....	13
Şekil 2.9 : Gerilim düşümü üzerindeki güç katsayısı etkisinin fazör gösterimi.....	15
Şekil 2.10 : Aktif güç sabit olduğunda reaktif güç ihtiyacının belirlenmesi.....	17
Şekil 2.11 : Görünür güç sabit olduğunda reaktif güç ihtiyacının belirlenmesi.....	18
Şekil 2.12 : Reaktif güç kontrolörü bağlantı şekli.....	19
Şekil 2.13 : Bireysel kompanzasyon tek hat şeması örneği.....	20
Şekil 2.14 : Grup kompanzasyon tek hat şeması.....	21
Şekil 2.15 : Merkezi kompanzasyon tek hat şeması.....	21
Şekil 2.16 : Güç sistem kararlılığı topolojisi.....	23
Şekil 2.17 : Genel elektrik dağıtım güç sistemi şeması.....	26
Şekil 2.18 : 500 Kv statik VAr kompanzasyon tesisi, Maryland ABD.....	27
Şekil 3.1 : Değişik tiplerde SVC şalt tesisleri.....	31
Şekil 3.2 : SVC V-I eğrisi.....	32
Şekil 3.3 : (a) SVC temel devre şeması (b) basitleştirilmiş devre modeli.....	33
Şekil 3.4 : Modellenen SVC sistemi.....	35

Şekil 3.5 : Modellenen sistemin simulink şeması.....	36
Şekil 3.6 : Modellenen SVC kontrol sistemi.....	36
Şekil 3.7 : SVC suseptans kontrol devresi.....	38
Şekil 3.8 : Modellenen sistemin V-I eğrisi.....	39
Şekil 3.9 : Tetikleme birimi.....	40
Şekil 3.10 : Tetikleme birimi iç yapısı.....	41
Şekil 3.11 : TCR bağlantısı.....	42
Şekil 3.12 : TSC bağlantısı.....	42
Şekil 3.13 : Modellenen sistem sonuçları.....	43
Şekil 3.14 : Modellenen sistemde kullanılan tcr gerilim – akım dalga şekli.....	44
Şekil 3.15 : Tristör kontrollü reaktör ve reaktörlerin saha uygulaması gösterimi.....	45
Şekil 3.16 : Farklı tetikleme açılarında tristör kontrollü reaktörün akım gerilim grafikleri.....	47
Şekil 3.17 : Tablo 3.2’de belirtilen TCR tabanlı SVC tek hat şemaları.....	49
Şekil 3.18 : TCR suseptansının tetikleme açısına göre değişimi.....	52
Şekil 3.19 : FC-TCR tek hat şeması ve dalga şekli.....	52
Şekil 3.20 : FC-TCR (a) prensip şeması, (b) reaktif güç kontrol aralığı, (c) suseptans aralığı.....	53
Şekil 3.21 : (a) TSC temel devre şeması (b) akım-gerilim dalga şekilleri.....	54
Şekil 3.22 : Statcom devre şeması.....	55
Şekil 3.23 : Statcom V-I karakteristiği genel gösterimi.....	55
Şekil 3.24 : Statcom (a) ve Svc (b) V-I karakteristikleri.....	57
Şekil 3.25 : Statcom (a) ve Svc (b) V-Q karakteristikleri.....	57
Şekil 3.26 : TCSC tek hat şeması.....	58
Şekil 3.27 : TCR endüktans değişimi şematik gösterimi.....	59
Şekil 3.28 : TCSC eşdeğer devresi.....	59
Şekil 3.29 : İki makine iletim hattı.....	60
Şekil 3.30 : Seri kapasitörlü iki makine iletim hattı.....	60
Şekil 3.31 : Sssc tek hat şeması.....	61
Şekil 3.32 : Upfc tek hat şeması.....	62
Şekil 4.1 : Üç fazlı kısa devre durumunun gösterimi.....	64
Şekil 4.2 : Faz – toprak kısa devre durumunun gösterimi.....	65

Şekil 4.3 : Faz-faz kısa devre durumunun gösterimi.....	65
Şekil 4.4 : İki faz – toprak kısa devre durumunun gösterimi.....	66
Şekil 5.1 : SVC bağlanan iki makinalı sistem tek hat şeması.....	67
Şekil 5.2 : STATCOM bağlanan iki makinalı sistem tek hat şeması.....	67
Şekil 5.3 : Tasarlanan sistemin simulink diagramı.....	68
Şekil 5.4 : Generatörlerin kontrol sistemi.....	69
Şekil 5.5 : SVC sistemi asimetrik hata durumunda sistemin blok diagramı.....	70
Şekil 5.6 : SVC sistemi 2L-G hatası durumunda iki generatör arasındaki açı farkı.....	71
Şekil 5.7 : SVC sistemi hata anında generatörlerin rotor hız salınımları.....	71
Şekil 5.8 : SVC sistemi hata anındaki bara gerilimleri.....	72
Şekil 5.9 : SVC sisteminde güç akışı.....	72
Şekil 5.10 : SVC sistemi 3L-G hatası durumunda iki generatör arasındaki rotor açı farkı.....	73
Şekil 5.11 : SVC sistemi 3L-G hatası durumunda generatörlerin rotor hızları.....	74
Şekil 5.12 : SVC sistemi 3L-G hatası durumunda bara gerilimleri.....	74
Şekil 5.13 : STATCOM sistemi asimetrik hata durumunda sistem blok diagramı.....	75
Şekil 5.14 : STATCOM sistemi 2L-G hatası durumunda iki generatör arasındaki rotor açı farkı.....	76
Şekil 5.15 : STATCOM sistemi hata anında generatörlerin rotor hız salınımları.....	77
Şekil 5.16 : STATCOM sistemi hata anında generatörlerin bara gerilimleri.....	77
Şekil 5.17 : STATCOM sisteminde güç akışı.....	78
Şekil 5.18 : STATCOM sistemi 3L-G hatası durumunda iki generatör arasındaki rotor açı farkı.....	79
Şekil 5.19 : STATCOM sistemi 3L-G hatası durumunda generatör hızları.....	79
Şekil 5.20 : STATCOM sistemi hata anında bara gerilimleri.....	80
Şekil 5.21 : STATCOM sistemi 3L-G hatası durumunda güç akışı.....	80

# SİMETRİK VE ASİMETRİK ARIZA DURUMLARINDA ESNEK ALTERNATİF İLETİM SİSTEMİ CİHAZLARININ KARARLILIĞA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

## ÖZET

Günümüzde enerji kaynakları, fosil yakıtların azalması nedeniyle azalmakta buna rağmen enerji ihtiyacı ise her an artmaktadır. Dolaylı olarak da olsa elektrik enerjisi arzının çoğu fosil yakıtların tüketimi ile karşılanmaktadır. Günlük yaşamda kullandığımız elektrik enerjisi insanlık için hayati önem taşımaktadır. Bu nedenle sahip olduğumuz kaynakları optimum faydayla kullanmak çok önemlidir. Elde edilen elektrik enerjisinin verimli kullanımı için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan en önemlileri ise güç kalitesini artıran veya düzenleyen çalışmalardır.

Elektrik enerji sistemlerinin daha verimli hale getirilmesi, kararlılığın sağlanması ve güç kalitesinin artırılması amacıyla geleneksel çözümlere alternatif olarak FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) adı verilen sistemler geliştirilmiş ve bu sistemler ülkemizde dâhil olmak üzere dünyanın farklı bölgelerinde kullanılmaya başlanmıştır. FACTS cihazları genel olarak alternatif akım sistemlerinde empedans, gerilim ve faz açısı kontrolü sağlayan sistemler olarak tarif edilebilir. Son dönemde yapılan çalışmalarda, güç sistemlerinde kaliteyi sağlamak için statik senkron kompanzator, statik VAR kompanzator gibi modern teknolojiye sahip cihazların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu sistemlerin en önemli özelliği sistemden bir aktif veya reaktif güç çekme gereksinimi duymadan kompanzasyon yapabilmelerinin yanında sistemin güç transferine veya kararlılığına yaptığı olumlu etkilerdir.

Bu tez çalışmasında yapılan ilk çalışmada TCR ve TSC yapılarıyla oluşturulmuş statik VAR kompanzatorü tasarlanarak sistemin çalışması gözlemlenmiştir. Bu çalışmada SVC'nin kaynaktan her hangi bir güç ihtiyacı duymadan tamamen statik elemanlar üzerinden gerekli olan reaktif enerji ihtiyacını karşıladığı görülmüştür. Bu sayede sistemdeki gereksiz yüklenmelerin önüne geçilmiştir.

Yapılan ikinci çalışmada ise iki makinalı bir sistemde asimetrik ve simetrik hata durumlarında iletim hattının ortasına şönt bağlanan SVC ve STATCOM'un sisteme etkileri değerlendirilmiştir. Simulasyon çalışmalarında STATCOM'un SVC'den daha üstün özellikler sergilediği görülmüştür.

Bu tez çalışmasında; enerji verimliliğinin artırılması, birim üretim başına enerji maliyetlerinin düşürülmesi, gerilim ve açı kararlılığının sağlanması gibi nedenlerle yarı iletken kontrollü kompanzasyon sistemleri tavsiye edilmektedir.

Anahtar kelimeler: Svc, statkom, statik var kompanzasyonu, tkr, tak, güç kalitesi, reaktif güç kompanzasyonu, enerji kalitesi.

# **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FLEXIBLE ALTERNATIVE CURRENT TRANSMISSION SYSTEM DEVICES ON STABILITY IN SYMMETRIC AND ASYMMETRIC FAILURE**

## **SUMMARY**

Today, energy resources are decreasing due to the decrease in fossil fuels, yet the need for energy is increasing at any time. Even indirectly, most of the electricity supply is met by the consumption of fossil fuels. The electrical energy we use in daily life is vital for humanity. Therefore, it is very important to use our resources with optimum benefit. Many studies have been conducted for the efficient use of the obtained electrical energy. The most important of these studies are those that increase or regulate power quality.

FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) have been developed as an alternative to traditional solutions in order to make electrical energy systems more efficient, to ensure stability and to increase energy quality, and these systems have been used in different regions of the world including our country. FACTS devices can generally be described as systems that provide impedance, voltage and phase angle control in alternating current systems. In the recent studies, the use of modern technology devices such as static synchronous compensator, static VAR compensator is becoming widespread in order to ensure quality in power systems. The most important feature of these systems is that they can compensate without the need to take active or reactive power from the system, as well as the positive effects of the system on power transfer or stability.

In the first study of this thesis, static VAR compensator formed by TCR and TSC structures was designed and the operation of the system was observed. In this study, it was found that SVC meets the reactive energy requirement completely through static elements without any need for power from the source. In this way, unnecessary loading in the system are prevented.

In the second study, the effects of SVC and STATCOM which are connected to shunt in the middle of transmission line in asymmetric and symmetrical error situations in a two machine system were evaluated. In simulation studies, STATCOM showed superior features than SVC.

In this thesis study; semiconductor controlled compensation systems are recommended for reasons such as increasing energy efficiency, reducing energy costs per unit production, and ensuring voltage and angle stability.

Keywords: Svc, statcom, static var compensation, tcr, tsc, power quality, reactive power compensation, energy quality



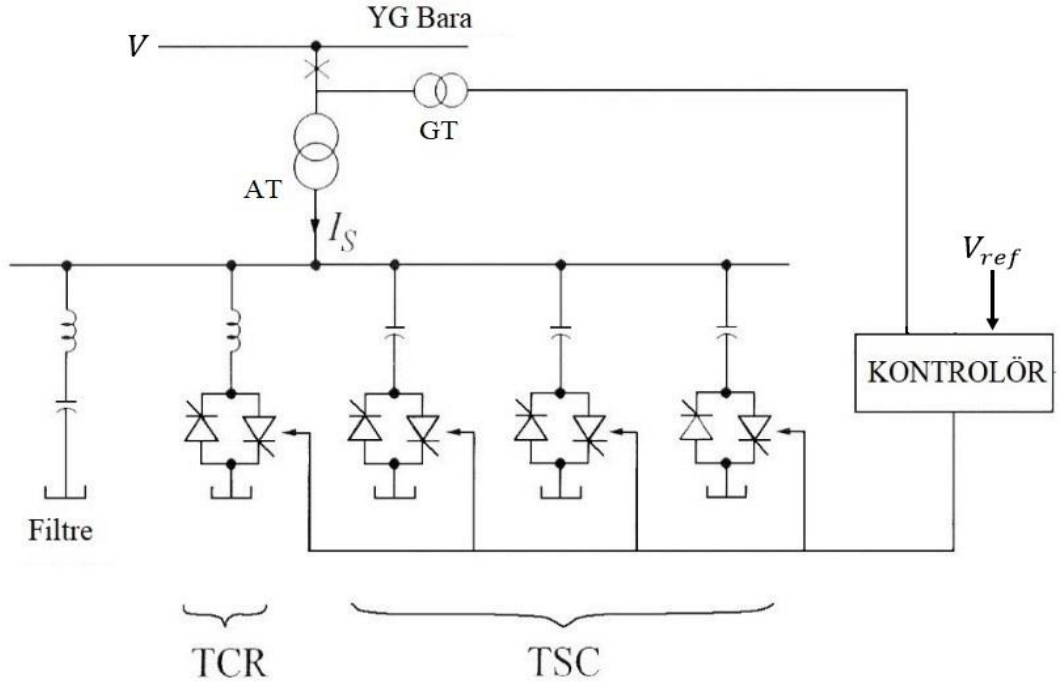
## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin yol açtığı yeniliklerin ışığında, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi doğal kaynaklardan sağlanan elektrik enerjisi üretim miktarı artırılmaya çalışılmaktadır. Fakat hâlihazırda diğer yollardan üretilen elektrik enerjisinin kalitesinin bozulmadan son kullanıcıya kadar ulaştırılması için, teknolojik gelişmelerden de faydalanarak çalışmalar devam etmektedir. Elektrik enerjisi ilk üretim yerinden son kullanıcı olan bizlere ulaşana kadar bazı kayıplara uğramaktadır. Bunları iletim ve dağıtım kayıpları olarak adlandırabiliriz. Aynı zamanda elektrik enerjisi ile çalışan bütün cihazlar şebekeden iş yapan güç olan aktif gücün yanında iş yapmayan ve şebekeye geri gönderilen reaktif güçte çekerler. Fakat bu reaktif güç her ne kadar iş yapmayan enerjiden oluşsa da alıcıların ihtiyacı gereği tamamen sıfırlanamaz. Bu nedenle bu reaktif enerji için belli yöntemler kullanılarak bazı düzenlemeler yapılır ve böylece alıcıların ihtiyacı olan reaktif güç ihtiyacı karşılanmış olur. Bu işleme reaktif güç kompanzasyonu adı verilmektedir (Al-Mubarak ve diğ., 2015). Reaktif güç, özellikle sanayi tesislerinin elektrik güç sistemlerinin tasarımı ve işletilmesinde göz önünde bulundurulması gereken önemli bir sorundur. Doğru tasarım yapılmadığı takdirde işletmeler cezalarla karşı karşıya kalmaktadırlar.

Enerji kalitesi; enerji sürekliliği, sabit şebeke frekansı, sürekli ve sinüsoidal şebeke gerilimi, güç faktörü değeri, faz gerilim-akımları dengesi ve harmonik bozulmalara bağlıdır. Bu kriterler arasında reaktif güç kompanzasyonu ile iyileştirilebilen güç kalitesinin büyük önemi vardır. Endüstride düşük güç faktörlü yüklerin yükü ve güç sistemlerinde doğrusal olmayan cihazların artışı nedeniyle, enerji üreten ve dağıtım yapan şirketler, ilave reaktif enerji üretmek ve yüksek kayıplarla iletim hatları üzerinden aktarmak zorundadırlar (Irmak ve diğ., 2016). Bu sebeple güç faktörünün iyileştirilmesi, maliyetlerin en aza indirilmesi ve enerji verimliliğinin sağlanması için bir zorunluluk

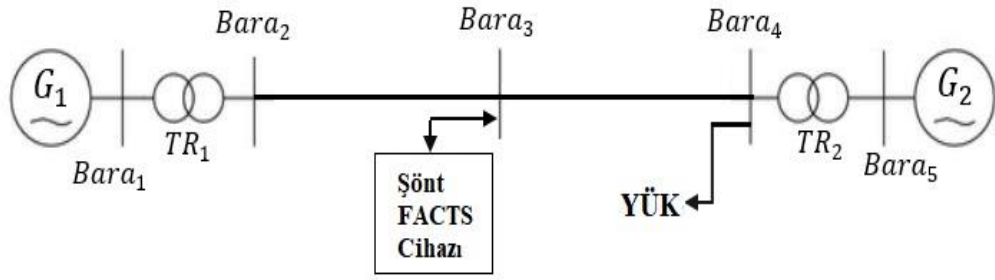
haline gelmiştir. Geleneksel kompanzasyon yöntemlerinin dezavantajlarının üstesinden gelmek için statik güç dönüştürücüleri önerilmiştir (Bilki, 2008). Statik VAR kompanzatorlarının (SVC) kullanımı 1970’li yılların başlarına dayanmakta olup günümüzde hala yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Mutluer, 2008).

Statik VAR kompanzatorları aynı zamanda FACTS (Flexible AC Transmission System) ailesine dâhildir. Bu çalışmanın 3.bölümünde Şekil 1.1’de görülen tarzda bir SVC modellenmiştir. Modellenen sistemde yarı iletken devre elemanı olan tristör ile kontrol edilen endüktans (TCR) ve yine yarı iletken devre elemanı olan tristör ile anahtarlanan kapasitans (TSC) kullanılmıştır. Yapılan bu benzetim çalışmasıyla temel statik VAR kompanzator sistemlerinin hızlı cevap verme özelliği gözlemlenmiştir.



Şekil 1.1 : Tasarlanan SVC sistemi (Albakkar, 2014).

Ayrıca bu çalışmanın 5. bölümünde Şekil 1.2’de gösterilen tarzda iki makinalı bir sistem tasarlanmıştır. Simetrik ve asimetrik hata durumlarında, sistemdeki makinelerin senkronizma durumları irdelenmiştir. Senkronizmanın bozulduğu zamanlarda sisteme şönt bağlanan FACTS cihazlarının sisteme etkileri ayrı ayrı irdelenmiştir.



Şekil 1.2 : Tasarlanan iki makinalı sistem.

SVC gibi FACTS (esnek alternatif akım iletim sistemi-flexible alternating transmission system) sistemlerinde reaktif güç tristörlerin tetiklenme açısının kontrolüyle sağlanır. Reaktif güç, tristörlerin tetikleme açısını kontrol ederek kontrol edilebiliyorken, tristörlerin tetiklenme açısını kontrol için farklı yöntemler, farklı yaklaşımlar vardır (George ve diğ, 2008). Statik VAR kompanzatorleri ile yapılan şönt kompanzasyonda kayıplar azalacağından sistem verimi artar (Patil ve diğ, 2013). Bu sayede transformatörlerin yüklenme kapasitelerinin artırılmasının yanı sıra şönt kapasitörler gerilim düşümlerini azaltarak, fider (bara) performansını da artırarak kararlılığı sağlarlar. Güç katsayısı ve sistem güvenliği artırıldığından alıcıların (yük) performansı ve verimliliği de artmış olur. Sistem kayıplarının düşmesinden dolayı enerji tasarrufu sağlanır ve düşük güç katsayısı cezalarının önüne geçilmiş olur.

Statik VAR kompanzatorlerinin birincil amacı, reaktif güç kompanzasyonu yaparak sürekli değişen yük ve sistem durumlarından etkilenen hat gerilimini kontrol etmektir. Bu reaktif kompanzasyon kapasitif veya endüktif şekilde olabilir. Ayrıca, SVC'ler voltaj ayar noktasına (baraya) ek kontrol sinyalleri koyarak güç sistemi salınımlarını iyileştirmek için kullanılabilir (Rahmani ve diğ, 2014). Statik VAR kompanzatorlerinin bazı özellikleri, gerilim dalgalanmalarının önüne geçerek gerilim kararlılığını sağlamak, yarı iletken elemanlarla kontrol sağlandığından esnek kontrol sağlamak ve yüksek sistem güvenliği gibi sıralanabilmektedir (Koyuncu, 2012). Güç kaynağının en önemli görevlerinden biri, müşterilere yüksek güç kalitesi sağlamak için gerilimi izin verilen sınırlar içinde tutmaktır. Modern dünyada elektrik talebindeki artış nedeniyle, mevcut sistem (iletim ağı) geçmişten daha fazla stres altında kalmaktadır. Böyle bir iletim ağı arıza veya beklenmedik olay anında kararsız hale gelir. Gerilim çökmesi, iletim şebekesinin kararsızlığı için ana faktörlerden biridir (Gelen ve Yalçınöz, 2010). Statik VAR

kompanzatörleri esas olarak, enerji kalitesi ile ilgili kuralları ve kısıtlamaları (aktif/reaktif oranı) yerine getirirken endüstriyel bir tesiste gerilim kararlılığını sağlayarak üretim kapasitesini artırmaya odaklanmıştır. Ayrıca statik VAr kompanzatörü kullanılarak yapılacak iyileştirmelerde aynı baradan beslenen farklı firmaların gerilim kararsızlığından etkilenmesinin de önüne geçilebilecektir. Ek olarak bu kompanzatörler her hangi bir bozulma anında geri dönüşleri bilgisayar veya uzaktan kontrol yöntemiyle yapılabildiğinden tesis duruşlarını en aza indirebilecektir. Demir çelik sektöründe faaliyet gösteren işletmelerde yapılan demir ergitme işlemi nedeniyle yüksek reaktif güç gereksinimi duyulduğundan, statik VAr kompanzatörleri özellikle böyle tesislerde tercih edilirler. Ülkemizde Erdemir ve İsdemir tesislerinde statik Var kompanzatörleri kullanılmaktadır. Bunlarla da sınırlı kalmayarak anlık reaktif güç gereksiniminin olduğu, hızlı devreye girip çıkan yüklerin çalıştırıldığı tesislerde de statik VAr kompanzatörleri kullanılmaktadır.

Devreye alma ve devreden çıkarma işlemleri, faz – faz, faz – toprak kısa devreleri gibi hata akımları ve diğer karışıklıklar sonucu reaktif güç ve gerilimde hızlı değişimler oluşur. Bu durum güç sistemlerinde aktif güç talebinde ani değişimlere neden olur. Aktif güç talebindeki ani değişimler, geçici frekans ve güç salınımlarına, güç üreticilerinin hızlarında değişimlere, toplam kayıpların artışına, gerilim yükselmelerine ve hatta güç sistemlerinde arızalara sebep olabilmektedir. Geleneksel reaktif güç kompanzasyonunda kontrolör olan rölenin hızı yeterli değildir. Aynı zamanda istenen reaktif güç değerine ulaşmak için gerekli olan kondansatör kademeleri hassas kompanzasyon değeri için yeterli olmayacaktır. Kondansatörleri anahtarlayan elektromekanik kontaktörler yapıları gereği sık arızalanmaktadırlar. Ek olarak Statik VAr kompanzatörleri, arıza sonrası geri dönüş gerilimlerinin stabilize edilmesi ve iletim hatlarındaki voltaj kararlılığının iyileştirilmesi için kullanılmaktadır (Gelen ve Yalçınöz, 2010). SVC, paralel veya seri reaktif güç cihazlarını, örneğin kondansatörü ve indüktörü elektronik anahtarlama cihazları (tristör) vasıtasıyla kontrol eder. Hem reaktif güç üreticisi hemde reaktif güç sönümleyicisi olan SVC'ler gerilim regülasyonu ve kompanzasyon için kullanılırlar (Esfahan ve Vahidi, 2010). SVC, yük geriliminde herhangi bir değişiklik olduğunda suseptansını değiştirerek osilasyonu sönümlemek üzere hat kompanzasyonunu sağlar (Koyuncu, 2012). Bir SVC'nin en temel yapısı sabit bir şönt kapasitör ve bir tristör kontrollü reaktörden oluşur (Esfahan ve diğ, 2010). Öte yandan tristör anahtarlama

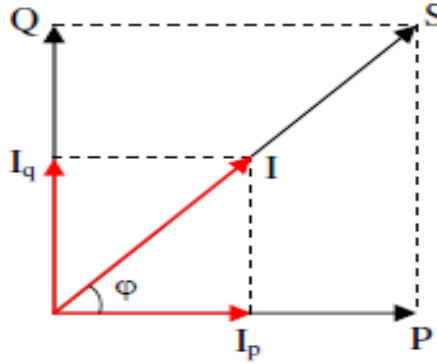
kondansatör (TSC), tristör kontrollü reaktör (TCR) olarak bilinen statik VAR kompanzatorleri ve bu ailenin yeni bir üyesi sayılan statik senkron kompanzator (STATCOM) genellikle PQ parametrelerini iyilestirmek ve bozucu etkileri azaltmak için kullanılırlar (Fang ve diğ, 2012). Çeşitli statik var kompanzatorleri arasında bulanık mantık kontrol teorisine de önem verilmiştir. Bulanık mantık, avantajların çeşitliliği nedeniyle dikkat çekmektedir ve geleneksel hesaplama yöntemlerinden daha gelişmiş avantajlar sunmaktadır (Memiş, 2007).



## BÖLÜM 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1. Genel Bilgiler

Elektrik devrelerinde temel olarak güç, kaynak gerilimi ve bu gerilimin sağladığı akımın çarpılması ile bulunur. Bu gücün işe yarayan (aktif) ve işe yaramayan (reaktif) bileşenleri bulunmaktadır. Elektrik devrelerinde sadece omik karakterde alıcılar olmadığından akım ve gerilim arasında bir faz farkı olacaktır. Bu faz farkı  $\cos\varphi$  (güç açısı) olarak adlandırılır.  $\cos\varphi = 1$  olduğunda sistemde sadece aktif güç dolaşır.  $\cos\varphi = 0$  olduğunda ise sistemde sadece reaktif güç dolaşacaktır.



Şekil 2.1 : Güç üçgeni gösterimi.

Fazör diyagramdaki büyüklüklerin tanımları ve formülizasyonu Denklem 2.1-2.8'deki gibi olacaktır. Bu fazör diyagramda;

Q: reaktif güç, P: aktif güç, S: görünür güç,  $I_q$ : reaktif akım  $I_p$ : aktif akım, I: görünür akım,  $\varphi$ : faz açısı

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = V.I \quad (2.1)$$

$$P = S \cdot \cos\varphi = V.I \cdot \cos\varphi \quad (2.2)$$

$$Q = S \cdot \sin\varphi = V \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (2.3)$$

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (2.4)$$

$$I_p = I \cdot \cos\varphi \quad (2.5)$$

$$I_q = I \cdot \sin\varphi \quad (2.6)$$

Akım ve gerilimin rms (tepe) değerleri ise Denklem 2.7 ve Denklem 2.8 kullanılarak bulunur.

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (2.7)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} \quad (2.8)$$

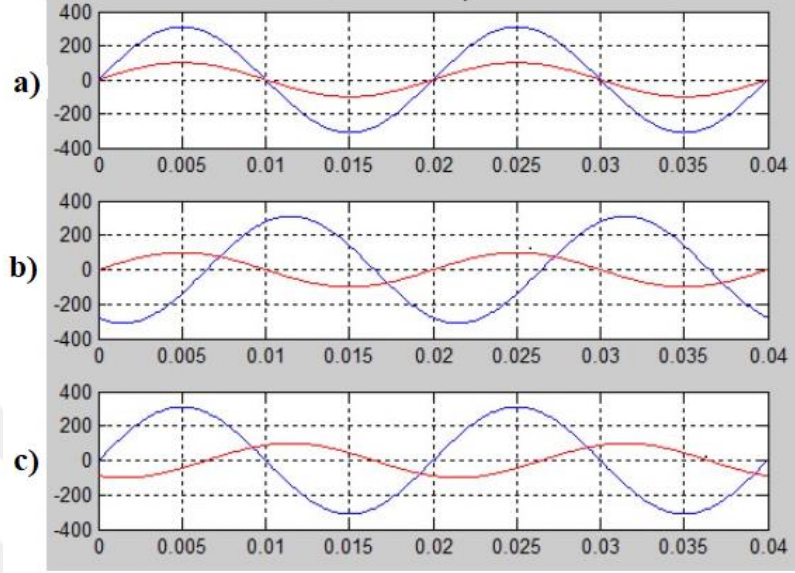
Fazör diyagramdan anlaşılacağı üzere aktif güç, görünür gücün akım ve gerilim arasındaki açının kosinüsü ile çarpımına eşit olur. Buradaki  $\varphi$  güç katsayısı olarak adlandırılır.

Elektrik enerjisi üretildiği yerden son kullanıcıya gelene kadar aktif ve reaktif akım bileşenleri ile ulaşmaktadır. İşe yaramayan ve tekrar sisteme iade edilen reaktif akım son kullanıcıya ulaşana kadar transformatörlerde, havai hatlarda, kablolarda kapasite artışına ve bu nedenle de kayıplara neden olmaktadır. Bu kayıplar yok edildiğinde aynı transformatör üzerinden daha fazla kullanıcı beslenebilecek, kablo kesitleri düşecek, şalt tesisi elemanlarının anma akım değerleri düşecektir. Böylece ekonomik olarak büyük maliyetlerin önüne geçilebilecektir. Tesislerde reaktif enerji ihtiyacının şebeke yerine kullanılacağı yerde oluşturulacak bir kompanzasyon sistemi üzerinden temin edilmesiyle, şebekeden gereksiz reaktif akım çekilmeyecek ve bahsettiğimiz bütün lüzensuz maliyetlerin önüne geçilebilecektir (Şekkeli ve Tarkan, 2005).

## 2.2. Aktif Güç (P)

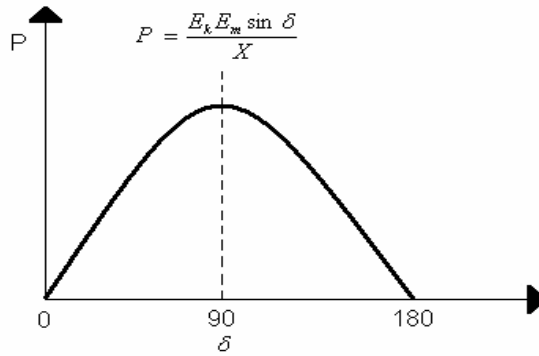
Elektrik devrelerinde asıl işi yapan, kullanılan güce aktif güç denilmektedir. Tek fazlı sistemler için Denklem 2.2'de formülize edilmiştir. Omik sistemlerde akım ile gerilim arasında faz farkı yoktur. Endüktif karakterli sistemlerde gerilim akımdan ileri fazlı, kapasitif karakterli sistemlerde ise gerilim akımdan geri fazlıdır. Şekil 2.2'de omik,

endüktif ve kapasitif özellikli sistemlerde akım ve gerilim arasındaki faz farklarının görüldüğü örnek bir grafik verilmiştir.



Şekil 2.2 : Omik (a), endüktif (b) ve kapasitif (c) sistemlerde akım ve gerilim arasındaki faz farklarının görüldüğü örnek grafik.

Aktif güç, kaynak gerilimi ile aktif akım bileşeninin çarpımına eşittir. Akımın aktif bileşeni  $I_p = I \cdot \cos\phi$  ifadesi ile bulunur. Aynı zamanda akımın reaktif bileşeni ise  $I_q = I \cdot \sin\phi$  ifadesi ile bulunur. Sadece aktif güç kullanan devrelere omik devre denilir. Sistemde faz farkı oluşturacak bir eleman bulunmadığından  $\cos\phi=1$  olur. Bu nedenle  $P = V \cdot I'$  dir. Aktif güç ile faz açısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3 : Akif güç, faz açısı ilişkisi (Kara, 2006).



### 2.3. Reaktif Güç (Q)

Alternatif akım sistemlerde alternans başında şebekeden çekilen, alternans sonunda ise şebekeye geri gönderilen iş yapmayan güçtür.  $Q$  harfi ile gösterilir. Birimi VAR'dır. Reaktif güç Denklem 2.3 ile formülize edilmektedir.

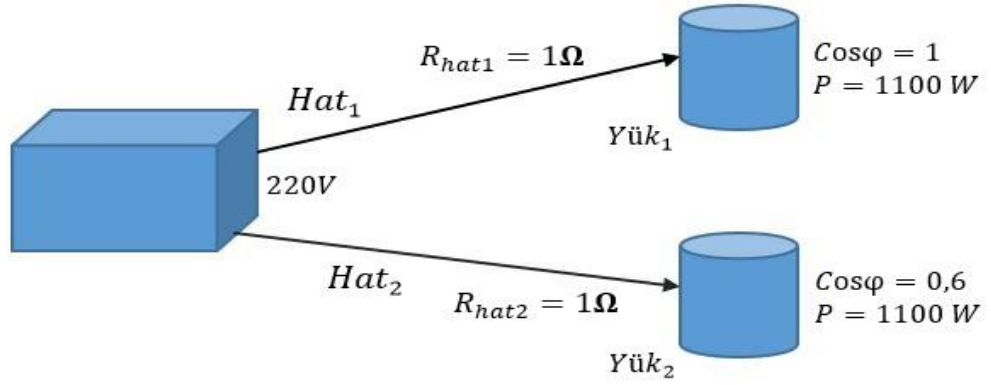
Omik devrelerde faz farkı olmadığından reaktif güç harcanmaz. Reaktif gücün harcanması için sistemlerde endüktif veya kapasitif özellik bulunduran elemanlar olmalıdır.

### 2.4. Görünür Güç (S)

Elektrik devrelerinde omik, endüktif ve kapasitif etki gösteren elemanlar bulunmaktadır. Direnç, endüktans ve kapasitans içeren elemanlardan oluşan devrelerde aktif ve reaktif güç birlikte kullanılır. Bu birlikte kullanılan güçlerin karelerinin köküne görünür güç denir. Görünür güç Denklem 2.1 ile formülize edilmektedir.

### 2.5. Reaktif Güç Kompanzasyonu

Bir elektrik sisteminde kaynak tarafından gönderilen gerilim ile yük akımı arasındaki açının kosinüsü güç faktörü (PF) olarak adlandırılmaktadır. Elektrik enerjisinin verimli kullanılması ilkesi gereği, yeni yapılan tesislerde veya hâlihazırda kullanmakta olduğumuz sistemlerde elektriksel kayıpların önlenmesi ve sistemlerin efektif çalıştırılması zorunlu bir hal almıştır. Bu nedenle yapılacak reaktif güç kompanzasyonu ile elektriksel kayıpların, aşırı yüklenmelerin ve ilave maliyetlerin önüne geçilebilir (Con, 2010). Elektrik sistemlerinde kullanılan endüktif ve kapasitif karakterli yüklerden dolayı sistemde akım ve gerilim arasında faz farkı oluşur. Bu faz farkını sıfıra (birbirine) yakın tutma işlemine kompanzasyon denir. Kompanzasyon işlemi sayesinde sistemde dolaşan reaktif, iş yapmayan akım azalacak ve sistemin aktif güç kapasitesi artacaktır. Daha önce belirtildiği gibi sistem daha verimli hale gelecektir. Endüktif ve kapasitif yüklerin oluşturduğu etki nedeniyle oluşan faz farkının sıfıra yaklaştırılması için yapılan işlemlere reaktif güç kompanzasyonu denilmektedir. Şekil 2.4'de reaktif güç kompanzasyonunun hat akımı ve kayıplar üzerine etkisi basitçe verilmiştir.  $Yük_2$ 'de güç faktörü ( $\cos\phi$ ) 1'e yakın tutulmuş olsaydı hattın yüklenmesinin daha düşük olacağı gösterilmiştir.

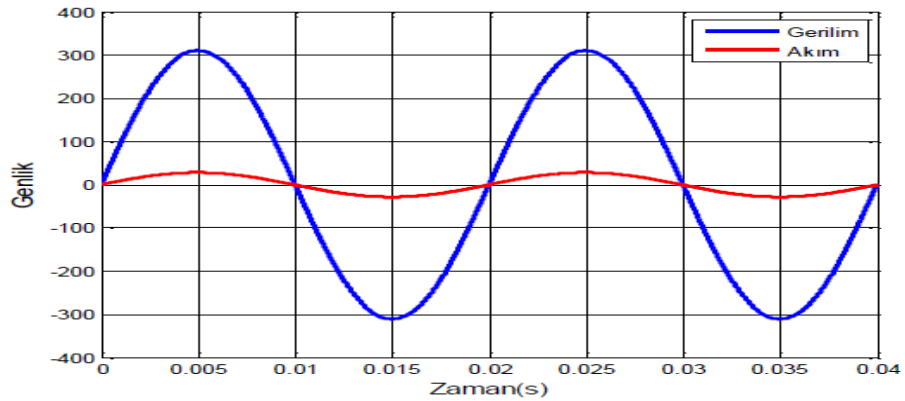


Şekil 2.4 : Reaktif güç kompanzasyonu örneği.

Şekil 2.4'deki diagrama göre Denklem 2.1 - 2.3'den faydalanılarak basit bir hesap yapılırsa kompanzasyon yapılan  $Yük_1$ 'in kayıplarının daha az olduğu görülmektedir.

	$Yük_1$	$Yük_2$
Aktif Güç (P)	1100 W	1100 W
$\cos\phi$	1	0,6
Görünür Güç (S)	1100 VA	1833 VA
Hat Akımı	5 A	8,33 A
Hat Kayıpları	25 W	69 W

Bu şekilde iyileştirilen hatlarda reaktif güç gereksiniminin güç faktörü iyileştirilerek karşılanmasının enerji dağıtımına yaptığı etkiler sonucunda Şekil 2.5'de görülen faz farkının olmadığı ideal koşullar oluşmuş olur.



Şekil 2.5 : Faz farkının olmadığı örnek bir ideal gerilim-akım grafiği.

Elektrik tesislerinin işletilmesinde en önemli maliyet kalemi ilk tesis maliyetidir. Bu nedenle mümkün olan en az devre elemanı kullanılarak kayıplar azaltılmalı, ilave maliyetlerden kaçınılmalıdır. Bu nedenle tüketiciler şebekeden çekecekleri reaktif güç yerine statik devre elemanı olan kondansatörler üzerinden bu ihtiyaçlarını karşılayabilirler. Bu statik elemanların anahtarlanmasıyla reaktif güç elde etme yöntemine reaktif güç kompanzasyonu denilmektedir (Con, 2010). Şekil 2.6 ve 2.7’de reaktif güç kompanzasyonu yapılmamış ve yapılmış sistemlere ait şebekelerde güç dolaşimleri temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Kompanzasyondan önce sistemde güç dolaşımı



Şekil 2.7: Kompanzasyondan sonra şebekede güç dolaşımı

Ayrıca EPDK'nın 03/01/2013 tarihli ve 28517 (değişiklik) sayılı resmi gazetede yayımladığı elektrik iletim sistemi arz güvenilirliği ve kalitesi yönetmeliğinin dördüncü bölümü ve reaktif enerji kompanzasyonu başlıklı 11. maddesine göre; “iletim sistemine doğrudan bağlı tüketiciler ve dağıtım lisansına sahip tüzel kişiler tarafından; iletim sistemine bağlantıyla ilgili her bir ölçüm noktasında ve her bir uzlaşma periyodunda,

sistemden çekilen endüktif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı yüzde onbeşi, sisteme verilen kapasitif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı ise yüzde yirmiye geçemez” ( EPDK, 2004). Verilen tanımı formülize edecek olursak aşağıda verildiği gibi olacaktır.

$$\frac{\text{sistemden çekilen endüktif reaktif enerji}}{\text{sistemden çekilen aktif enerji}} \leq \%15$$

$$\frac{\text{sisteme verilen kapasitif reaktif enerji}}{\text{sistemden çekilen aktif enerji}} \leq \%20$$

Reaktif güç kompanzasyonu uygulanarak son kullanıcı tesisin güç faktörü 1’ e yaklaştırılır. Ayrıca ilgili yönetmelikler gereği fazla reaktif güç kullanımı nedeniyle oluşabilecek ceza ödemelerinin önüne geçilir. Ayrıca aynı bara üzerinden beslenen kompanzasyon yapılmamış tesislerde oluşabilecek ani reaktif güç değişimleri bu baralardaki gerilimin değişmesine neden olur. Bu durum aynı noktadan beslenen diğer kullanıcıları da etkiler. Kompanzasyonun amaçlarından birisi de bu gerilim dalgalanmalarının önüne geçmektir (Engin, 2008).

### **2.5.1. Reaktif güç kompanzasyonunun faydaları**

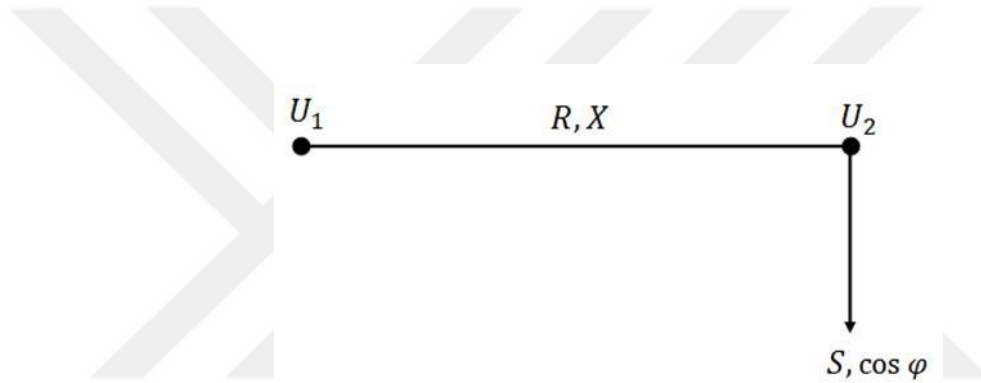
Reaktif güç kompanzasyonunun şebeke ve tüketici için olan faydalarını aşağıdaki gibi maddeler halinde sıralayabiliriz (Al-Mubarak ve diğ, 2015; Kara, 2016; Şekkeli ve Tarkan, 2005; Gökcan, 2018; Köse, 2014).

- Dağıtım noktalarında güç kapasitesi artışı nedeniyle ülke ekonomisi için önemli bir kazanç sağlar,
- Toplam çekilen akım azalacağından kayıplar azalır,
- Harmoniklerin azalması,
- Tesislerde gerilim düşümlerinin azalması,
- Yatırım maliyetlerinin düşmesi,
- Güç tasarrufu nedeniyle, son kullanıcıların faturadan tasarruf etmesi,
- Faz gerilim dengesizlikleri azaltılmış olur,
- Enerjisinin kalitesi sorunları nedeniyle oluşabilecek arızaların önüne geçilmesi,
- İletim hatlarının geçici durum kararlılığı iyileşir,

- Elektrik tesisi elemanları daha küçük kapasitede seçilebileceğinden, ekonomik olarak tasarruf sağlanır,
- İşletme maliyetleri azalır,

### 2.5.2. Sistem kapasitesine etkileri

Reaktif güç kompanzasyonu sayesinde şebekeden çekilecek reaktif akım kompanzasyon elemanı ile sağlanacağından, şebekeden çekilen bileşke akım azalacaktır. Böylelikle şebekede oluşabilecek aşırı yüklenme önleneceği gibi aynı şebeke üzerinde rezerv bir kapasite de sağlanmış olacaktır (Keçecioglu, 2012). Bu durum matematiksel olarak Şekil 2.8 deki gibi ifade edilir (Engin, 2008).



Şekil 2.8 : Bir tüketicinin dağıtım hattından beslenmesi durumu (Engin, 2008).

Şekil 2.8’de  $U_1$  hattın başındaki,  $U_2$  hat sonundaki monofaze gerilimler; R hattın omik değeri, X endüktif reaktansı; S, tüketicinin kullandığı görünür güç ve  $\cos \varphi$  ise tüketicinin güç katsayısıdır. Bu durumda aktif gücün sabit kalması durumuna göre hesaplamalar yapılırsa.

Kompanzasyondan önce çekilen görünür güç;

$$S_1 = \frac{P}{\cos \varphi_1} \quad (2.9)$$

ve kompanzasyon yapıldıktan sonra çekilen görünür güç;

$$S_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2} \quad (2.10)$$

olur. Buna göre kompanzasyondan önceki ve sonraki durumda görünür güçler arasındaki fark aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (2.11)$$

Bu değer, kompanzasyon öncesi değere oranlanırsa;

$$\% \Delta S = \left( \frac{\Delta S}{S_1} \right) \times 100 = \left( 1 - \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} \right) \times 100 \quad (2.12)$$

elde edilir. Bu durumda kompanzasyon yapıldığı için harcadığı güç  $\% \Delta S$  oranında azalır. Aynı şekilde gerektiği takdirde tesiste aşırı yüklenme yaşanmadan  $\% \Delta S$  kadar kapasitesi arttırılabilir. Tesise ilave bir hat kurulacağı düşünülecek olursa kompanzasyon sayesinde yeni yatırım yapmadan aynı bara üzerinden besleme alınabilir.

İkinci koşul olarak S görünür gücünün sabit kalmasının istendiğini varsayılırsa bu durumda yine benzer hesaplamalarla, kompanzasyon yapıldığı için aktif güç Denklem 2.13'de verilen oranda artar (Engin, 2008).

$$\% \Delta P = \left( \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} - 1 \right) \times 100 \quad (2.13)$$

### 2.5.3. Kayıpların azaltılması

Elektrik enerji sistemlerinde kayıplar akım bileşeni bağıntılıdır ve akımın karesi ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Isı enerjisi olarak meydana gelirler ve Denklem 2.14 ile ifade edilirler.

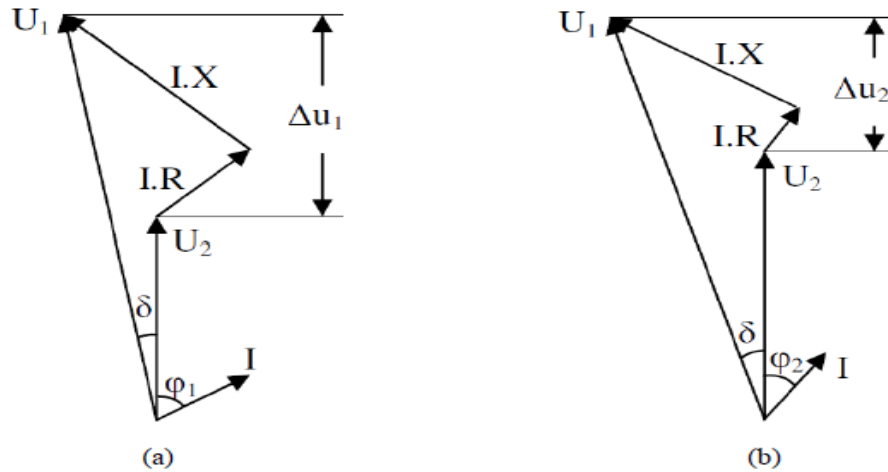
$$P_{kayıp} = I^2 \cdot R \quad (2.14)$$

Denklem 2.14 ile ifade edilen kayıplar enerji dağıtım sisteminde meydana gelen kayıpların büyük bir bölümünü oluştururlar. Termal ısıdan dolayı oluşan bu kayıplar kablo bağlantı noktalarında oluşan kayıplar, yer altı kablolarındaki zırh nedeniyle oluşan kayıplar, orta gerilim kablolarındaki ısınmaya bağlı kayıplar ve kablo reaktanslarından dolayı oluşan kayıplar bu sınıftandır (Yaşar ve diğ, 2010). Bu kayıplar enerji talebinin en çok ve en az olduğu saate, kablo kesitlerine, kablo uzunluklarına göre değişmektedir. Isı kayıpları toplam kullanılan enerjinin  $\%5$ 'i kadar bir değere sahiptir. Kompanzasyon sayesinde şebekeden çekilen toplam akım azalacağından ısınmaya bağlı kayıplar da azalmaktadır. Bu durum formulize edilecek olursa Denklem 2.15'deki gibi yazılabilir (Keçecioglu, 2012).

$$\text{Enerji Kayıpları} \sim \left( \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right) \quad (2.15)$$

#### 2.5.4. Gerilim düşümünün azaltılması

Enerji sistemlerinde transformatör ve generatörlerin kademeleri ayarlanarak gerilim kontrolü yapılmalıdır. Yani öncelikle doğru kademe seçimi yapılarak enerji dağıtımı yapılması gereklidir. Bu ayarlar yeterli olmadığı takdirde güç faktörü iyileştirme yoluna gidilmesi gerekir. Kompanzasyonda kullanılan kondansatörlerin gerilim yükseltici etkisi ile güç faktörü iyileştirilebilir (Güler, 1995). Elektrik tesislerinde endüktif karakterli bir sistemde kapasitif akım geçişi olursa giriş gerilimi, çıkış geriliminden düşük olacaktır. Fazör diyagramları ile güç katsayısının gerilim düşümü üzerindeki etkisinin gösterilmesi istenirse, Şekil 2.9'daki fazör diyagramları kullanılabilir. Kondansatör kullanıldığında sistem geriliminin yükseldiği görülmektedir. Fazör diagramında a: kompanzasyon yapılmadan önceki durum, b: kompanzasyon yapıldıktan sonraki durum, R ve X, omik ve endüktif dirençler,  $U_1$ : hat başı gerilimi,  $U_2$ : hat sonu gerilimi;  $\Delta u$ , boyuna olan gerilim düşümü ve  $\varphi$  faz açısıdır (Engin, 2008).



Şekil 2.9 : Gerilim düşümü üzerindeki güç katsayısı etkisinin fazör gösterimi.

#### 2.5.5. Şebekeden reaktif güç çeken alıcılar

Elektrik şebekesi kullanıcıları tükettikleri enerjinin türü bakımından 2 gruba ayrılabilir; İlk grupta saf omik güç tüketen yani sadece aktif enerji tüketen tüketiciler, ikinci grupta ise omik güç tüketmelerinin yanında kullandıkları cihazların karakteristik özellikleri

bakımından, manyetik veya statik alanla çalışan yani aktif gücün yanında reaktif güçte tüketen tüketicilerdir (Al-Mubarak ve diğ., 2015; Keçecioğlu, 2012). En önemli reaktif güç tüketicileri arasında aşağıda listelenen tüketiciler bulunmaktadır.

- Balastlar,
- Bobinler,
- Havai hatlar,
- Asenkron motorlar,
- Senkron motorlar,
- Civa buharlı ve sodyumlu lamba balastları,
- Doğrultucular,
- Elektrik makineleri,
- Endüksiyon ve ark fırınları,
- Kaynak makinaları,

Bu yükler işletmelerde harmonik üretimine ve akım darbelerine neden olurlar. Bu tip yüklerde reaktif güçteki değişim çok hızlıdır ve çektikleri reaktif güç değerleri de büyük değerler arasında değişmektedir. Dolayısıyla, kullanılacak reaktif güç kompanzasyon sistemleri çok kısa zamanda büyük miktarlarda değişimleri karşılamalıdır (Özaslan, 1997; Ersamut, 2009).

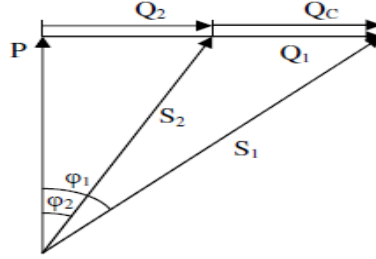
### **2.5.6. Reaktif güç ihtiyacının tayini**

Tüketiciler veya elektrik tesislerinin ihtiyacı olan reaktif enerjinin belirlenmesi için ilk olarak o kullanıcının hattan çektiği güç katsayısı ( $\text{Cos } \varphi_1$ ) ve görünür gücün bilinmesi gereklidir. Daha sonra güç katsayısının ulaştırılmak istendiği değer ( $\text{Cos } \varphi_2$ ) belirlenir ve bu değer genellikle 0,99-1 olarak alınır. Daha sonra gerekli olan reaktif gücü belirlemek için daha önce de belirttiğimiz iki yöntemden birisi kullanılır. Bunlar görünür güç veya aktif gücün sabit tutulması durumlarıdır (Bayram, 2000). İki seçenekten biri gerekli hesaplama yöntemleriyle birlikte, öncelikle tesisin ihtiyacına göre sonrasında ise tesisin talebi ve teknik uygulanabilirliğe göre değerlendirilerek en verimli ve en ekonomik çözüm uygulanır. Özetlenecek olursa işletmelerde kurulacak kompanzasyon sistem tasarımı; tesisteki yük dağılımına, reaktif güç ihtiyacının değişme durumuna, tesisteki flicker bozunumuna ve harmoniklerin sayısına bağlıdır (Engin, 2008).



### 2.5.6.1. Aktif gücün sabit olması durumu

Şebekeden  $\cos \varphi_1$  güç katsayısı ile çekilen aktif güç sabit tutularak sisteme reaktif güç sağlayacak elemanlar (kondansatör) eklenir. Böylelikle görünür güç düşer. Sistem fazör diagramı üzerinde Şekil 2.10' da olduğu gibi ifade edilebilir.



Şekil 2.10 : Aktif güç sabit olduğunda reaktif güç ihtiyacının belirlenmesi.

Fazör diagramında verilen geometrik şekilden anlaşılacağı üzere reaktif güç kompanzasyonu yapılmadan önceki görünür güç ( $S_1$ ) geri gelerek tesisin sistemden çektiği görünür güç azalmaktadır.

Fazör diagramı formülize edilerek gerekli kondansatör gücü bulunacak olursa; Kompanzasyon öncesi reaktif güç;

$$Q_1 = P. \tan \varphi_1 \quad (2.16)$$

Kompanzasyon sonrası reaktif güç;

$$Q_2 = P. \tan \varphi_2 \quad (2.17)$$

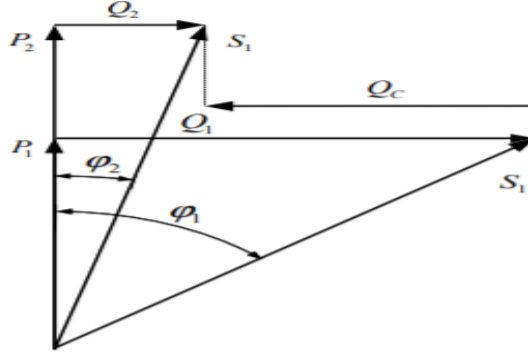
Bu değerler ışığında kompanzasyon için gerekli kondansatör gücü;

$$Q_c = P. (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = Q_1 - Q_2 \quad (2.18)$$

olarak ifade edilir.

### 2.5.6.2. Görünen gücün sabit olması durumu

Şebekeden çekilebilecek aktif güç, sistemin kompanzasyon sonrasındaki görünür (görünen) gücünde sabit tutulmasıyla artırılır. Sistem aşağıdaki fazör diyagramı ile ifade edilebilir (Engin, 2008).



Şekil 2.11 : Görünür güç sabit olduğunda reaktif güç ihtiyacının belirlenmesi (Ersamut, 2009).

Fazör diagramında verilen geometrik şekilden anlaşılacağı üzere reaktif güç kompanzasyonu yapılmadan önceki reaktif güç ( $Q_1$ ) geri gelerek tesisin şebekeden çekeceği aktif güç artırılır.

Fazör diagramı formülize edilerek gerekli kondansatör gücü bulunacak olursa; Kompanzasyon öncesi reaktif güç;

$$Q_1 = S \cdot \sin\varphi_1 \quad (2.19)$$

Kompanzasyon sonrası reaktif güç;

$$Q_2 = S \cdot \sin\varphi_2 \quad (2.20)$$

Gerekli kondansatör gücü ise;

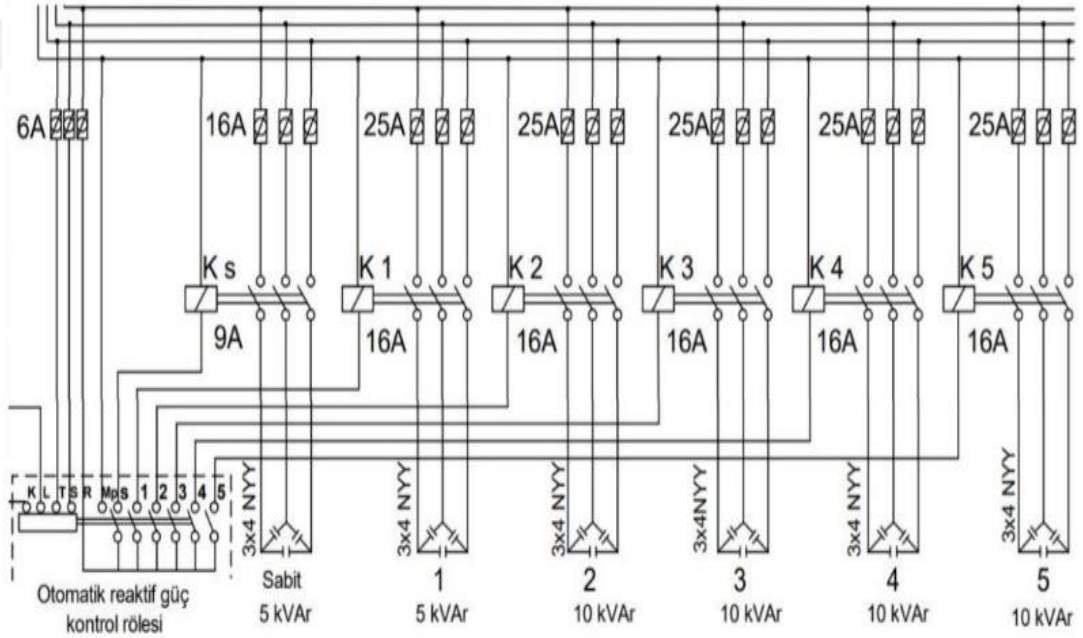
$$Q_c = S \cdot (\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2) = Q_1 - Q_2 \quad (2.21)$$

olarak ifade edilir.

### 2.5.7. Reaktif güç kompanzasyonu prensipleri

Doğrusal bir devrede reaktif güç, anlık gücün AC bileşeni olarak tanımlanır. AC güç kaynağı tarafından üretilen reaktif güç, bir periyodluk sürenin çeyreği boyunca bir kapasitörde veya bir reaktörde depolanır ve bir sonraki çeyrek döngüde güç kaynağına geri gönderilir. Bu nedenle VAR üreteçleri kullanılarak, yük (endüktif veya kapasitif) ve kaynak arasında reaktif güç gidip gelmeden kompanzasyon yapılır. Paralel veya seri bağlanmış VAR üreteçleriyle reaktif güç kompanzasyonu yapılabilmektedir (Dixon ve diğ, 2005).

Reaktif güç kompanzasyonu, dağıtım şebekesinin hem OG tarafında hem de AG tarafında yapılabilir. Çoğunlukla, OG tarafta yapılan reaktif güç kompanzasyonu kVAr başına birim maliyet açısından AG kompanzasyondan daha ucuzdur. Öte yandan AG kompanzasyon tesislerinin kurulumu ve işletilmesi daha kolaydır (Keçecioglu, 2012). Tüketiciler bireysel kompanzasyon yapabilecekleri gibi, grup olarak veya merkezi bir kontrol altında merkezi kompanzasyon da yapabilirler. Bu sayılan bütün yöntemlerin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bahsedilen reaktif güç kompanzasyonunda şalt devre elemanlarının devreye girip çıkması için reaktif güç kontrol röleleri kullanılmaktadır. Şekil 2.12’de bir reaktif güç kontrolörünün bağlantı şekli gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : Reaktif güç kontrolörü bağlantı şekli.

## 2.6. Kompanzasyon Tesis Çeşitleri

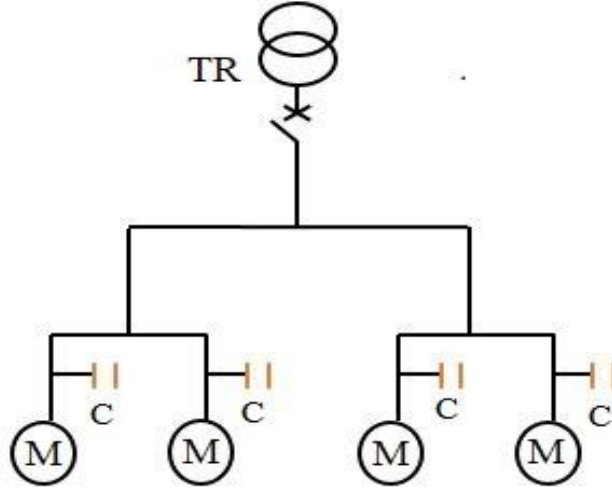
### 2.6.1. Bireysel kompanzasyon

Alıcıların tekil olarak kompanze edilmesi mantığına dayanır. Transformatör, motor vb. gibi alıcılara şönt bağlanacak bir kapasitör ile bireysel kompanzasyon yapılmış olur. Kompanze edilen eleman ile kapasitör birlikte devreye girip birlikte devreden çıkarlar bu nedenle ilave bir kontrolör gerekmemektedir. Bazı büyük sanayi tesislerinde özellikle de demir çelik, çimento, kâğıt fabrikası gibi genellikle büyük güçlü motorların kullanıldığı

tesislerde, devreye girme zamanı belli olmayan elektrik motorlarının kalkış anlarında şebekeden büyük miktarda akım çekerler. Böyle durumlarda otomatik kompanzasyon sistemi tesis edilmiş de olsa, böyle kısa süren aşırı yüklü durumları (5-8 saniye) ilk anda gecikme ile algılayacağından, kondansatörler devreye girene kadar motor devreye girmiş olacaktır. Genellikle böyle durumlarda otomatik kompanzasyon sistemi arzu edilen kontrolü sağlamada gecikeceğinden bireysel kompanzasyon tercih edilir. Dezavantaj olarak kullanıldığı cihaz üzerinde kararsızlığa neden olabileceği söylenebilir.

Bireysel kompanzasyon uygulamanın bazı avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Gökcan, 2016; Keçecioglu, 2012).

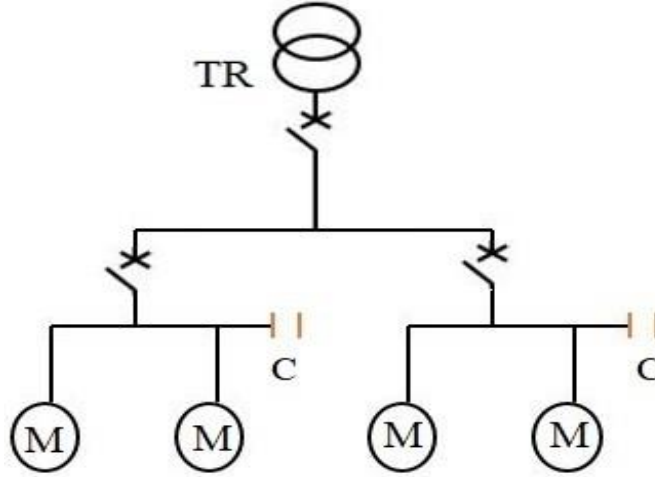
- Elektromekanik anahtarlama elemanı maliyetlerinden kurtarır.
- Sistemde kullanılan kablolarda aktif güç kayıplarını azaltır.
- Görünen güç (kVA) talebi azalır.
- Sistemde reaktif akım dolaşımı azalacağından kablo kesitleri düşer, kayıplar azalır. Tasarruf sağlar.
- Reaktif enerji alıcıların yanında tesis edileceğinden, sistemde fazla reaktif akım akışı olmaz.



Şekil 2.13 : Bireysel kompanzasyon tek hat şeması örneği.

### 2.6.2. Grup kompanzasyon

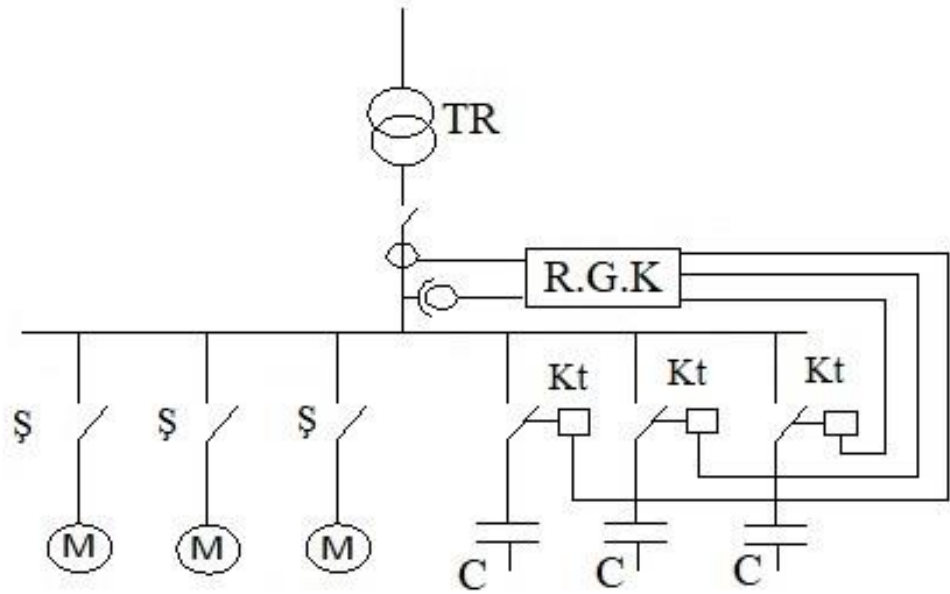
Şekil 2.14’de görüldüğü gibi aynı şalt cihazı ile kontrol edilen alıcıları kompanze etmek için kullanılır. Kompanze edilen cihazlar üzerinde bazı kararsız durumlara sebep olabilir.



Şekil 2.14 : Grup kompanzasyon tek hat şeması.

### 2.6.3. Merkezi kompanzasyon

Fabrika, otel, hastane gibi büyük ve tek merkezden kontrol edilmek istenen sistemler için uygulanan kompanzasyon yöntemidir. Şekil 2.15’de görüldüğü gibi bir reaktif güç kontrol rölesi kullanılarak kapasitörlerin devreye alınıp çıkarılmasıyla gerçekleştirilir. Bu bahsedilen rölenin önceden ayarlanması ile belirli bir sırayla kapasitörler devreye alınarak aynı anda hem monofaze hem de trifaze yükler için kompanzasyon yapılır. Düşük veya aşırı kompanzasyon engellenir.



Şekil 2.15 : Merkezi kompanzasyon tek hat şeması (Şekkeli, 2005).

Aşırı kompanzasyon kavramının tanımı yapılacak olursa; bir transformatör istasyonunun beslediği tüketicilere bireysel kompanzasyonda bahsedildiği gibi büyük ve sabit güçlü bir kondansatör grubu paralel bağlanırsa, tüketici gücünde azalma olması halinde transformatörün yüksek gerilim tarafı kondansatörden dolayı reaktif güçle beslenir. İşte bu durum aşırı kompanzasyon olarak adlandırılır (Bayram, 2000). Böyle durumlarda alıcı terminallerinde önemli gerilim artışları olacaktır ve bu artış istenmeyen durumlara neden olarak şalt tesisi elemanlarına veya kompanze edilen cihazlara zarar verebilir.

## 2.7. Güç Sistem Kararlılığına Genel Bakış

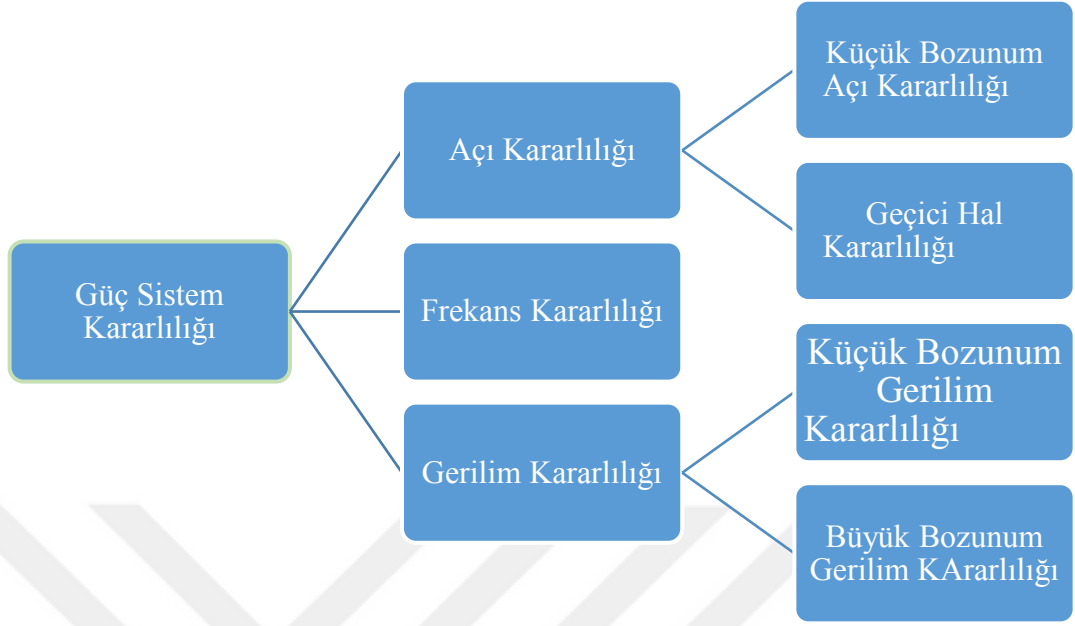
Güç sistem kararlılığı 1920'li yıllardan bu yana güç sistemlerinin güvenli bölgede çalışması açısından çok önemli bir sorun olarak kabul edilmiştir. Güç sistem kararsızlığının neden olduğu birçok sorun (büyük elektrik kesintiler-blackout) bu konunun önemini ortaya koymuştur. 31 Mart 2015 tarihinde ülkemizin büyükşehirlerinde yaşanan eş zamanlı elektrik kesintileri bu duruma örnek olarak verilebilir.

Kararlılığın en önemli değişkenleri; frekans, gerilim ve açı olarak sıralanabilir. IEEE standartlarına göre güç sistem kararlılığı şu şekilde tanımlanır: güç sistemi kararlılığı, bir elektrik enerjisi sisteminin, belirli bir ilk çalışma koşulu için, çoğu bozulmaya maruz kaldıktan sonra çalışma dengesini yeniden kazanma kabiliyetidir. Tipik bir modern güç sistemi, dinamik tepkisi farklı özelliklere ve yanıt oranlarına sahip çok çeşitli cihazlardan etkilenen, yüksek dereceli, çok değişkenli bir sistemdir. Kararlılık, karşıt güçlerin arasındaki bir denge şartıdır (Rajendra, 2016). Şekil 2.16'da güç sistem kararlılığı genel şeması verilmiştir.

- Açık kararlılığı: sistemin rotor senkronizasyonunu sürdürme yeteneği,
- Frekans kararlılığı: sistemin frekansını belli bir aralıkta tutabilme yeteneği,
- Gerilim kararlılığı: sistemin geriliminin kabul edilen aralıkta tutabilme yeteneği

olarak tanımlanabilir.

Bu bahsedilen kararlılık limitleri enerji piyasaları düzenleme kurumunun (EPDK) resmi gazetede yayımlanan ilgili yönetmeliklerinde belirtilmiştir.



Şekil 2.16 : Güç sistem kararlılığı topolojisi (Rajendra, 2016)

### 2.7.1. Gerilim ve frekans sınırları

İletim sisteminin nominal gerilimleri 380 kV, 154 kV ve 66 kV'dir. Nominal işletme koşullarında; 380 kV'lik iletim sistemi 340 kV ile 420 kV, 154 kV'lik iletim sistemi ise 140 kV ile 170 kV aralıklarında çalıştırılır. 66 kV ve altındaki iletim sistemi için gerilim değişim aralığı  $\pm \% 10$ 'dur. Ayrıca, iletim sistemi içerisindeki mevcut dağıtım seviyesi ve iç ihtiyaçlar için gerilim seviyeleri 34.5 kV, 33 kV, 31.5 kV, 15.8 kV, 10.5 kV ve 6.3 kV'dir. Sistemin nominal frekansı TEİAŞ tarafından 50 Hertz etrafında 49.8 - 50.2 Hz aralığında kontrol edilir. İşletme sınırı 10 dakikadan daha uzun süre geçilemez. Normal sistem işletmesi ve otomatik üretim kontrolü için hedef sistem frekansı 49.95 - 50.05 Hz arasındadır.

Çeşitli üretim ve/veya talep kaybı durumları için frekans sapsmaları;

a) Puant yükte  $\pm 600$  MW'tan  $\pm 770$  MW'a kadar olan üretim veya talep değişimlerinde  $\pm 0.8$  Hz'den,

b)  $\pm 200$  MW'tan  $\pm 600$  MW'a kadar olan üretim veya talep değişimlerinde  $\pm 0.5$  Hz'den,

c)  $\pm 200$  MW'ı geçmeyen üretim veya talep değişimlerinde  $\pm 0.2$  Hz'den, daha fazla olamaz ve bu limitler 60 saniyeden daha uzun bir süre ile aşılamaz.

Üretim tesisleri; elektrik sisteminin tamamen veya kısmen istem dışı enerjisiz kalması gibi durumlarda, frekansın 52.0 Hz'e yükselebileceği veya 47 Hz'e düşebileceği göz önünde bulundurularak, Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği hükümleri çerçevesinde tasarımılandırılır (EPDK, 2014).

## **2.8. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS)**

Günümüz enterkonnekte sistemi, sistem doğası ve tüketicilerin talepleri nedeniyle oldukça karmaşıktır. İletim ve dağıtım sistemleri çalışması sırasında en önemli unsur güvenilirlik ve sağlamlıktır. Enterkonnekte sistem içerisinde birçok yönden birbirine bağlı olan sistemin kararlılığını sağlamak ve korumak çok zor bir iş haline gelmiştir. Bu zorluklara karşı bir önlem olarak ise esnek alternatif akım iletim sistemleri (flexible alternating current transmission system - FACTS) cihazları önerilmiştir (Hatziaioniu ve Funk, 1996). FACTS cihazları paralel bağlı kontrolörler sayesinde kritik baralara gerilim desteği sağlayabilirler aynı şekilde seri bağlı kontrolörler sayesinde ise kritik baralarda (iletim hatlarında) güç akışını düzenleyebilirler. Tanımda bahsedilen esneklik, hat geriliminde veya kontrol noktalarında oluşabilecek herhangi bir istenmeyen duruma sistemin hızlı cevap verebilmesidir. Diğer bir ifadeyle FACTS cihazları, zayıf alternatif akım sistemlerinin performansını artırmak ve uzun alternatif akım hatları üzerinden iletim kapasitelerini iyileştirmek için geliştirilmiştir (Mehdi ve diğ, 2016). FACTS cihazları önceki yıllarda bazı uygulamalarda kullanılmakla birlikte, bu terim 1990'lı yıllarda elektrik bilimi literatürüne geçmiştir. Bu teknoloji, günümüzde mekanik olarak alternatif akım güç iletim sistemlerinin sınırlılıklarını aşmak amacı ile kullanılmaktadır. Mikro elektronik ve güç elektroniği ile ilerleyen bu teknolojilerin bileşik etkisi FACTS cihazlarını daha güvenli ve etkin bir hale getirmiştir. Alternatif akım güç sistemlerinde kompanzasyonun yarı iletken devre elemanları ile yapılması halinde, gerilim çökmelerinin önüne geçilebileceği, geçici ve dinamik kararlılığın iyileştirilebileceği değerlendirilmiştir (Kıyan, 2010). Esnek alternatif akım iletim sistemi, alternatif akım sisteminin iletilebilir güç sınırını ve kontrol edilebilirliğini artırmak için yarı iletken güç



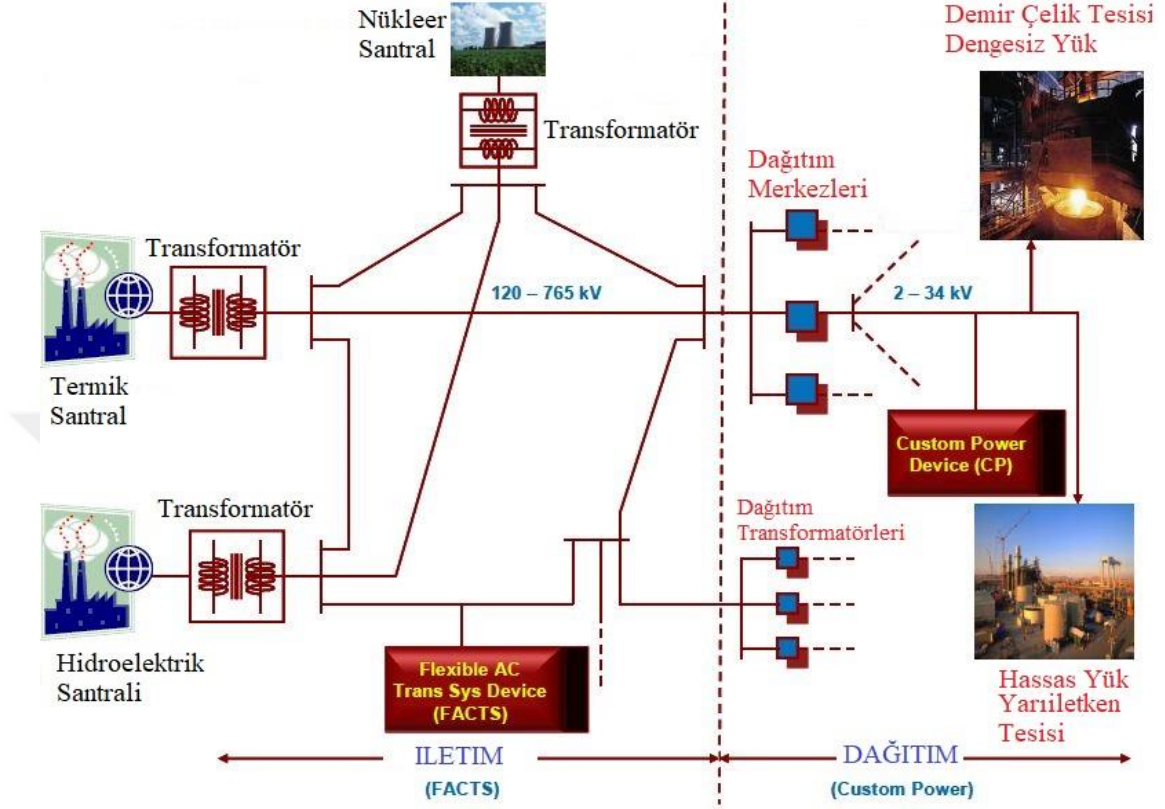
elektroniği devre elemanları kullanımını ön gören bir kavramdır. Yarı iletken teknolojisinin gelişmesi, özellikle tristör teknolojisi kullanımının artmasıyla, tristörün anahtarlama kapasitesini kullanan enerji sistemleri endüstride yaygın kullanım alanı bulmuştur. FACTS cihazları, mevcut sistemin kendi ısı kapasitesinin altında çalıştığı durumlarda, varolan iletim imkânlarıyla daha çok enerji taşınmasına izin vererek sistemin iletim kapasitesini artırır ve yeni iletim hatlarının inşa edilmesini erteleyebilir (Tozar, 2001). Diğer bir ifadeyle FACTS cihazları iletim sistemi kapasitesi ve kararlılığını güç elektroniği devre elemanlarıyla artıran sistem bütünüdür denilebilir.

FACTS teknolojisinin ana amacı sistemi kontrol altında tutarak güç transferinin sınırlar dâhilinde maksimum iletimini sağlamak ve ayrıca taşıma kapasitesinin belirli ölçekte artırılmasını sağlamaktır. Günümüzün iletim sistemleri büyük ve mekanik kontrollüdür. FACTS teknolojisi yarı iletken güç elektroniği teknolojisine dayalı çeşitli tristör cihazlarından oluşmuş mikroelektronik, haberleşme ve ileri kontrol uygulamaları içeren bir teknolojidir. FACTS cihazları ile seçilen baradaki gerilimin değeri ve faz açısı anlık kontrol edilebilir. Güç akışı, merkezi bir kontrol birimi tarafından devamlı bir şekilde takip edilmektedir (Abacı, 2007).

FACTS cihazları güç iletim kontrolü ve gerilim kontrolü için kullanılan geleneksel donanımın yerini güç elektroniği tabanlı eşdeğer donanım ile almaktadır. FACTS kontrolörleri güç elektroniği tabanlı bir uygulama olduğu için geleneksel mekanik kontrolörlere göre daha hızlıdır. Esnek alternatif akım iletim sistemi (FACTS) kontrolörleri doğru parametrelerle ayarlandığında iletim sistemlerinin kararlı çalışma sınırlarını artırmaktadır (Ertay ve Aydoğmuş, 2012).

FACTS aygıtları, iletim hatlarının bir bütün olarak çalışmasını güç akışı kontrolü ve yüksek gerilim kararlılığını sağlayarak destekler; gerilim, faz açısı, akım, şönt empedans ve seri empedans gibi hat parametrelerini kontrol ederek aşırı yüklü hatlardaki yük akışını azaltır, sistem kararlılığını iyileştirir; hattı neredeyse anma kapasitesine yakın değerlerde yüklerken bara gerilimini istenen seviyede tutarak beklenmeyen olay anlarında güç sistemi güvenliğini sağlar (Kara, 2006). FACTS cihazlarının ana dezavantajı, güç sistemlerinin normal çalışma koşullarında güvenli, kararlı ve hızlı tepki vermesini sağlarken tesis maliyetlerinin yüksek olmasıdır (Mathad ve diğ., 2013). Elektrik güç

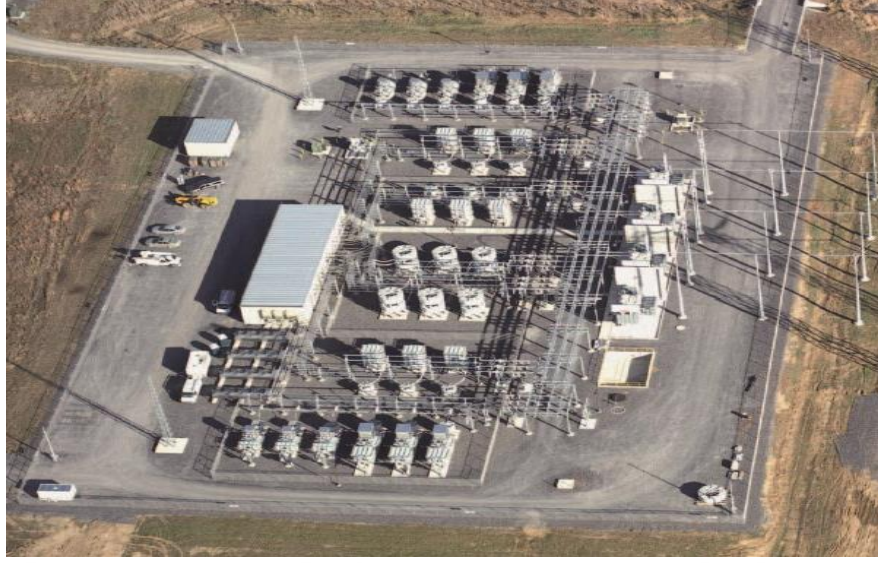
sistemleri genel olarak Şekil 2.17’de gösterilen şekilde iletim ve dağıtım olmak üzere iki bölüme ayrılır (Bharat, 2011).



Şekil 2.17 : Genel elektrik dağıtım güç sistemi şeması (Bharat, 2011).

Güç elektroniği cihazları kullanıldıkları yer ve fonksiyonlarına göre iki ana bölüme ayrılırlar. İletim tarafında kullanılanlara FACTS cihazları denilmektedir. Bu ailenin önemli bir üyesi olan SVC (statik VAR kompanzatorü) örneği Şekil 2.18’de gösterilmiştir. SVC’ler çok yüksek gerilim değerleri altında çalışabilmektedir. Sistem verimliliği, enerji iletim kapasitesi ve güç kalitesi üzerinde son derece pozitif etkileri bulunmaktadır. Şekil 2.17’de dağıtım tarafında tesis edilmiş olan CP (custom power device) FACTS cihazlarının özelliklerine sahiptir fakat daha düşük gerilim seviyeleri altında çalışabilmektedir (Bharat, 2011).

Esnek alternatif akım iletim sistemi cihazları, kompanzasyon yaparken reaktör veya kapasitör gruplarına ihtiyaç duymaksızın, dönüştürücü devreleri kullanarak, güç sistemi ile reaktif güç alışverişini yapabilmektedir (Karataş, 2011).



Şekil 2.18 : 500 Kv statik VAr kompanzasyon tesisi, Maryland ABD (Bharat, 2011).

### 2.8.1. Esnek alternatif akım iletim sistemlerinin özellikleri

Teknolojik gelişmeler, yapılan iyileştirmeler ve düzenlemeler ile iletim sistemleri giderek kendi termal ve gerilim kararlılığı limitlerine yaklaşırken güç kalitesine her geçen gün daha çok önem verilmektedir. Her ne kadar teknik anlamda limitlere ulaşmak üzere olsakta içinde bulunduğumuz ekonomik düzen bizi her zaman daha verimli ve kazançlı bir üretim, iletim ve dağıtım sistemi arayışına itmektedir.

Bu bağlamda FACTS cihazlarının avantaj ve dezavantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Kara, 2006; Keçecioğlu, 2012; Mutluer, 2008; Karataş, 2011; Tozar, 2001).

- Verimli güç akışı kontrolü
- İletim hatlarında kapasite artışı ve daha efektif kullanımı
- Artan sistem güvenliği ve güvenilirliği
- Reaktif güç akışını düzenleme
- Dinamik reaktif güç kontrolü
- Gelişmiş sistem kararlılığı
  - Gerilim kararlılığı
  - Sürekli durum kararlılığı
  - Dinamik kararlılık
- Geçici hal kararlılığı

- Yeni tesis edilecek birimlerinin eklenmesine olanak sağlama
- Ek olarak tesis edilecek iletim hattı ihtiyacının azalması
- Güvenli sistemler sunar.
- Sistemin bakımı ve onarımı kolaydır.
- Mevcut sistemlere uygulanmaları kolaydır.
- Çok hızlı kontrol sağlar.
- İletim sistemlerinin aşırı yüklenmesini önler.

Esnek alternatif akım iletim sistemlerinin bazı olumsuzlukları da bulunmaktadır. Sistem yüksek gerilimde kullanıldığından yalıtım problemleri ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca sistemi oluşturan ana elemanlar yarı iletken teknoloji ile üretildiklerinden ithal edilmeleri gerekmektedir. Yarı iletken elemanların yüksek gerilim altında çalışma koşulları gereği ısınma problemleri ortaya çıkacaktır ve bu nedenle ilave soğutma sistemleri tesis etmek gerekebilir.

### **2.8.2. Esnek alternatif akım iletim sistemi cihazları**

Esnek AA iletim sistemlerinde kullanılan başlıca yapılar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- STATCOM (Static Synchronous Compensator)
- TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)
- TCR (Thyristor Controlled Reactor)
- TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)
- SSSC (Static Synchronous Series Compensator)
- TSC (Thyristor Switched Capacitor)
- UPFC (Unified Power Flow Controller)
- IPFC (Interline Power Flow Controller)

Yukarıda bahsedilen bütün uygulamalarda bir FACTS kontrolörü enerji iletim ve dağıtımını kolaylaştırmak ve belirli iletim sınırlamalarını en aza indirmek için kullanılır ve yeteri kadar sistem güvenilirliği sağlar. Daha önce sıralanan sistemlerde oluşabilecek problemlerin bazıları ve FACTS cihazlarının sağlayacağı çözüm, geleneksel çözümlerle karşılaştırılmalı olarak Tablo 2.1’de verilmiştir (Ertay ve Aydoğmuş, 2012).

Tablo 2.1 : FACTS cihazlarının sürekli durum uygulamaları.

Sınırlama	Problem	Düzeltilici Eylem	Geleneksel Çözüm	FACTS cihazları
	Ağır yükte düşük gerilim	Reaktif güç sağlamak	Şönt Kapasitör, Seri kapasitör	TCSC STATCOM
Gerilim Limiti	Hafif yükte yüksek gerilim	Reaktif güç tüketmek	Şönt Reaktörün anahtarlanması	TCSC STATCOM
	Kesintileri takiben yüksek gerilim	Reaktif güç tüketmek	Şönt reaktör eklenmesi	TCSC STATCOM
Termal Limit	Hat veya transformatörün aşırı yüklenmesi	Aşırı yükü azaltmak	Hat, transformatör veya seri reaktör eklemek	TSCS, UPFC, TCPAR
Döngü Akış Limiti	Paralel geçişler arasında yük paylaşımı	Seri reaktansı veya faz açısını ayarlamak	Seri reaktör/kapasitör eklenmesi	TSCS, UPFC, TCPAR
Kısa Devre Akım Limiti	Yüksek kısa devre akımı	Kısa devre akımını sınırlamak	Seri reaktör eklenmesi	TSCS, UPFC,
Kararlılık	Sınırlı iletim gücü	Hat reaktansının azaltılması	Seri reaktör/kapasitör eklenmesi	TSCS, SSSC

### **BÖLÜM 3. STATİK VAR KOMPANZASYON SİSTEMLERİ (SVC)**

Statik VAR kompanzasyon sistemlerinin tasarımı ve uygulanması bir zorunluluk olarak ortaya çıkmış ve temeli 1970'li yıllara dayanmaktadır (Mutluer, 2008). İlk statik VAR kompanzatorü 1977 yılında batı Nebraska, ABD'de devreye alınmıştır (Rahman ve Islam, 2014).

SVC, gerilim kontrol çevrimlerinde, güç sistemi osilasyonlarını etkin bir şekilde sönümleyebilir ve güç sistemlerinin kararlılığını geliştirebilir. İdeal bir statik VAR kompanzatorü etkin ve tepkin güç kaybı olmayan, gerilimi referans gerilimi takip edebilen, değişmeyen ve çok hızlı cevap verebilen bir denetleyici olarak tanımlanmaktadır (Kıyan, 2010). Ayrıca Doğrul ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmada yaptıkları tanımda ideal bir SVC'nin, referans voltaj limitleri içinde kalan ve sistem bozulmaları oluştuğunda da hızlı bir şekilde tepki veren aktif, reaktif güç kayıpları olmayan bir kontrol cihazı olarak tanımlanabileceği belirtilmiştir.

Statik VAR sistemleri adını, kondansatör ve/veya reaktör gruplarının anahtarlanması için kullanılan ekipmanın hareketli parça içermemesinden alır. Statik VAR sistemlerinde anahtarlama elemanı olarak yarı iletken, güç elektroniği devresi elemanları kullanılır (Somsai ve diğ, 2007). Kullanılan yarı iletken sistem elemanları tristör gruplarından oluşmaktadır.

Statik VAR kompanzasyon sistemleri hat gerilimini önemli bir süre boyunca azaltacak olan acil durum olayları sırasında sistem çökmelerini önlemek üzere hızlı etkili dinamik reaktif kompanzasyon sağlar (Garg ve Agarwal, 2011). SVC sistemleri iletim şirketleri ve endüstriyel tesisler tarafından kullanılmaktadır. Endüstriyel tip SVC ve iletim tip SVC sistemlerinin çalışma koşulları farklılık gösterebilir. Şekil 3.1'de çeşitli SVC sistemleri görülmektedir.



Şekil 3.1 : Değişik tiplerde SVC şalt tesisleri.

Kompanzasyon sistemlerinde yük davranışı çok önemlidir. Yükün harcadığı enerji ve güç katsayısının sabit olduğu durumlarda kondansatör gruplarının devreye alınıp çıkartılmasıyla kompanzasyon sağlanabilir fakat güç katsayısı ve harcanan enerjinin sabit olmadığı durumlarda kondansatör gruplarıyla yapılan kompanzasyon faydalı olmayacaktır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için statik VAR kompanzasyon sistemleri geliştirilmiştir.

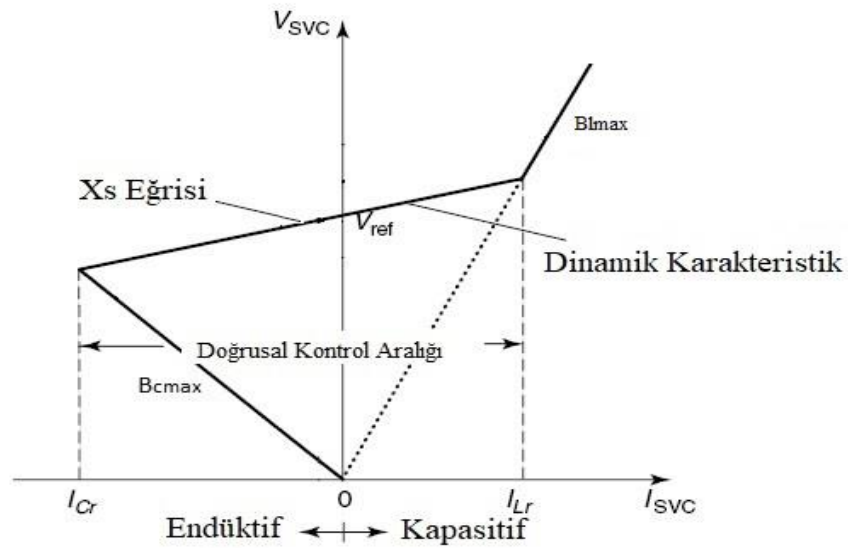
Endüstriyel tip SVC tesisleri genel olarak güç kalitesi ve faz açısı ile ilgili olan kısıtlamaları harmonik ve flicker bozulmalarını da göz önünde bulundurarak yerine getirirken, iletim tip SVC tesisleri temel olarak sistem kararlılığı (açı, frekans, gerilim) ve gerilim kontrolü üzerine çalışırlar.

Statik VAR kompanzasyon sistemlerinin bazı avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir: (Bilki, 2008; Yaşar, 2010; Keçecioglu, 2012; Ersamut, 2009; Dixon ve diğ, 2005);

- Kararlı halde iletim hatlarının aktif güç iletim kapasitelerini arttırmak,

- Yü­k­ün devreden ç­ıkması kısa devre vb. gibi geçici durumlarda iletim hattının, tepkisini düzenlemek,
- İletim hatlarının devreye alınması, sürekli değişen yük durumu, gibi çalışma şartlarında gerilim regülasyonunu sağlarlar,
- Dengeli olmayan yüklerde fazların bağımsız şekilde kompanze edilmesini sağlamak,
- Mekanik anahtarlama kullanılmadığından emniyetli çalışma sağlarlar,
- Uzun bir iletim hattının orta noktası gibi önemli noktalarda gerilim kararlılığını destekleyerek, sistem kararlılığını sağlarlar.

Tristör anahtarlama yöntemine dayanan statik VAR kompanzatorleri sayesinde, devreye girip çıkma sayısı neredeyse sınırsızdır ve anahtarlama süresi tam olarak kontrol edilebilir. Tristör, ark durumu yaşanmadan, darbe akımlarını elimine ederek (inrush current) kapasitörleri, reaktörleri ve diğer ekipmanları anahtarlayıp güç sistemine bağlanmak için kullanılır. Yaklaşık 0.01 - 0.02 saniyelik dinamik tepki süresi ile anahtarlama zamanı, işletimsel zorluklar ve darbe akımlarının etkisi büyük ölçüde azaltılır (Sun ve Wei, 2013). Bu sayede herhangi bir zamanda güç faktörü optimum değerde tutulur. Böylece dinamik reaktif güç kompanzasyonunu gerçekleştirmiş, güç kalitesini iyileştirmiş ve gerilim dalgalanmalarını azaltmış olur. Şekil 3.2’de SVC V-I karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : SVC V-I eğrisi.



Bu eğri ele alındığında; SVC suseptansı ( $B$ ), kapasitör ( $B_{cmax}$ ) ve reaktör ( $B_{lmax}$ ) kapasitelerinin arasında salınım yaptığı sürece gerilimin  $V_{ref}$  değerinde regüle edileceği görülür. Şekil 3.2'deki V-I karakteristiği Denklem 3.1 – Denklem 3.3 ile tanımlayabiliriz.

$$V = V_{ref} + X_s \cdot I \quad -B_{cmax} < B < B_{lmax} \quad (3.1)$$

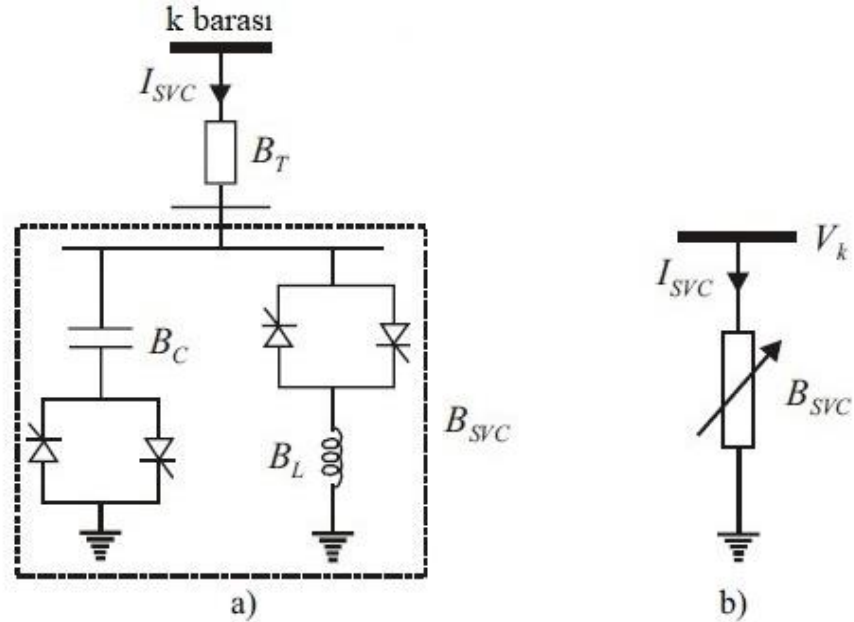
$$V = -\frac{I}{B_{cmax}} \quad \text{SVC kapasitif } B = B_{cmax} \quad (3.2)$$

$$V = \frac{I}{B_{lmax}} \quad \text{SVC indüktif } B = B_{lmax} \quad (3.3)$$

Burada;

$I$ : Reaktif akım,  $X_s$ : Svc reaktansı,  $B_{cmax}$ : Maksimum kapasitif suseptans,  $B_{lmax}$ : Minimum indüktif suseptans

Şekil 3.3'de bir TCR ve bir TSC yapısından oluşan statik VAR kompanzatorünün temel devre şeması ve basitleştirilmiş devre modeli görülmektedir.



Şekil 3.3 : (a) SVC temel devre şeması (b) basitleştirilmiş devre modeli.

Daha önce Denklem 3.1 ile SVC gerilim denklemi ifade edilmişti. SVC'nin sisteme gönderdiği veya sistemden çekeceği reaktif gücü ise Denklem 3.4'teki gibi yazabiliriz.

$$Q_i = V_i^2 B_{SVC} \quad (3.4)$$

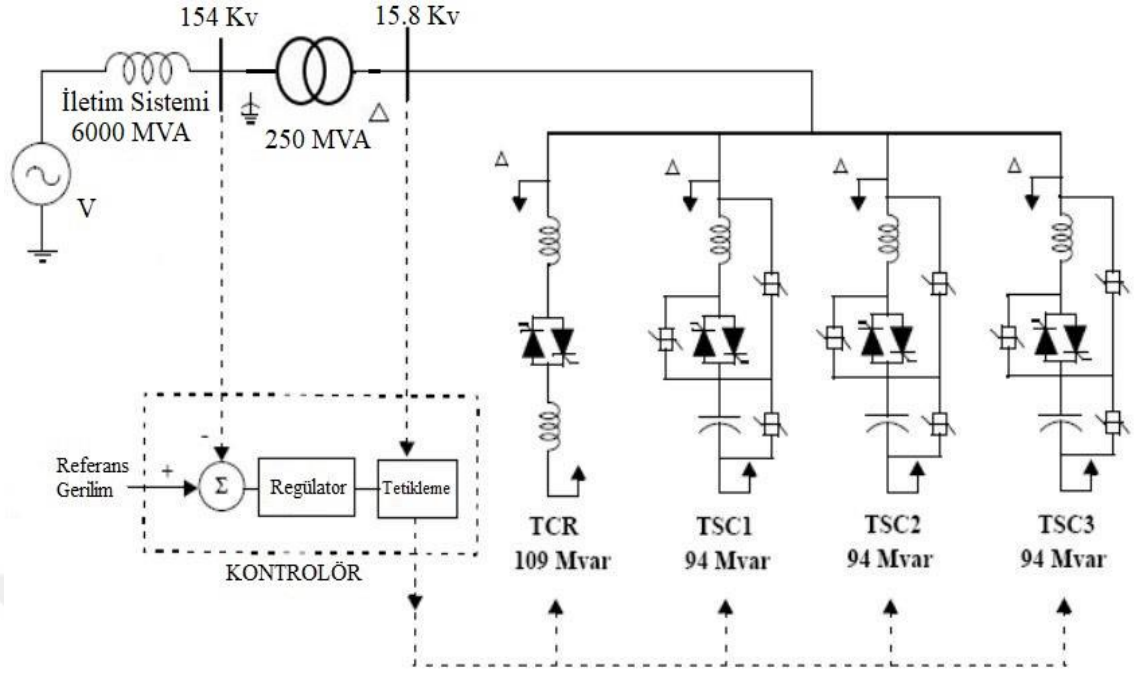
SVC, Şekil 3.3'deki temel devre şemasında gösterildiği gibi genellikle bir tristör kontrollü reaktör (TCR) ve birkaç tristör anahtarlama kondansatör (TSC) grubundan meydana gelir. Bozucu akımları önlemek için, kondansatör gruplarının devreye alınması akımın sıfır geçiş noktasına dikkat edilerek yapılır. Ayrıca burada en önemli husus tristörlerin tetiklenme açılarıdır. Eğer tristörler 0°-90° arasında tetiklenirlerse birbirlerine ters ve paralel bağlı olan tristör gruplarının çalışmasını bozacak ve DC akım bileşenlerini ortaya çıkaracaktır.

### 3.1. Örnek Bir Svc Sistemi Simulasyonu

Bu çalışmada TSC ve TCR ile oluşturulan bir statik VAR kompanzasyon benzetimi yapılmıştır. 154 KV, 6000 MVA kısa devre gücünde olan iletim hattına bağlanmış olan 154/15.8 kv 250 MVA gücündeki bir güç transformatörü ile YG/OG dönüşümü yapılmıştır.

Transformatör yıldız-üçgen bağlı ve kaçak reaktansı %12' dir. Ayrıca mıknatıslanma direnci ve endüktansı 500 (pu) olarak alınmıştır. Modellenen sistemin tek hat şeması Şekil 3.4' de gösterilmiştir.

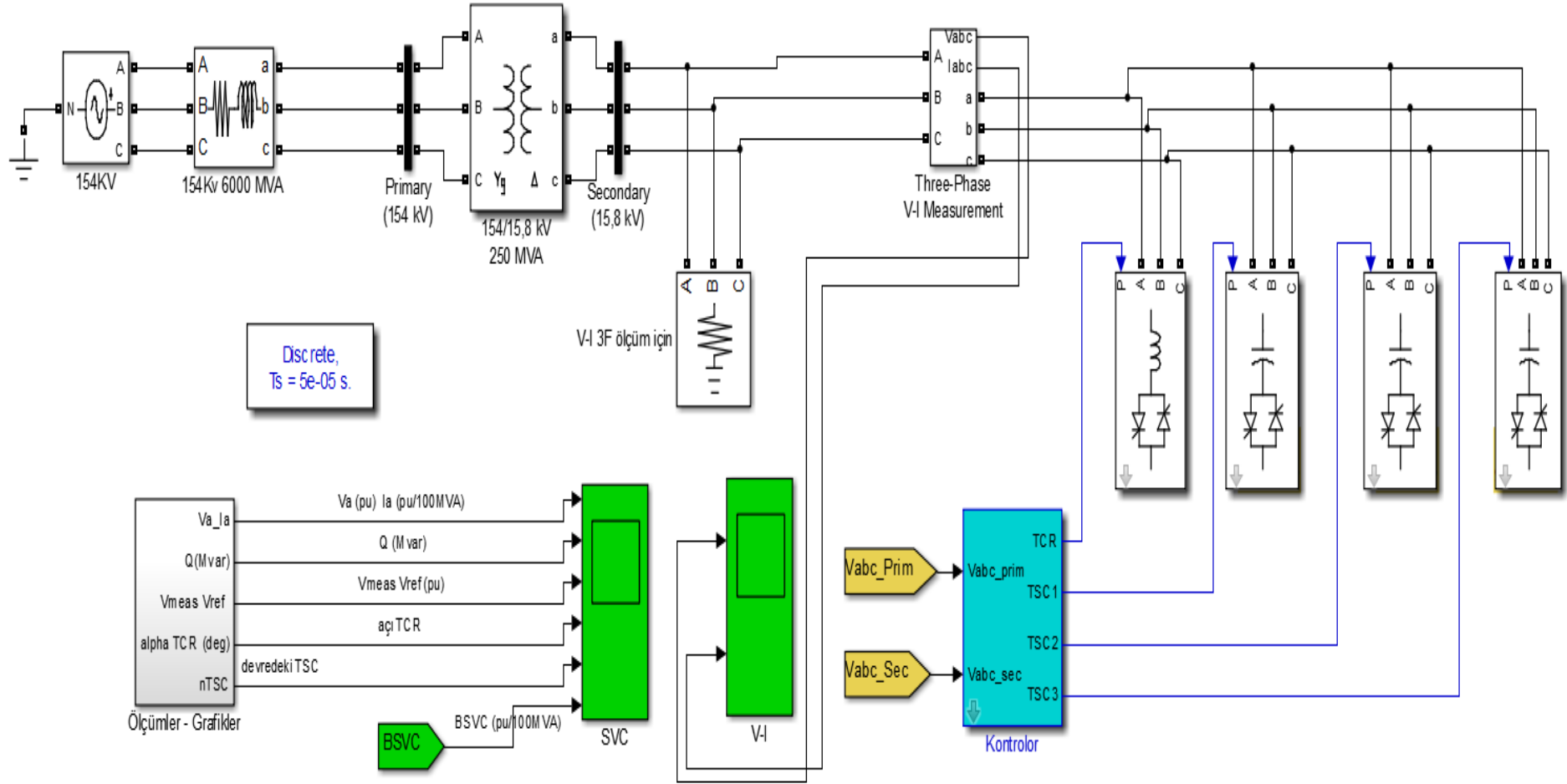
Burada SVC ile 109 MVar gücüne TCR ve 94 MVar gücünde 3 adet TSC kontrol edilmektedir. Bu sayede SVC'nin kontrol sahasının yaklaşık olarak 100 MVar endüktif ve 300 MVar kapasitif olduğunu söyleyebilmekteyiz. Dolayısıyla sistemin çalışma sahası +300 MVar/-100 MVar arasındadır.



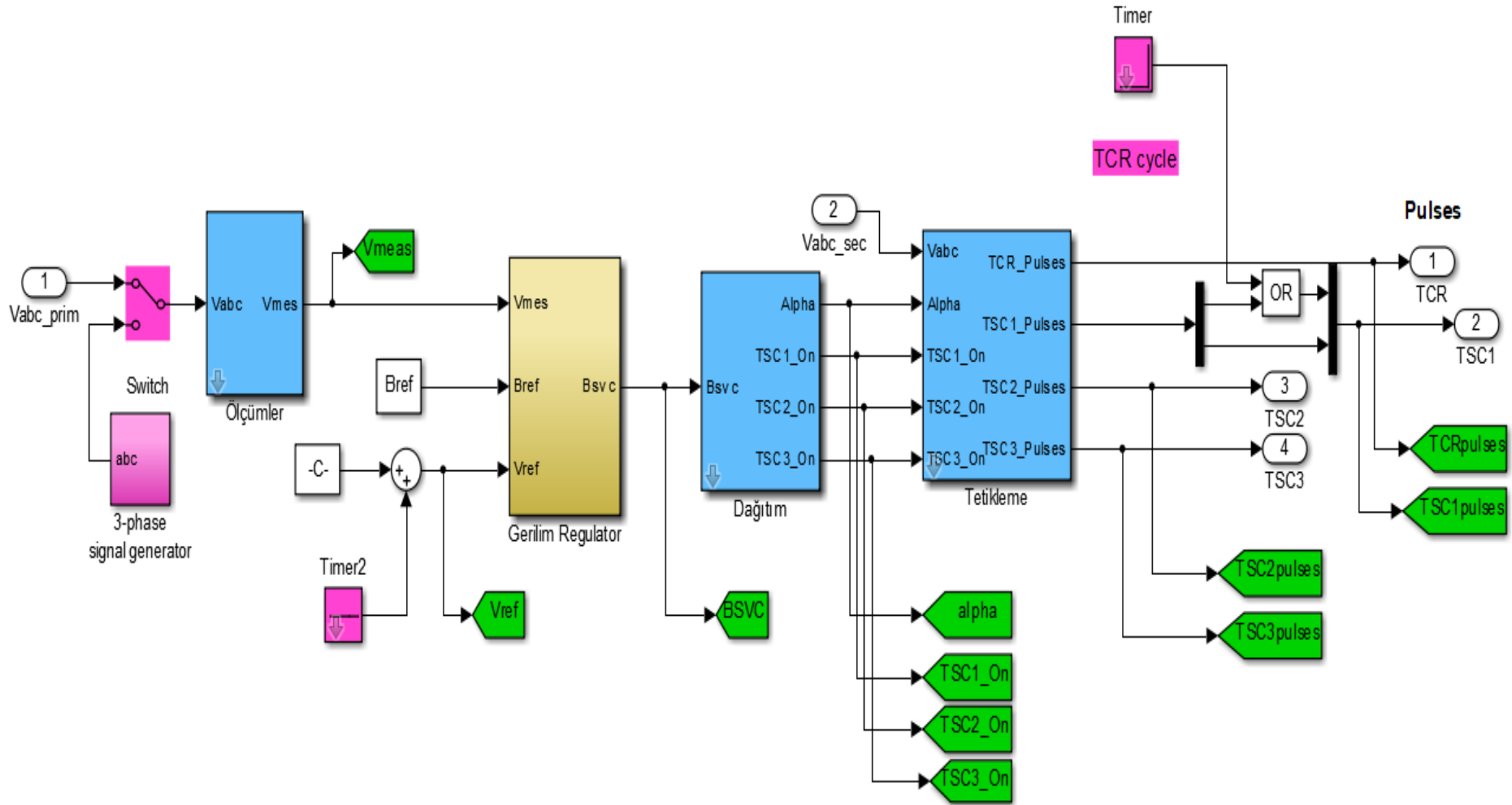
Şekil 3.4 : Modellenen SVC sistemi.

Tek hat şemasından görüldüğü üzere SVC sistemi transformatörün primer tarafında kurulmuştur. İletim ve dağıtım sistemlerinde güç sistem kararlılığını artırmak için yapılan uygulamalarda SVC sisteminin iletim hattının ortasında uygulanmasının en uygun olacağı daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Yapılan modellemede iletim sistemi değil de bir endüstriyel tesis kompanse edilmiştir. Ülkemizde bazı demir çelik fabrikalarında bu tür uygulamalar bulunmaktadır. Özellikle ülkemizde kullanılan statik VAR kompanzatorları TCR ve TSC yapılarından oluşmaktadır (Mutluer, 2008).

Şekil 3.4’de verilen tek hat şemasına göre Matlab/Simulink ortamında tasarlanan statik VAR kompanzatorunun şeması Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.5’de gösterilen sistemin kontrolör tasarımı da Şekil 3.6 ile verilmiştir.



Şekil 3.5 : Modellenen sistemin simulink şeması.



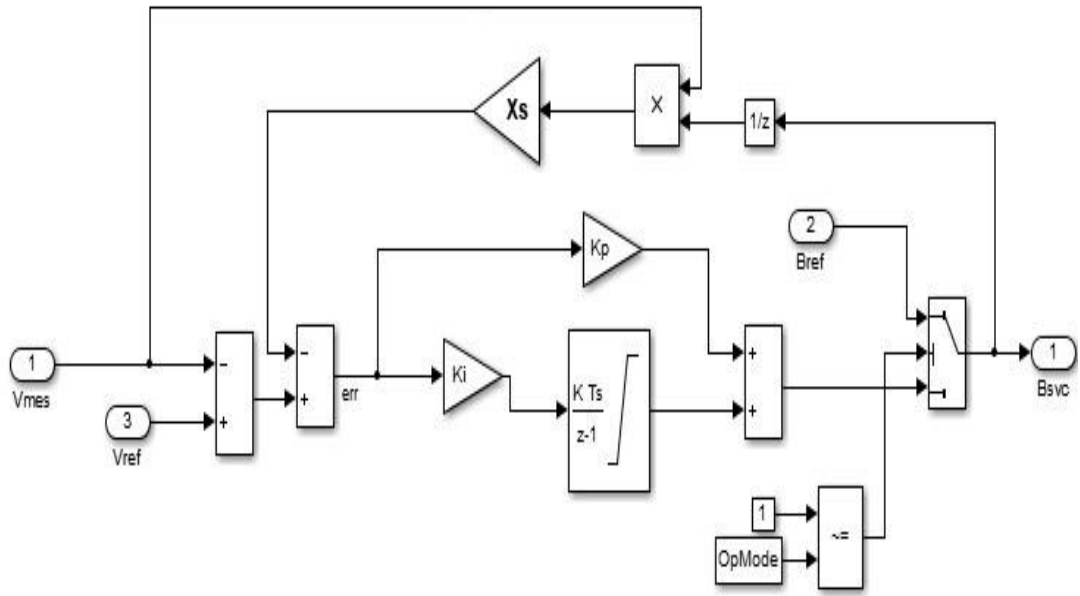
Şekil 3.6 : Modellenen SVC kontrol sistemi (Matlab, 2019)

### 3.1.1. Modellenen sistemin çalışma prensibi

Bu çalışmada sistem 1xTCR ve 3xTSC yapıyla oluşturulmuştur. Daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi tristör kontrollü reaktör devreye alınırken tetiklenme açısının 90° nin üzerinde olacak şekilde kontrol yapılması sağlanmıştır. Bu sayede birbirlerine ters bağlı olan tristörlerin bağlantılarından kaynaklı DC akım oluşumunun önüne geçilmiştir. Kontrolör sayesinde TSC'lerin on-off kontrolleri TCR ile uyumlu hale getirilmiştir. Bu sayede sistemin senkron çalışması sağlanmıştır.

Tek hat şemasından görüldüğü üzere 3 adet TSC yapıyla sistem 94 MVar adımlarla toplamda 282 MVar kapasitif reaktif güç, 1 adet TCR ile ise 109 MVar endüktif reaktif güç kontrolü sağlamaktadır. Transformatorün %12 olan kaçak akı reaktansı da göz önüne alındığında SVC suseptansının -1pu ile +3pu arasında değiştiği görülmüştür.

Şekil 3.7'de tasarlanan statik VAr kompanzatorünün suseptans kontrol devresi Şekil 3.8'de ise modellenen sistemin V-I eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.7 : SVC suseptans kontrol devresi (Matlab, 2019).

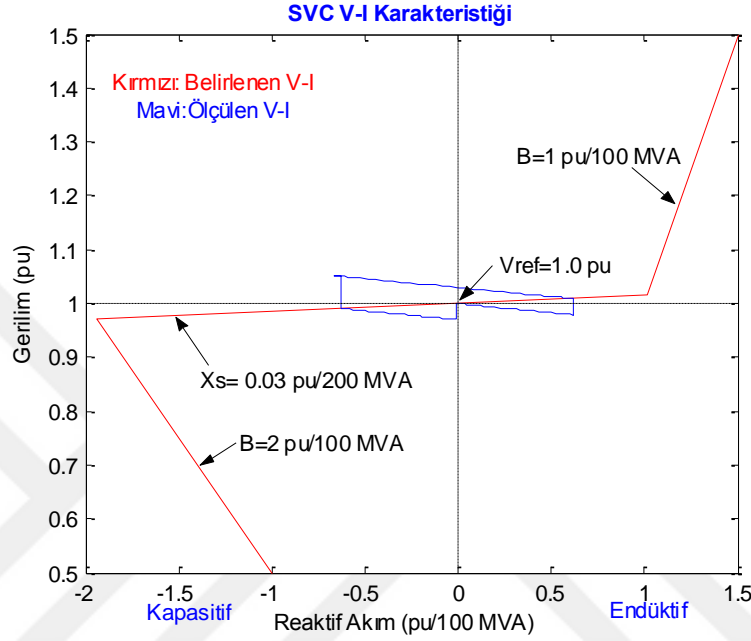
Burada açık çevrim ve kapalı çevrim zaman sabitleri formülize edilirse;

$$T_o = \frac{1}{K_i X_s} \quad \text{açık çevrim} \quad (3.5)$$

$$T_c = \left[ \frac{X_s}{(X_r + X_s)} \right] \times T_o \quad \text{kapalı çevrim} \quad (3.6)$$

olur. Burada;

$X_s$ , SVC endüktans değişimini ve  $K_i$  ise SVC integral kazancını belirtmektedir.



Şekil 3.8 : Modellenen sistemin V-I eğrisi

Şekil 3.6'de belirtilen SVC kontrol sistemi 4 ayrı bölümden oluşmaktadır. Bunlar;

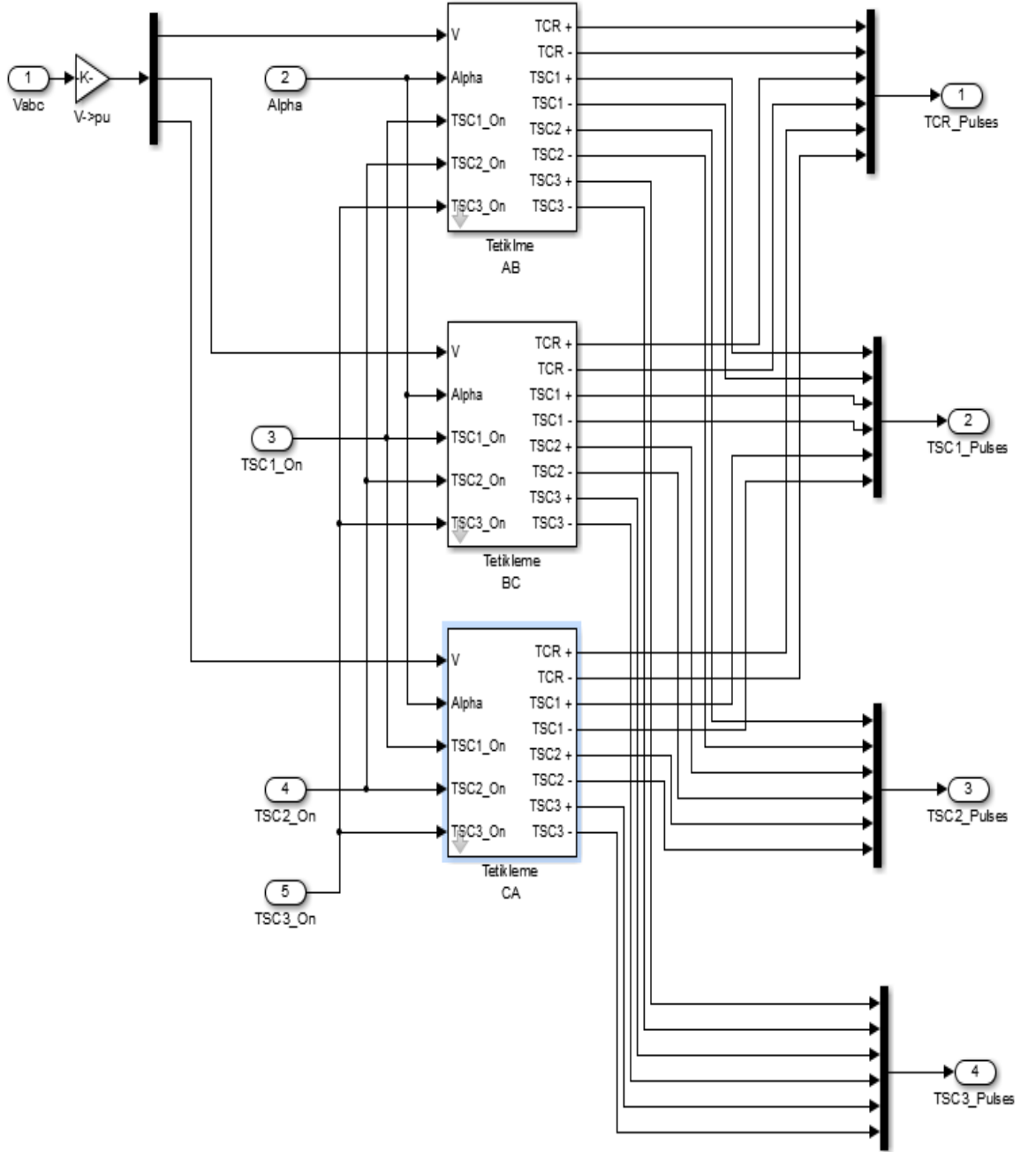
**Ölçüm Sistemi:** Transformatör primer tarafının gerilimini ölçer. Bu sistem temel gerilim değerini hesaplamak için tek sayıklık pencerede ayrık fourier dönüşümü kullanarak temel gerilim değerini hesaplar. Bu birim sistem frekansındaki değişimleri de dikkate alabilmek için PLL (faz kilitlemeli döngü) ile kontrol edilir.

**Gerilim Regülatörü:** Bu birim PI regülatörü vasıtasıyla primer taraftarı gerilim regülasyonunu düzenler. SVC çalışma noktası tamamen kapasitif (+300 MVar) 'dan tamamen endüktif (-100 MVar)' a geçtiğinde, SVC voltajı  $1 - 0.03 = 0.97$  pu ve  $1 + 0.01 = 1.01$  pu arasında değişir. Bu değişim oranı SVC'nin parametrik ayarlarıyla belirlenmektedir.

**Dağıtım Birimi:** TCR ateşleme açısı olan  $\alpha$  ve üç TSC'nin durumunu (açık / kapalı) belirlemek için voltaj regülatörü tarafından hesaplanan suseptans olan  $B_{SVC}$  'yi kullanır.

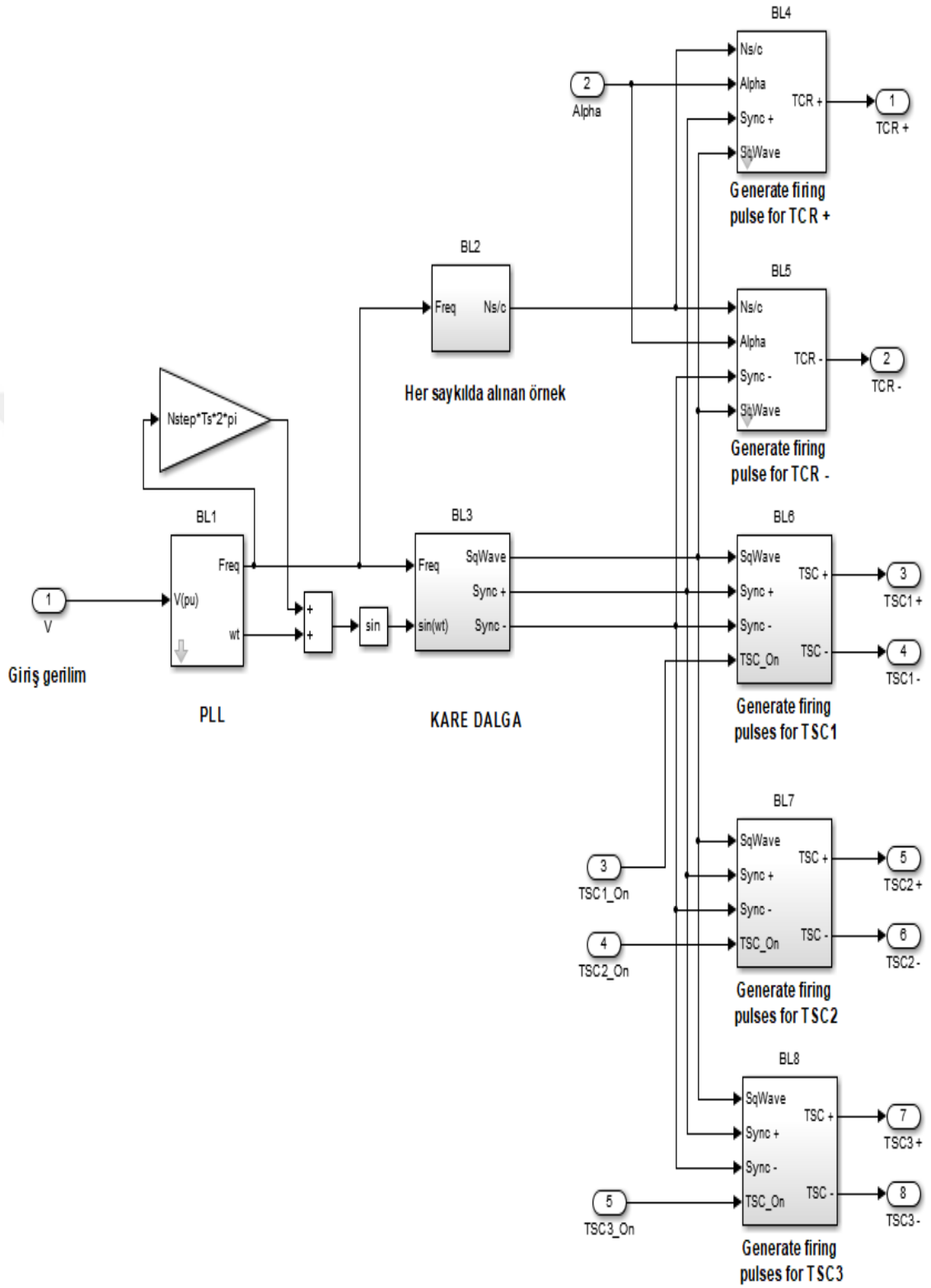
**Tetikleme Birimi:** Her faz için bir tane olmak üzere üç bağımsız alt sistemden oluşur (AB, BC ve CA). Her alt sistem, hat-hat sekonder voltajına senkronize edilmiş bir PLL'den ve TCR ve TSC dallarının her biri için bir puls üreticinden oluşur. Puls üreticileri tetikleme açısı olan  $\alpha$  ve dağıtım biriminden gelen TSC on/off bilgisini kullanarak puls üretir.

Şekil 3.9 ve 3.10'da tetikleme biriminin şeması ve içyapısı verilmiştir.



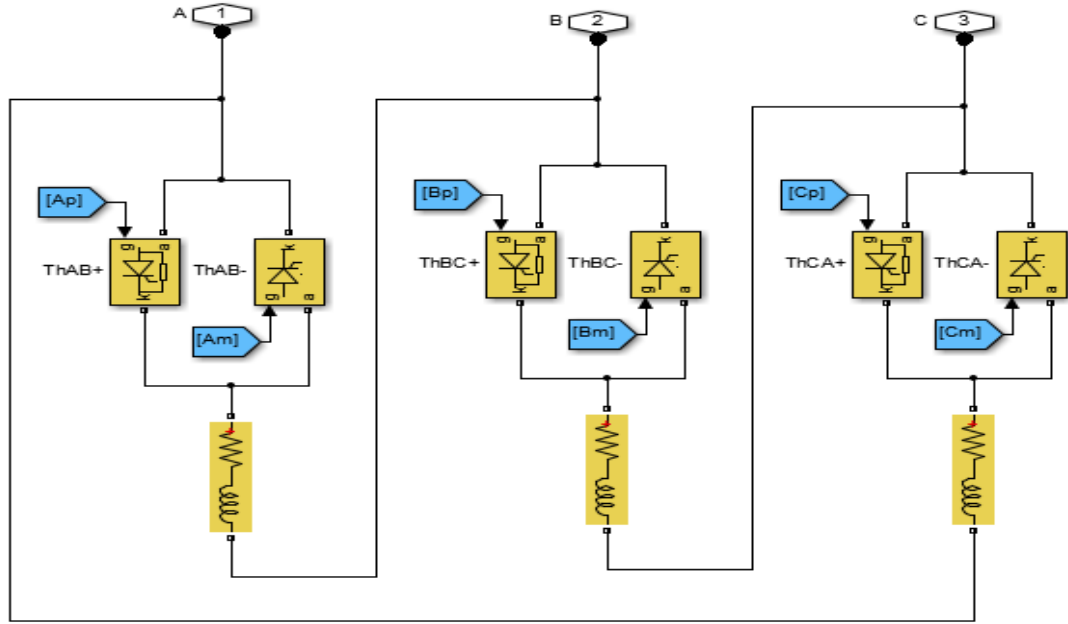
Şekil 3.9 : Tetikleme birimi.



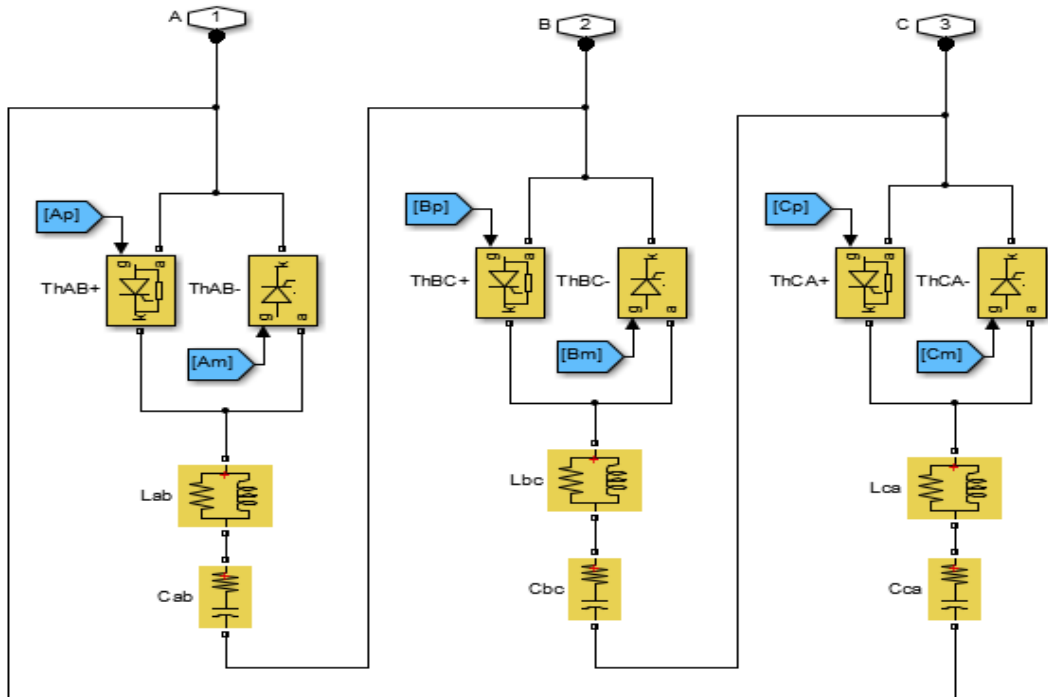


Şekil 3.10 : Tetikleme birimi içyapısı (Matlab, 2019).

Modellenen sistem toplamda 24 adet tristörle kontrol sağlanmıştır. Her fazda 6 adet tristör bulunmaktadır ve tristörler gerilim regülatör kısmında gereken suseptans değerini üretebilmek için uygun tetikleme palsleri ile devreye alınırlar. Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 ile tasarlanan sistemde kullanılan TCR ve TSC yapılarının bağlantı şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.11 : TCR bağlantısı.



Şekil 3.12 : TSC bağlantısı.

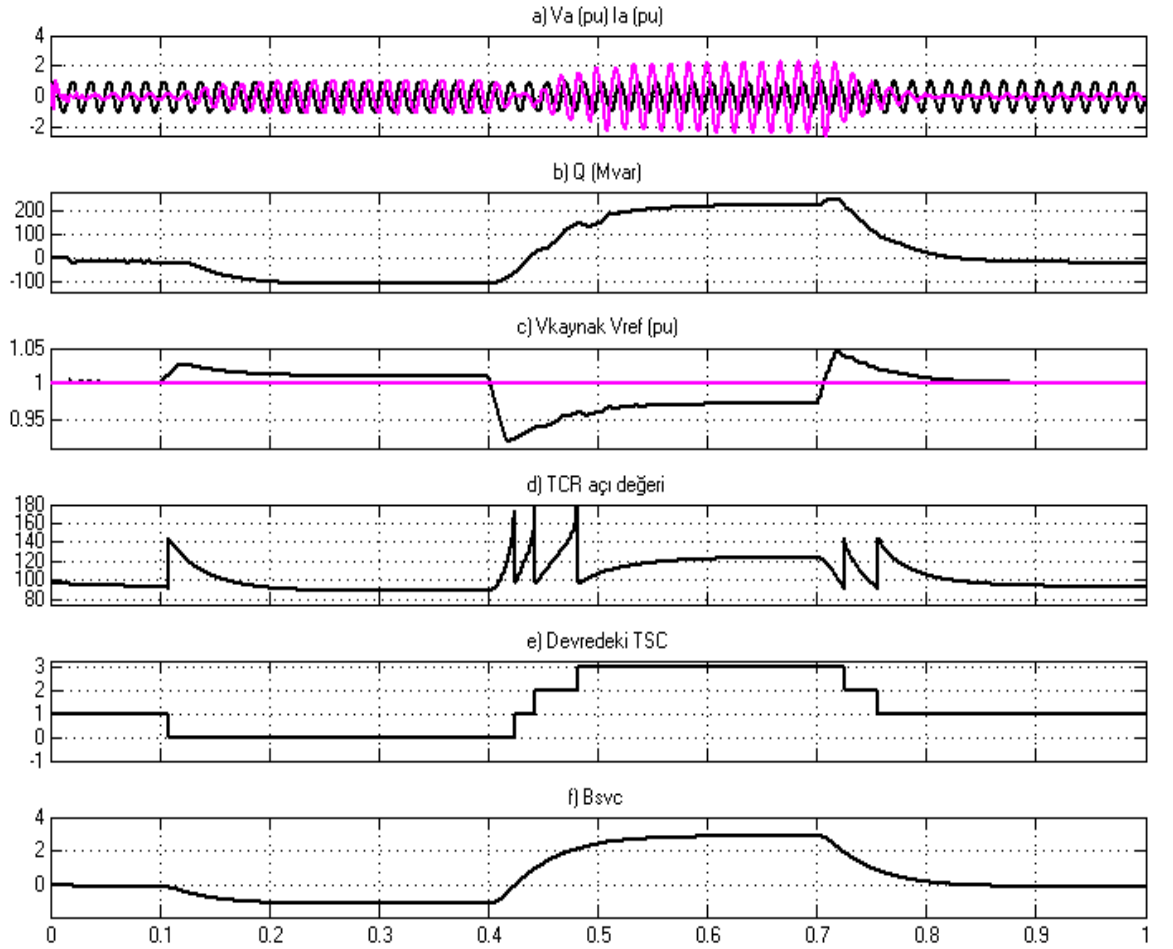
### 3.1.2. Sonuçlar

Simulink alışmasında Tablo 3.1'deki değerlere göre ayarlanan programlanabilir bir gerilim kaynağı kullanılmıştır.

Tablo 3.1 : Programlanabilir gerilim kaynağı değerleri.

	Değerler			
Zaman (s)	0	0.1	0.4	0.7
Değerler (pu)	1	1.025	0.93	1

Ayrık zaman simülasyonu 1 saniyede bitirilmiştir. şekil 3.13 ile verilen grafikde modellenen sistem sonuçları gösterilmiştir.



şekil 3.13 : Modellenen sistem sonuçları.

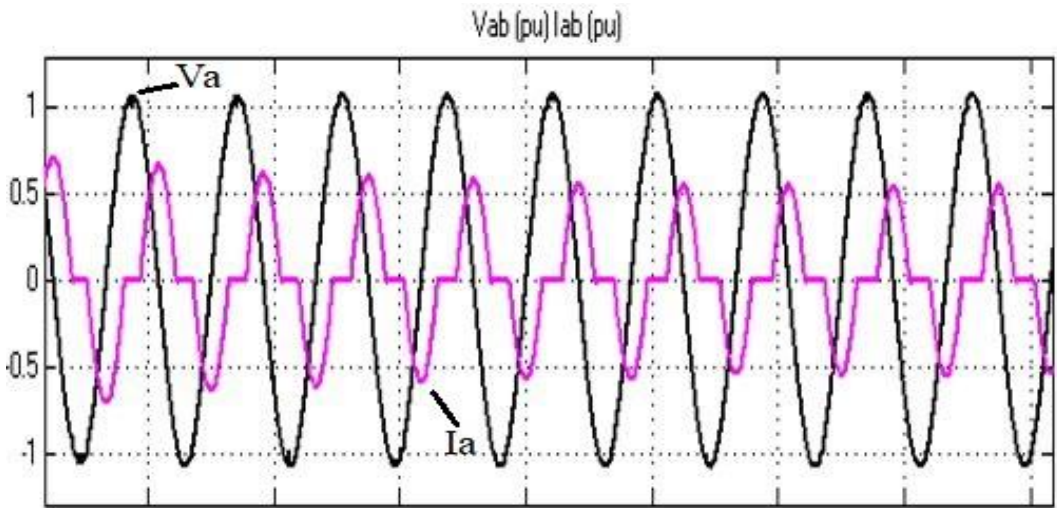
Başlangıçta, kaynak voltajı 1.004 pu olarak ayarlanmıştır. Referans gerilimi  $V_{ref}$  1.0 pu olarak ayarlandığı için, SVC akım çekmez. Bu çalışma anında  $TSC_1$  devrede ve TCR neredeyse tam iletkenlikte ( $\alpha = 96$  derece) olduğu görülür.

$T = 0.1$  saniyede gerilim aniden 1.025 pu'ya yükseltilir. SVC, gerilimi 1,01 pu değerine getirmek için sistemden reaktif gücü ( $Q = -95$  MVar) emerek tepki verir. Bu noktada, tüm TSC'ler devrede değildir ve TCR neredeyse tam iletkenlikte ( $\alpha = 94$  derece).

$T = 0.4$  saniyede kaynak gerilimi aniden 0,93 pu'ya düşürülür. SVC, 256 MVar reaktif güç üreterek gerilimi 0.974 pu'ya yükseltir. Bu noktada kademeli olarak, 0,1 saniye içerisinde bütün TSC'ler devreye alınmış olur. TCR nominal reaktif gücünün yaklaşık % 40'ını emer ( $\alpha = 120$  derece). Bu çalışma anında şekil 4.10 d ve e figürlerine dikkatli bakılırsa her bir TSC'nin devreye girdiği anda TCR tetikleme açıcı  $180^\circ$  (iletim yok) ile  $90^\circ$  (tam iletim) arasında salınım yaptığı görülür. Bu da SVC kontrolör parametrelerindeki senkronizasyon modu ile sağlanmış olur.

Son olarak,  $t = 0.7$  saniyede voltaj 1.0 pu'a yükseltilir ve SVC reaktif gücü sıfıra düşürülür.

Modellenen sistemde kullanılan TCR bloğunun üzerine düşen akım ve gerilimin grafiği Şekil 3.14'de verilmiştir.



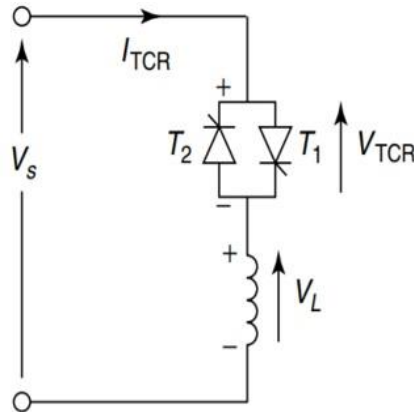
Şekil 3.14 : Modellenen sistemde kullanılan tcr gerilim – akım dalga şekli.

Yukarıdaki benzetim sonuçları ile statik VAR kompanzatorlerinin güç sistemindeki reaktif güç problemini çözebileceği sonucuna varılabilir. Statik VAR kompanzator kurulumu

elektrik şebekesinde, elektrik enerjisinin kalitesini büyük ölçüde artırabilir. Ayrıca, bu sistem hem endüktif hem kapasitif olacak şekilde sürekli kontrol ve düzenleme sağlar. Tepki süresi daha hızlıdır. Gerilim kontrolü ve faz kontrol kabiliyeti de geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında çok daha iyidir. Statik VAr kompanzatorleri şebeke kayıplarını azaltmada, şebeke voltajını dengelemede, güç kalitesini artırmada, frekans ve açı kararlılığını sağlama ve güç sistemindeki harmoniği yönetmede önemli bir rol oynar. Ülkemizde yarı iletken teknolojisi üzerine yapılan arge çalışmaları arttıkça, SVC tesis maliyetlerinin düşeceği ve bu sistemlerin kullanımının daha da artacağı düşünülmektedir.

### 3.2. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)

Tristör kontrollü reaktör, statik VAr kompanzasyon sistemleri arasında en yaygın olarak kullanılan sistem olduğu söylenebilir. Bu sistem tek başına kullanılabileceği gibi, diğer statik VAr sistemleriyle bir kombinasyon haline getirilerek de kullanılabilir. Günümüzde TCR-TSC yapısı kullanılarak oluşturulmuş birçok statik VAr sistemi bulunmaktadır. Bu sistem birbirine ters bağlı iki tristör valfinin kontrol ettiği ve endüktansı sürekli değiştirilen bir reaktörden oluşmaktadır. Birbirlerine ters bağlı olan bu tristörlerden biri ( $T_1$ ) alternansın yarısında, diğeri ise ( $T_2$ ) diğer yarısında iletimde kalacak şekilde tesis edilirler. Şekil 3.15’de TCR yapısı ve endüstriyel uygulamasının şekli görülmektedir. TCR kontrolünde en önemli husus tristörlerin tetikleme açısı ile ilgilidir. Gerilimin sıfır geçiş anına göre yapılan tetiklemelerde,  $\alpha=90^\circ$  için maksimum iletim (akım en yüksek değerde iken),  $\alpha=180^\circ$  için minimum iletim (akım en düşük değerde iken) sağlanır. Bu yüzden TCR,  $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$  aralığında kullanılır (Koyuncu, 2018).

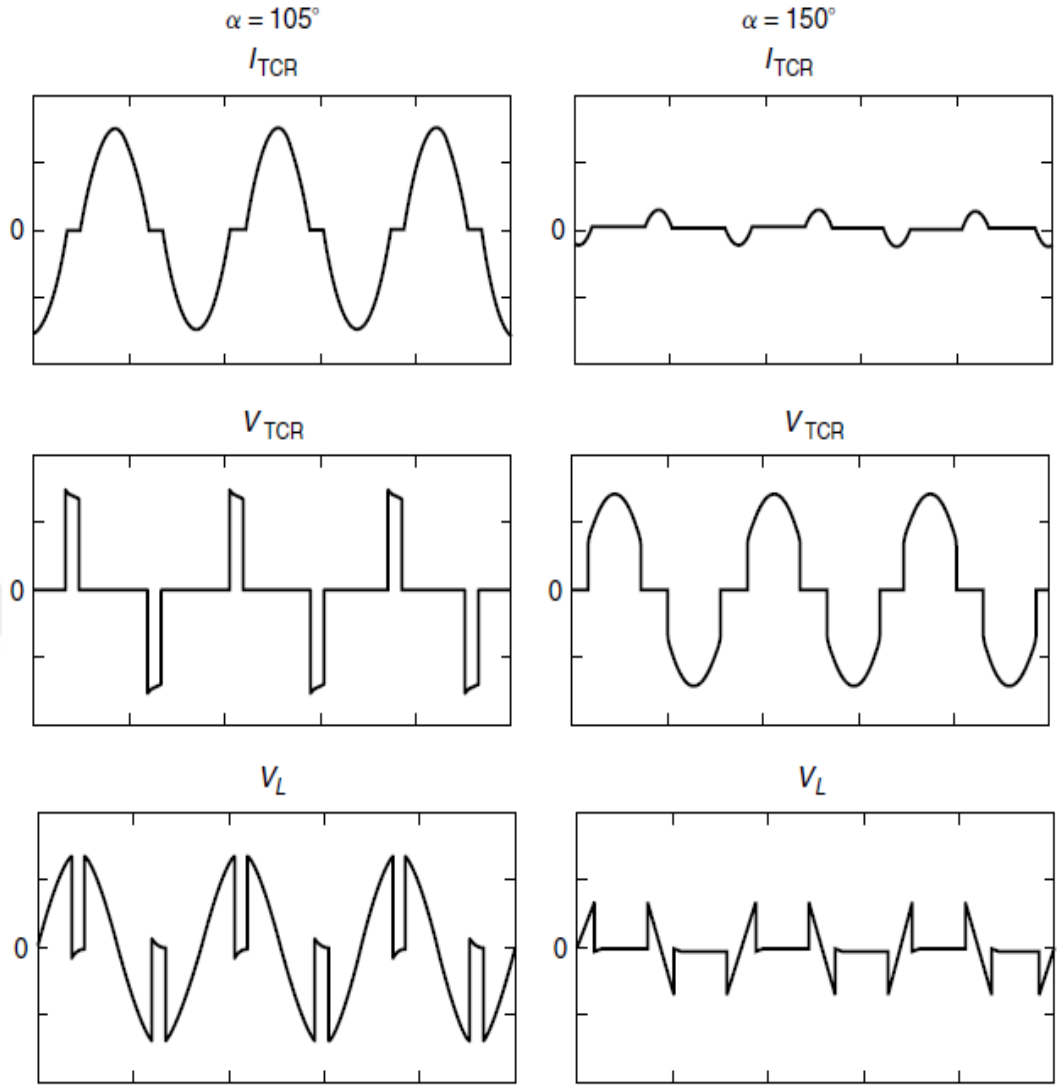


Şekil 3.15 : Tristör kontrollü reaktör ve reaktörlerin saha uygulaması gösterimi.

Tristörlerin ( $\alpha$ ) tetikleme açıları veya iletim açısı ( $\sigma$ ) uygun seçildiği takdirde, reaktör akımının etkin değeri istenilen sınırlar içerisinde düzenlenebilir. Tetikleme açısı  $\alpha$  ile iletim açısı  $\sigma$  arasında Denklem 3.7'deki gibi bağlantı olduğundan tetikleme açısının artması iletim açısının azalmasına sebep olur (Bilki, 2008; Koyuncu, 2018).

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (3.7)$$

Genel olarak statik VAr kontrol sistemini oluşturan sistemlerin içerisindeki tristörlerde, tetiklemenin hangi aralıklarda yapılacağı çok önemlidir. Alternansın ilk yarısında yani  $90^\circ$ 'nin altında yapılacak tetiklemelerde birbirlerine ters bağlı tristör grupları DC akım meydana getirirler ve böylece birbirlerine simetrik bağlı olan tristörlerin çalışması bozulur. Ayrıca bir tristör iletime girdikten sonra tetikleme açısında yapılacak bir değişiklik ancak bir sonraki periyotta gerçekleşebilir. Buna da tristörün ölü zamanı denilmektedir (Mathur ve Varma, 2002). Tablo 3.2'de farklı konfigürasyonlarda TCR tabanlı SVC tiplerinin kullanıldığı yerler ve açıklamalarıyla birlikte verilmiştir. Şekil 3.16'da bir TCR'nin  $105^\circ$  ve  $150^\circ$  de yapılan tetiklemesinde üzerindeki akım ve gerilimin dalga şekli yanında yük üzerindeki akım ve gerilimin de dalga şekli verilmiştir.



Şekil 3.16 : Farklı tetikleme açılarında tristör kontrollü reaktörün akım-gerilim grafikleri (Mathur ve Varma, 2002).

Statik VAR kompanzatorleri  $\Delta$  (üçgen) veya Y (yıldız) bağlı olarak tesis edilebilirler. Bu durumda devre elemanları üzerinden geçen akım ve gerilim arasında Y- $\Delta$  bağlantının doğası gereği bir oran olacaktır. Ayrıca her iki bağlantıda da harmonik karakteristikleri birbirinden farklı olacaktır. Tabii ki yıldız bağlantıda üçgen bağlantıya nazaran tristör ve reaktörlerin üzerine düşen gerilim  $1/\sqrt{3}$  oranında daha az olacaktır.

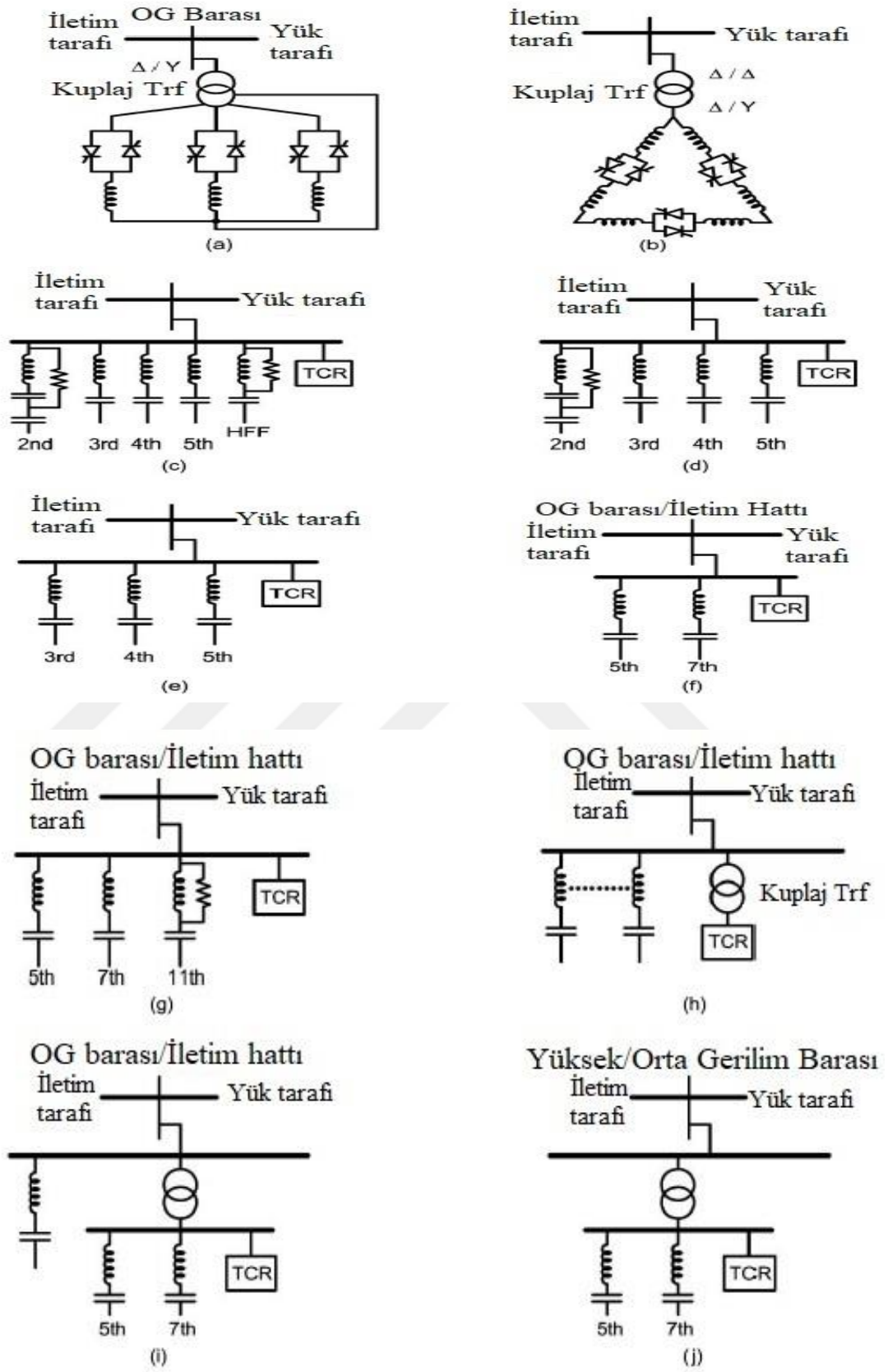
Genel olarak üç fazlı dengeli sistemlerde tristör kontrollü reaktörler  $\Delta$  bağlı olduklarında sisteme bozucu-harmonik etkileri sınırlı kalmaktadır. Bu sebeple TCR'ler genellikle üçgen bağlı olarak kullanılırlar (Parlak, 2014).

Tablo 3.2 : TCR tabanlı SVC tipleri (Mutluer, 2008).

Tanımlama	Şekil	Kullanıldığı Yer
Kuplaj transformatörü ile baray bağlı olan $\Delta$ -Y filtresiz TCR	Şekil 3.17. a	Özellikle toplu taşımada kullanılan uzun yer altı kablolarının ürettiği kapasitif reaktif enerjinin kompanzasyonunda kullanılır.
Kuplaj transformatörü ile baray bağlı olan filtresiz, $\Delta$ bağlantılı TCR	Şekil 3.17. b	Özellikle toplu taşımada kullanılan uzun yer altı kablolarının ürettiği kapasitif reaktif enerjinin kompanzasyonunda kullanılır.
2-3-4-5 ve yüksek frekans harmonik filtreli orta gerilim barasına bağlantılı TCR	Şekil 3.17. c	Ark ve demir ergitme ocaklarında kullanıma uygundur.
2-3-4 ve 5. harmonik filtreli filtreli orta gerilim barasına bağlantılı TCR	Şekil 3.17. d	Ark ve demir ergitme ocaklarında kullanıma uygundur.
3-4 ve 5. harmonik filtreli orta gerilim barasına bağlantılı TCR	Şekil 3.17. e	Ark ve demir ergitme ocaklarında kullanıma uygundur.
Orta gerilim barası veya yüksek gerilim enerji iletim hattına bağlı 5 ve 7. harmonik filtreli TCR	Şekil 3.17. f	6 darbeli motor sürücüleri için uygundur.
Orta gerilim barası veya yüksek gerilim enerji iletim hattına bağlı 5 ve 7. ve 11. harmonik filtreli TCR	Şekil 3.17. g	12 darbeli motor sürücüleri, değişken frekanslı motor sürücüleri, haddehaneler ve fan sürücüleri için uygundur
Filtrelerin orta gerilim tarafında olduğu kuplaj transformatörü vasıtasıyla orta gerilim tarafına bağlı TCR	Şekil 3.17. h	Akım harmonikleri üreten modern endüstriyel motor sürücüleri için uygundur
TCR kuplaj transformatörü ile orta gerilim tarafına bağlanır. Bazı filtreler orta gerilim tarafına bazı filtreler ise TCR'ye paralel bağlanır	Şekil 3.17. i	Hızla değişen reaktif güç tüketimine sahip geleneksel motor sürücüleri
TCR ve harmonik filtrelerin aynı tarafta (orta gerilim-yüksek gerilim) ve kuplaj transformatörü üzerinden bağlandığı düzenleme	Şekil 3.17. j	Geleneksel harmoniksiz baralara bağlı motor sürücüleri

Tablo 3.2'de belirtilen TCR tabanlı SVC tiplerinin tek hat şemaları Şekil 3.17'de verilmiştir.





Şekil 3.17 : Tablo 3.2’de belirtilen TCR tabanlı SVC tek hat şemaları (Mutluer, 2008).

### 3.2.1. Tristör kontrollü reaktör matematiksel modeli

Şekil 3.13'deki TCR devre modeli dikkate alınacak olursa,  $V$  gerilimin tepe değeri ve  $\omega$  açısal hız olmak üzere;

TCR akımı,

$$L \frac{di}{dt} - V_s(t) = 0 \quad (3.8)$$

Burada  $L$ , TCR'nin endüktansdır. Denklem 3.8'in integrali alınır,

$$i(t) = \frac{1}{L} \int V_s(t) dt + C \quad (3.9)$$

$C$  integral sabitidir. Denklem 3.9'un çözümü yapılarak aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir.

$$i(t) = -\frac{V}{\omega L} \cos \omega t + C \quad (3.10)$$

$i(\omega t = \alpha) = 0$  sınır koşulları kullanıldığında,

$$i(t) = -\frac{V}{\omega L} \cos \alpha - \cos \omega t \quad (3.11)$$

eşitliği elde edilir. Burada  $\alpha$ , uygulanan gerilimin pozitiften sıfır geçişine göre ölçülen tetikleme açısıdır. TCR akımının temel bileşeni olan  $I_1(\alpha)$  'yı elde etmek için fourier analizi kullanılarak,

$$I_1(\alpha) = a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t \quad (3.12)$$

elde edilir. Burada tek dalga simetrisinden dolayı  $f(x) = f(-x)$  olur. Dolayısıyla  $b_1 = 0$ 'dır. Aynı zamanda, yarım dalga simetrisinden dolayı  $f\left(x + \frac{T}{2}\right) = -f(x)$  olur.  $a_1$  katsayısı;

$$a_1 = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(x) \cos \frac{2\pi x}{T} dx \quad (3.13)$$

Denklem 3.12 çözüldüğünde,

$$I_1(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha\right) \quad (3.14)$$

Ayrıca Denklem 3.13 aşağıdaki şekilde de yazılabilir.

$$I_1(\alpha) = VB_{TCR}(\alpha) \quad (3.15)$$

$$B_{TCR}(\alpha) = B_{MAX} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha\right) \quad (3.16)$$

$$B_{MAX} = \frac{1}{\omega L} \quad (3.17)$$

Tetikleme açısı  $\alpha$  ve iletim açısı  $\sigma$  arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır.

$$\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi \quad (3.18)$$

Denklem 3.18 ve 3.14 ifadelerinden yararlanarak TCR akımı aşağıdaki gibi yazılabilir.

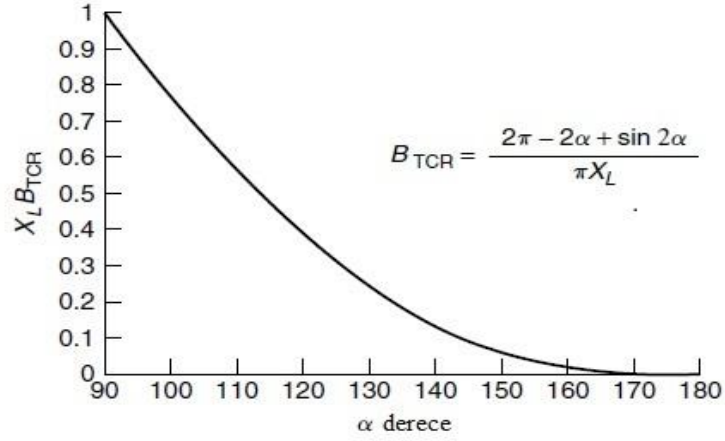
$$I_1(\sigma) = VB_{MAX} \left(\frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi}\right) \quad (3.19)$$

$$I_1(\sigma) = VB_{TCR}(\sigma) \quad (3.20)$$

sonuç olarak 3.19 ve 3.20 denklemlerini kullanarak TCR suseptansı Denklem 3.21'deki gibi ifade edilir.

$$B_{TCR}(\sigma) = B_{MAX} \left(\frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi}\right) \quad (3.21)$$

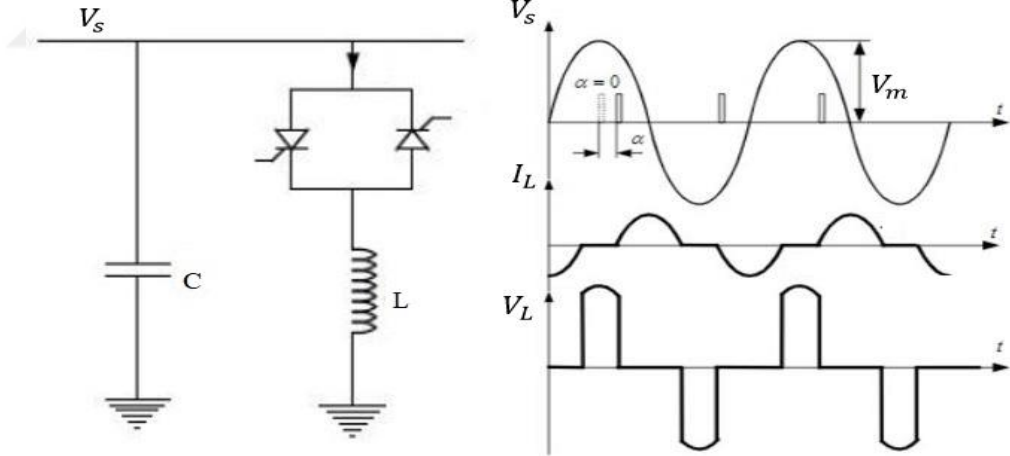
TCR suseptansının tetikleme açısına göre değişimini gösteren grafik Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18 : TCR suseptansının tetikleme açısına göre değişimi (Mathur ve Varma, 2002).

### 3.2.2. Sabit kondansatörlü (FC) tristör kontrollü reaktör

Bu model tristör kontrollü reaktöre şönt bağlı bir kapasiteden oluşmaktadır. Endüstriyel tesislerde yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Şekil 3.19’da temel FC-TCR tek hat şeması ve tetiklenme durumuna göre akım-gerilim dalga şekli görülmektedir.



Şekil 3.19 : FC-TCR tek hat şeması ve dalga şekli.

Bu sistemde ihtiyaç olan endüktif veya kapasitif reaktif enerji sisteme kolayca verilebilir. Ayrıca aynı şekilde sistemde fazla olan reaktif enerji FC-TCR vasıtasıyla sistemden emilir (Nasiru ve Yusuf, 2015).

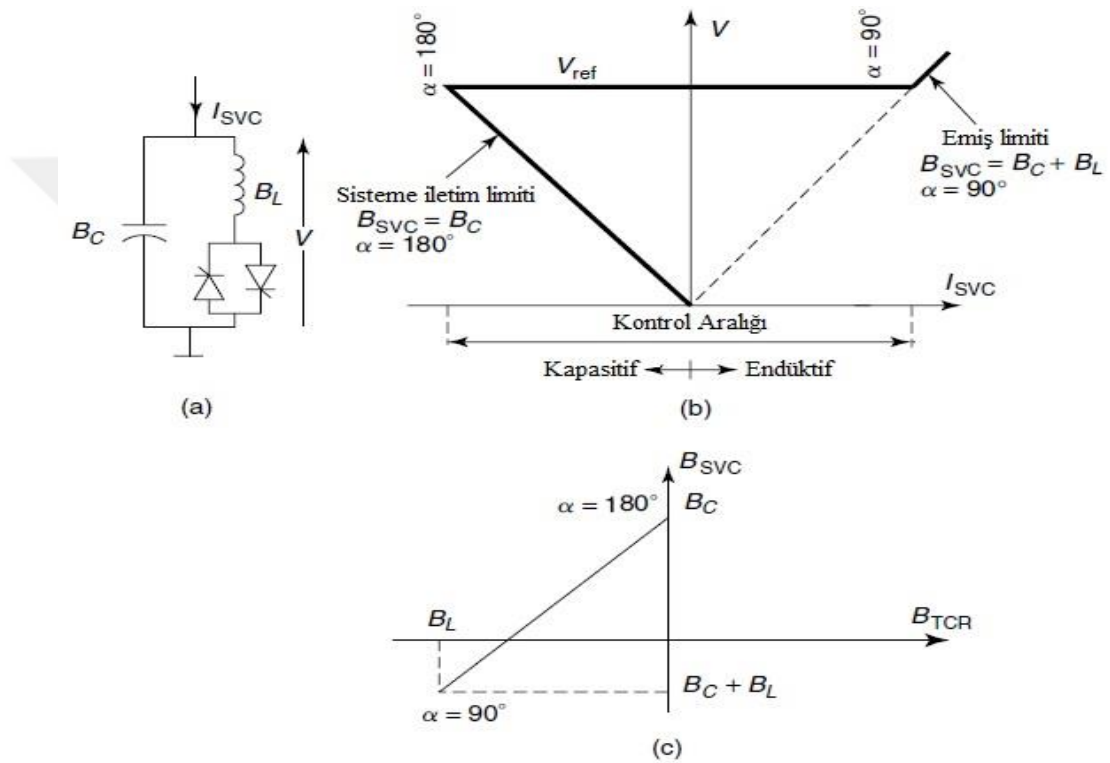
Burada sabit kondansatörlü statik VAR sisteminin akım ifadesi gerilimin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi verilir.

$$I_{TCRFC} = VjB_{SVC} \quad (3.22)$$

Burada;

$$B_{SVC} = B_C + B_{TCR} \quad \text{ve} \quad B_C = \omega C$$

Şekil 3.20'de sabit kondansatörlü SVC sisteminin sisteme reaktif enerji vereceği sınırlar, sistemden reaktif enerji emeyeceği sınırlar ve kontrol aralığı sırasıyla verilmiştir.

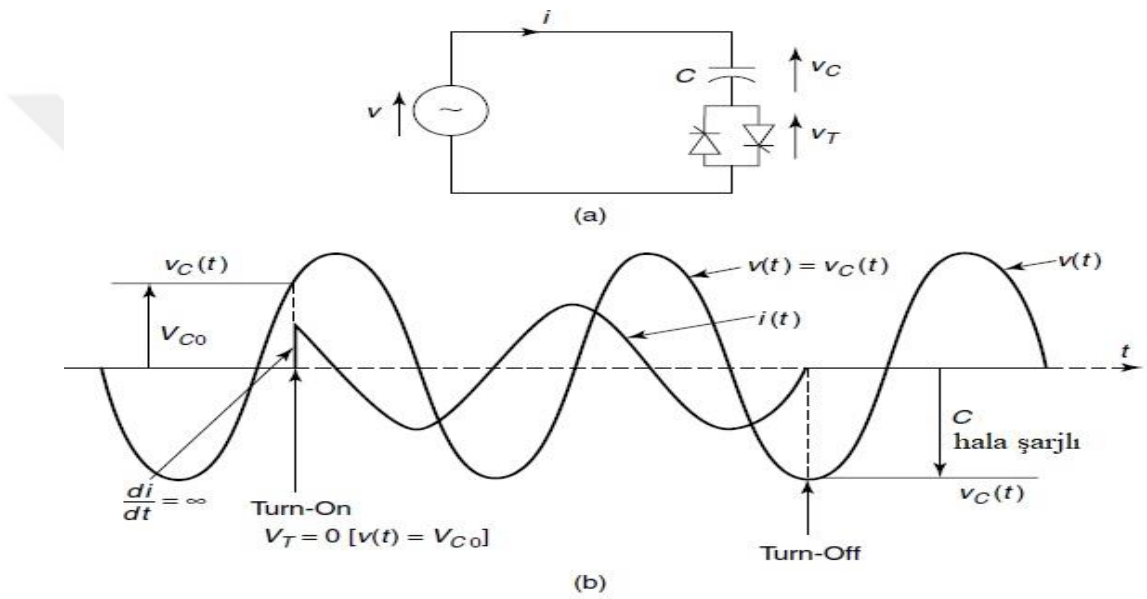


Şekil 3.20 : FC-TCR (a) prensip şeması, (b) reaktif güç kontrol aralığı, (c) suseptans aralığı.

### 3.3. Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC)

Tristör anahtarlama kapasitörleri (TSC), genellikle sabit kapasite tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) yerine kullanılan sistemlerdir. Tristör anahtarlama kapasitör yapısı, birbirlerine ters bağlı tristörler tarafından kontrol edilen bir kapasiteden oluşur. Komple bir statik VAR kompanzatöründe genellikle TSC ve TCR yapısı birlikte kullanılarak oluşturulur. Basit bir TSC yapısı akım ve gerilim dalga şekillerine birlikte Şekil 3.21'de gösterilmiştir.

Birbirlerine ters bağlı tristörlerin sıfır iletim veya tam kontrolü ile etkin reaktansı adımli olarak değiştirilen şönt bağlı tristör anahtarlamalı bir kapasitördür. TSC; alternatif akım kıyıcı ile buna seri bağlı bir kapasitörden meydana gelir. Birden fazla TSC yapısı (güçleri birbirlerine yaklaşık olarak eşit seçilerek) paralel olarak aynı yük barasına bağlanırlar. Reaktif güç talebi artıkça tristörler tetiklenerek ihtiyaç duyulan sayıda TSC devreye alınır (Karataş, 2011). TSC kontrol tekniği önceden kaynak geriliminin tepe değerine şarj edilen kondansatörün on-off yöntemiyle devreye alınıp çıkarılmasıyla yapılır (Gelen ve Yalçınöz, 2009).



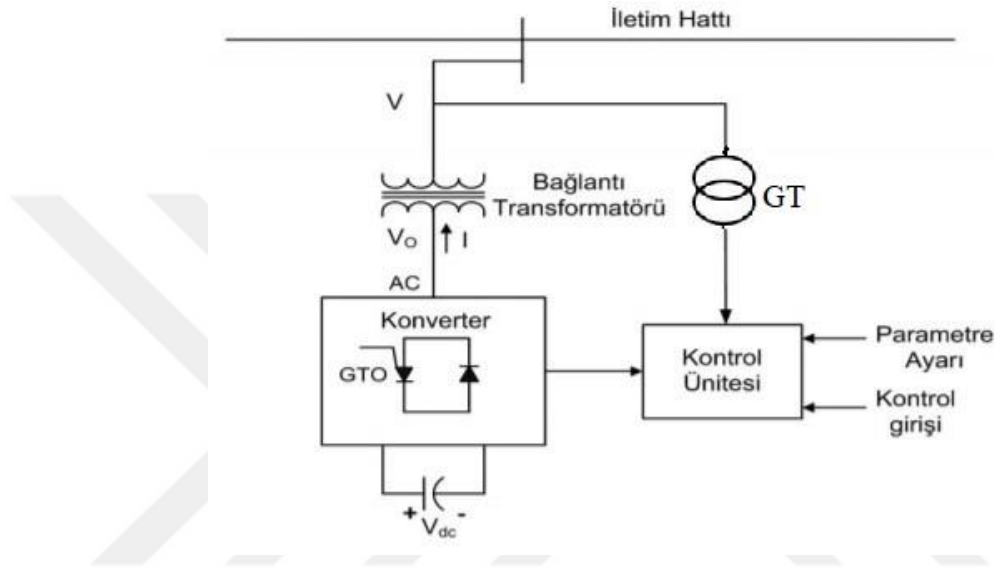
Şekil 3.21 : (a) TSC temel devre şeması (b) akım-gerilim dalga şekilleri.

### 3.4. STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör)

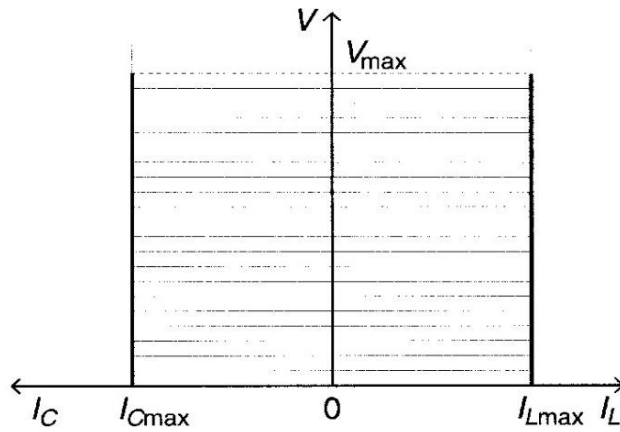
STATCOM, güç sistemlerinde kullanılan esnek alternatif akım iletim sistemi (FACTS) cihazlarından biri olan, güç akışı ve geçici durum kararlılığını iyileştirmek için kullanılan, gerilim kaynağı dönüştürücü (VSC) tip bir şönt cihazdır (Hingorani ve Gyugyi., 2000). Bu cihazlar bağlı buldukları baradaki gerilimi, sisteme reaktif güç vererek veya sistemden reaktif güç emerek yaparlar. Baradaki gerilim düştüğünde STATCOM sisteme reaktif güç verir ve baradaki gerilimi kompanze etmiş olur. Bağlı olduğu baradaki gerilim yükseldiğinde ise sistemden reaktif güç emerek kompanzasyonu sağlarlar.

Yapılan yasal düzenlemeler nedeniyle elektrik enerjisi sistemlerinde güç kalitesine olan ilgi her geçen gün artmaktadır. En önemli güç kalitesi problemlerinin başından gerilim

regülasyonu gelmektedir. Elektrik enerjisi sistemlerinde gerilimin genliği, sisteme reaktif güç enjekte ederek veya sistemden reaktif güç absorbe edilerek kontrol edilebilir. İletim ve dağıtım sistemlerinde geleneksel yöntemlerden olan doymuş reaktör, senkron generatör vb. gibi yöntemler uzun yıllardır güç kalitesini düzenlemek için kullanılmaktadır (Karataş, 2011). STATCOM devre şeması Şekil 3.22’de, V-I karakteristiği genel gösterimi ise Şekil 3.23’de verilmiştir.



Şekil 3.22 : Statcom devre şeması (Ertay ve Aydoğmuş, 2010).



Şekil 3.23 : Statcom V-I karakteristiği genel gösterimi.

STATCOM hem iletim hem de dağıtım sistemlerinde kullanılan evirici tabanlı bir esnek alternatif akım iletim sistemi cihazıdır. Kullanıldıkları sisteme şönt bağlanırlar. STATCOM sistemleri MVar mertebelerinde ve iletim hattının frekansında sürekli hem

kapasitif hem de endüktif güç üretebilmektedir. Bu yönüyle diğer statik VAR kompanzator sistemlerine üstünlük sağlamaktadır. Bu sistem geniş bir çıkış gerilimi aralığında mümkün olan en yüksek reaktif gücü üreterek, bu gücü sabit olarak verebilmektedir. Bu açıdan da diğer sistemlere üstünlük sağlayabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı STATCOM sistemi, iletim ve dağıtım sistemlerinde güç kalitesi problemlerinin çözümü için kullanılabilir.

STATCOM'un güç sistem performansına etkileri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- İletim ve dağıtım sistemlerinde dinamik voltaj kontrolü,
- İletim ve dağıtım güç dalgalanmalarının azaltılması,
- Geçici hal kararlılığı,
- Flicker kontrolü,
- Sadece reaktif gücün değil, aynı zamanda (gerekirse) bağlı hattın aktif gücünün kontrolü.

İletim ve dağıtım sistemlerinde kullanılan iki ayrı tip STATCOM bulunmaktadır. STATCOM (statik senkron kompanzator) yarı iletken devre elemanlarından oluşan güç elektroniği temelli bir FACTS yapısıdır. STATCOM bağlandığı şebekede meydana gelen değişimlere hızlı tepki verebilme yeteneği ile dinamik kararlılığa önemli derecede katkıda bulunur. Bu yetenek STATCOM yapısında kullanılan denetim devresi ile ilgilidir. Gelişmiş statik VAR kompanzatorü olan STATCOM, güç sisteminden reaktif akım çekecek şekilde kontrol edilen ve bir doğru akım enerji depolama elemanı ile üç fazlı sistem arasına bir inverter bağlanarak yapılan esnek alternatif akım iletim sistemi denetleyicisidir ve iletim hatların şönt bağlanırlar.

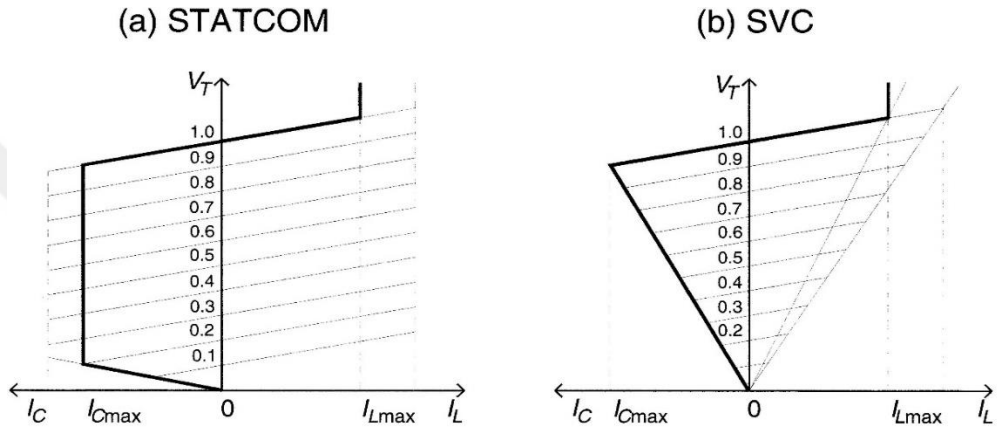
#### **3.4.1. STATCOM ve SVC sistemleri karşılaştırılması**

Daha önceki bölümlerde de açıklandığı gibi temel olarak STATCOM ve SVC sistemlerinin çalışma prensibi ve fonksiyonel kompanzasyon kapasitesi aynıdır. Fakat bununla birlikte dönüştürücü temelli VAR üretici olan STATCOM paralel bağlı senkron gerilim kaynağı gibi çalışırken, tristör anahtarlama kapasitör ve tristör kontrollü reaktör yapılarından oluşan SVC cihazları sisteme paralel bağlanarak reaktif admitans kontrol edilir. Bu sebeple SVC ile üretilen maksimum kapasitif güç sistem geriliminin karesiyle

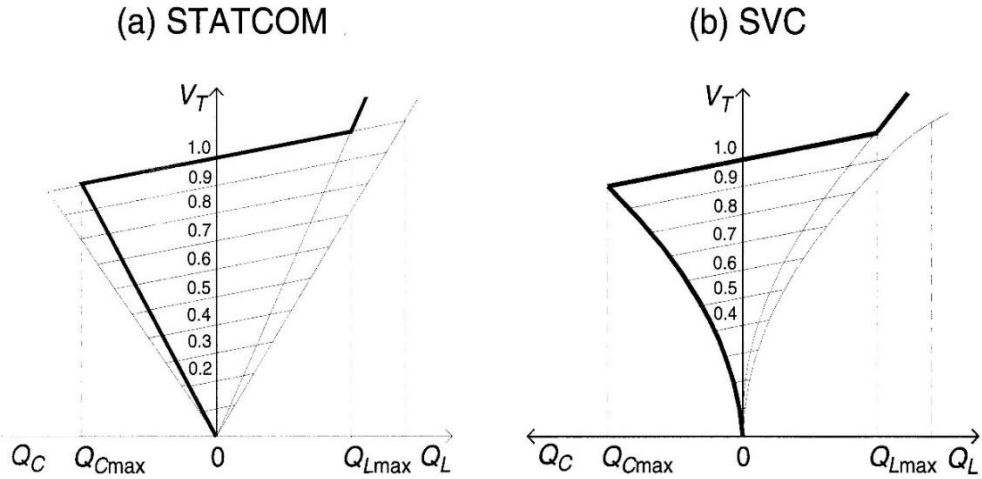


doğru oratılı olur fakat STATCOM tarafından üretilen maksimum kapasitif güç içerisinde bulunan VSC yapısı nedeniyle sistem geriliminden bağımsız olarak kontrol edilebiliyorken sistemden çekilecek veya sisteme verilecek olan reaktif güç sistem gerilimi ile orantılı olarak doğrusal bir şekilde değiştirilebilir. Bu temel fark STATCOM'un SVC karşısında daha iyi bir performans göstermesini sağlamaktadır.

Bu açıklamaların ışığında STATCOM ve SVC'nin V-I ile V-Q karakteristikleri karşılaştırılmalı olarak Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'de verilmiştir.



Şekil 3.24 : Statcom (a) ve Svc (b) V-I karakteristikleri (Hingorani ve Gyugyi, 2000).



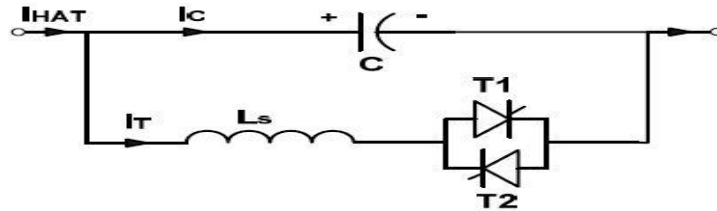
Şekil 3.25 : Statcom (a) ve Svc (b) V-Q karakteristikleri (Hingorani ve Gyugyi, 2000).

Bunlara ek olarak STATCOM içerisindeki VSC yapısı nedeniyle tepki süresi daha kısadır ve tristörler tetiklenirken SVC' de olduğu gibi bir gecikme (yaklaşık 4 ms) yaşanmaz.

### 3.5. Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)

Tristör kontrollü seri kapasitör, modern güç sistemlerinde, uzun iletim hatlarında farklı nedenlerden dolayı uygulama alanı genişleyen bir FACTS cihazıdır. Seri kapasitörlü kompanzasyonun sisteme, geçici kararlılığı geliştirme, güç transfer kapasitesini artırma gibi farklı faydaları vardır. Sisteme tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC) eklenmesiyle birlikte, seri kapasiteden dolayı sistem empedansı istenilen şekilde değiştirilebilir. Tristör kontrollü seri kapasitör, temel olarak tristör kontrollü reaktör (TCR) ve buna şönt bağlı olan bir kondansatörden oluşur. Tristör kontrollü seri kapasitörün eşdeğer empedansı sistemdeki tristör kontrollü reaktörün tetikleme açısının sürekli değiştirilmesiyle elde edilir. Bu sayede TCSC hattın kapasitif empedansını değiştirerek sistemin güç taşıma kapasitesini kontrol edebilmektedir. Şekil 3.26'da TCSC tek hat şeması gösterilmiştir (Kıyan, 2010).

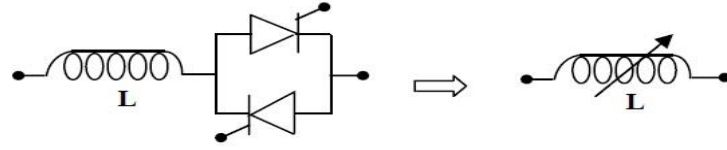
Dünyada ilk 3 faz 2x165 MVAR, TCSC 1992 yılında Amerika Birleşik Devletlerinin Arizona eyaletinde kurulmuştur. Sistem kurulduğunda iletim hattının güç iletim kapasitesini %30 artırdığı görülmüştür (Meikandasivam ve ark., 2008).



Şekil 3.26 : TCSC tek hat şeması.

TCSC iletim hattına seri bağlı bir kompanzasyon kondansatörüne paralel bağlı TCR sayesinde, sistemin empedansını değiştirerek kompanzasyon yaptığına değinilmiştir. Şekil 3.26'daki devrenin analizi yapılarak aşağıdaki devre denklemleri (Denklem 3.24 - 3.28) elde edilebilir.

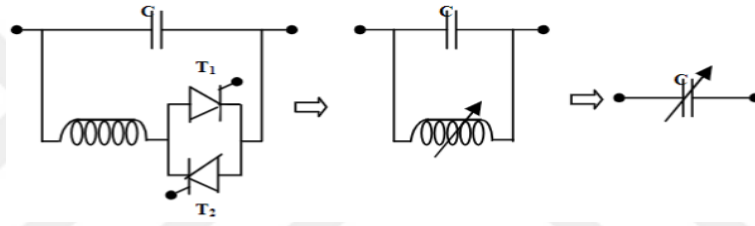
Devrenin TCR tarafının endüktif reaktansı, birbirlerine ters bağlı tristör grupları ile kontrol edilir ve bu endüktif reaktans doğrudan tristörlerin tetikleme açısı olan  $\alpha$  ile bağıntılıdır. TCR endüktans değişim formülü Denklem 3.23' de verilmiştir. TCSC yapısında değeri değişen endüktif reaktansın değişimini gösteren devre şekli Şekil 3.27 ile verilmiştir.



Şekil 3.27 : TCR endüktans değişimi şematik gösterimi.

$$X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha} \quad (3.23)$$

TCR ile paralel bağlı olan kapasitör yani kapasitif reaktansın değiştirilmesiyle TSCS iletim hattının empedansı da değiştirilmiş olur. Böylelikle iletim hattının güç iletim kapasitesi artırılmış olur (Meikandasivam ve diğ, 2008). TCSC eşdeğer devresi Şekil 3.28'de görülmektedir.



Şekil 3.28 : TCSC eşdeğer devresi.

Tristörlerin tetikleme açısı olan  $\alpha$  ile değişen TSCS endüktansı  $X_{TSCS}$ ;

$$X_{TSCS}(\alpha) = -X_C + C_1(2(\pi - \alpha) + \sin(2(\pi - \alpha))) - C_2 \cos^2(\pi - \alpha)(\hat{w} \tan(\hat{w}(\pi - \alpha)) - \tan(\pi - \alpha)) \quad (3.24)$$

Burada;

$$X_{LC} = \frac{X_C X_L}{X_C - X_L} \quad (3.25)$$

$$C_1 = \frac{X_C + X_L}{\pi} \quad (3.26)$$

$$C_2 = 4 \frac{X_{LC}^2}{X_L \pi} \quad (3.27)$$

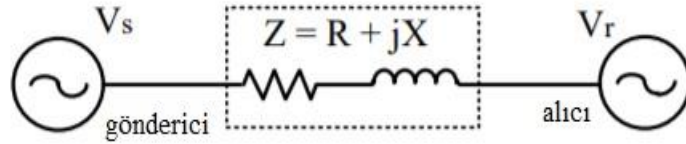
$$\hat{w} = \sqrt{\frac{X_L}{X_C}} \quad (3.28)$$

### 3.5.1. Seri kondansatörün güç iletimine etkisi

Bir iletim hattının sürekli hal güç iletim kapasitesi Şekil 3.29'daki iki makine güç sistemi modeli ile gösterilmiştir. Gönderici ve alıcı terminaller arasında güç transferi ilişkisi Denklem 3.29 ile verilmiştir.

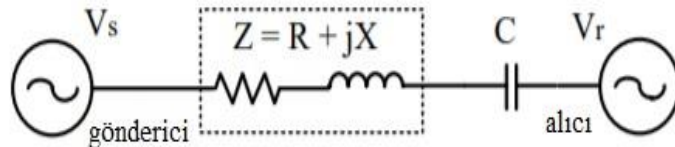
$$P = \frac{V_s V_L}{X_L} \sin \delta \quad (3.29)$$

Şekil 3.30'da ise seri kapasitör eklenen bir iletim hattının temsili gösterimi verilmiştir. Bu şekillerde  $V_s$  ile  $V_r$  gönderen ve alıcı bara terminallerini,  $X_L$  iletim hattının empedansını,  $\delta$  ise gönderici ve alıcı terminal gerilimleri arasındaki faz açısını temsil etmektedir.



Şekil 3.29 : İki makine iletim hattı.

İletim hattına seri bağlanacak kapasite ile iletim hattının empedansı düşürülecek ve bu sayede hattın güç iletim kapasitesi artacaktır.



Şekil 3.30 : Seri kapasitörlü iki makine iletim hattı.

İletilen güç formülize edilecek olursa;

$$P = \frac{V_s V_L}{X_L - X_C} \sin \delta \quad (3.30)$$

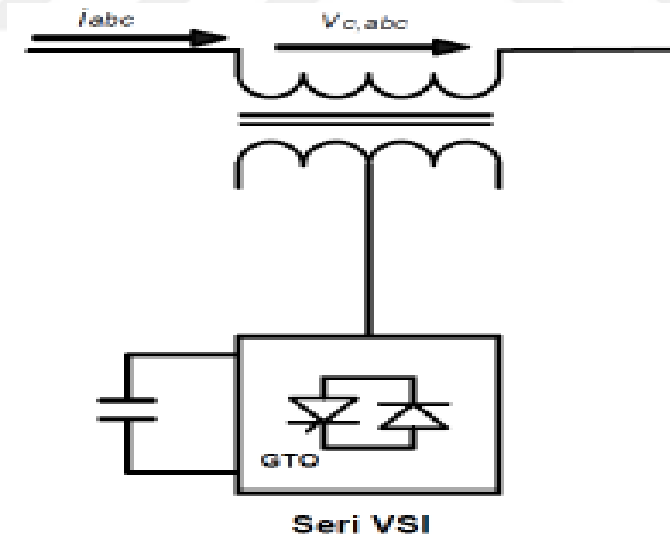
Burada  $X_C$  seri bağlı kapasitenin endüktif reaktansıdır. Denklem 3.30'dan anlaşılacağı üzere özellikle yüksek gerilim iletim hatlarında optimal bir noktaya entegre edilecek

TCSC uygulamalarıyla hattın empedansı düşürülerek iletim sisteminin güç transfer kapasitesi artırılabilir.

### 3.6. Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC)

SSSC bir doğru akım enerji kaynağı ve gerilim dönüştürücüden (voltage source converter-vsc) oluşur. Esnek alternatif iletim sistemi cihazlarından olan SSSC güç sistemlerine seri olarak bağlanır (Nalbantoğlu ve Güler, 2017). SSSC sistemdeki hat akımına bakılmaksızın endüktif veya kapasitif kompanzasyon gerilimi üretebilir. Ayrıca SSSC, çok hızlı (neredeyse anlık) cevap verme kapasitesine sahiptir.

SSSC hattın omik direncinin yanında hat reaktansını da değiştirebilme özelliğine sahiptir. Bu sebeple güç osilasyonlarını azaltma işlevi de görmektedir. Normal çalışma koşullarında SSSC'nin çıkış akımı geriliminden  $90^\circ$  ileridedir ve bu sayede anlık olarak seri kompanzasyon sağlanmış olur. SSSC içerisindeki VSC yapısı eğer yeterli kapasiteye sahipse iletim hattında oluşabilecek kısa devre akımlarının sınırlandırılmasında kullanılabilir (Dirik, 2006). SSSC tek hat şeması Şekil 3.31'de verilmiştir.



Şekil 3.31: SSSC tek hat şeması (Keçecioglu, 2012).

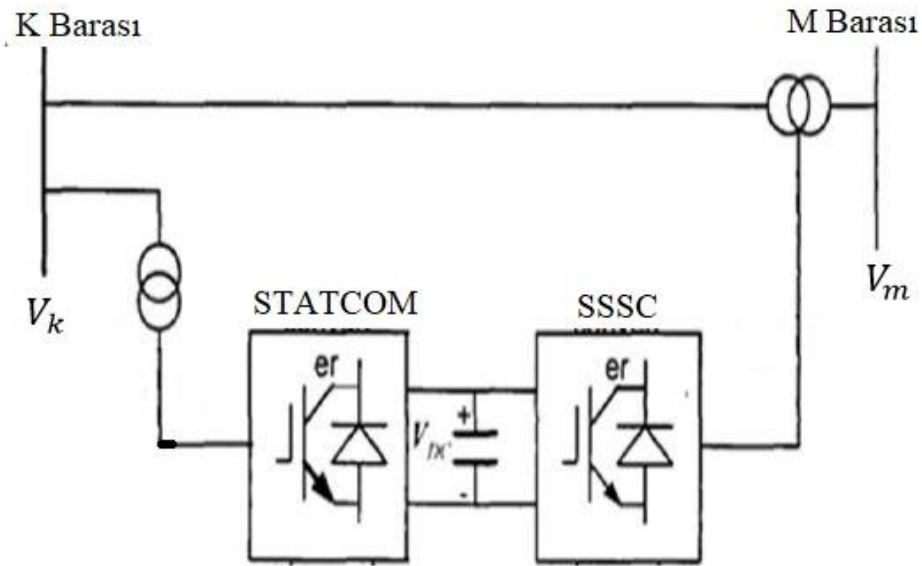
Statik senkron seri kompanzatör, güç sistemlerindeki reaktif ve aktif güç denetimini sağlamak amacıyla kullanılır. SSSC güç sistemlerine uygun faz açısında gerilim sağlayarak iletim hattının etkin empedansını değiştirir. Sistemde reaktif güç kontrolü gerilim genlik değerine bağlı olarak gerçekleştirilir. Aktif güç kontrolü ise açı genlik

değerine göre yapılmaktadır (Nalbantoğlu ve Güler, 2017). Eğer SSSC ile hatta enjekte edilen gerilim hattın akan akım ile aynı fazda olursa hat ile aktif güç alışverişi yapılabilir. Eğer hat akımı ile hatta enjekte edilen gerilim arasında  $90^\circ$  faz farkı varsa bu durumda hatta reaktif güç verilir veya hattın reaktif güç emilir (Keçecioglu, 2012).

### 3.7. Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (UPFC)

UPFC fikri 1995 yılında L. Gyugyi tarafından ortaya atılmıştır. UPFC, kararsızlık durumlarında güç elektroniği devre elemanları ile hızlı ve kararlı kontrol sağlayan bir kontrolördür (Khan ve diğ, 2017). STATCOM ve SSSC'nin birleşimi ile meydana gelir. STATCOM'un paralel çıkış terminalleri ile SSSC'nin seri giriş terminalleri ile arasında çift yönlü gerçek güç akışını sağlayacak şekilde ortak bir DC link aracılığıyla bağlantısı ile elde edilir. Dışarıdan bir elektrik enerjisine ihtiyaç duymaksızın eşzamanlı seri aktif ve reaktif güç kompanzasyonu yapar. İletim hattının gerilimi, empedansı ve açısı ya da alternatif olarak hattaki aktif ve reaktif güç akışını eşzamanlı veya seçmeli olarak kontrol edebilecek seri gerilim üretimi UPFC ile sağlanabilir. UPFC tek başına kontrol edilebilen bağımsız güç kontrolü sağlayabilir.

Şekil 3.32'de UPFC kompanzatorüne ait eşdeğer devre gösterilmiştir (Oluwagbade ve diğ, 2015).



Şekil 3.32 : Upfc tek hat şeması (Oluwagbade ve diğ, 2015)

## BÖLÜM 4. ÜÇ FAZLI SİSTEMLERDE ARIZALAR

### 4.1. Kısa Devre Kavramı

Bir elektrik devresinde, genellikle farklı veya eşit gerilime sahip birden fazla noktanın bağıl olarak empedans veya düşük direnç üzerinden istemeden veya kasten birbirine temasına kısa devre denir (IEEE, 1992).

### 4.2. Üç Fazlı Sistemlerde Simetrik ve Asimetrik Arıza Kavramları

Elektrik enerjisi sistemlerinde oluşan arızaların büyük bölümü asimetrik (dengesiz) arızalardan oluşmakta, oldukça az bir kısmı ise simetrik (dengeli) arızalardan meydana gelmektedir. Bu tür arızaların oluşma sıklığı genel olarak; çevre şartlarına, şebekenin yapısına ve bölgeye göre değişse de bu arızaların oluşma sıklığı Tablo 4.1’ de gösterildiği gibidir.

Tablo 4.1: Asimetrik ve Simetrik arızaların oluşma sıklıkları.

Arıza Tipi	Oluşma Sıklığı
Üç fazlı simetrik kısa devre arızası	5%
İki faz-toprak kısa devre arızası	10%
Faz-faz kısa devre arızası	15%
Faz-toprak kısa devre arızası	70%

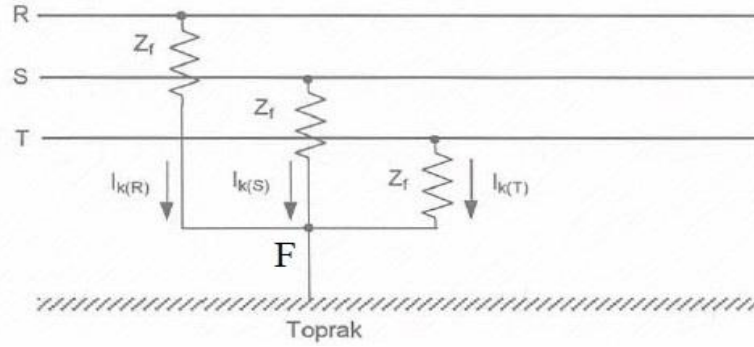
Üç fazlı simetrik kısa devre arızası nadiren meydana gelir. Genelde iletim hataları sonunda oluşur (gerilim altındaki hatların yanlışlıkla topraklanması gibi). Arızaların

önemli bir kısmı, başlangıcı farklı olsa da üç fazlı kısa devre arızalarına dönüşebilir (Tür ve Aydoğmuş, 2011).

### 4.3. Simetrik Kısa Devre Arızaları

Simetrik kısa devre arızası simetrik-dengeli bir arıza olup, her fazda kısa devre akımlarının değerleri farklı olmasına rağmen modül olarak birbirlerine eşittir. (Küçük, 2018).

Şekil 4.1’ de üç fazlı kısa devrenin genel gösterimi verilmiştir.  $F$  noktasında oluşan simetrik kısa devre durumunda oluşan kısa devre empedansı  $Z_f$  ile gösterilmiştir. Bu durumda 3 faz birbirine temas ettiğinden dolayı kısa devre noktasında gerilim 0 Volta düşmektedir.



Şekil 4.1 : Üç fazlı kısa devre durumunun gösterimi.

### 4.4. Asimetrik Kısa Devre Arızaları

Bu tip arızalar fazlardan her hangi birinin toprağa veya toprağa teması olan gövde elemanlarına temas etmesi veya fazlar arasında oluşabilecek bir temas nedeniyle oluşmaktadır.

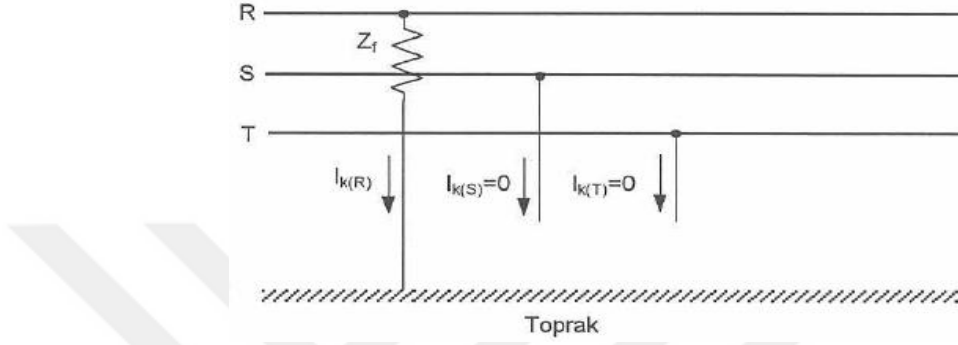
#### 4.4.1. Faz-Toprak kısa devresi

Bu kısa devre durumu; genellikle yanlış manevralar, faz iletkenlerinin izolasyonunda oluşabilecek her hangi bir bozulma nedeniyle toprağa temas veya elektriksel yanlış



manevralar nedeniyle faz iletkenlerinin toprakla bağlantılı gövdeye teması nedeniyle meydana gelmektedir.

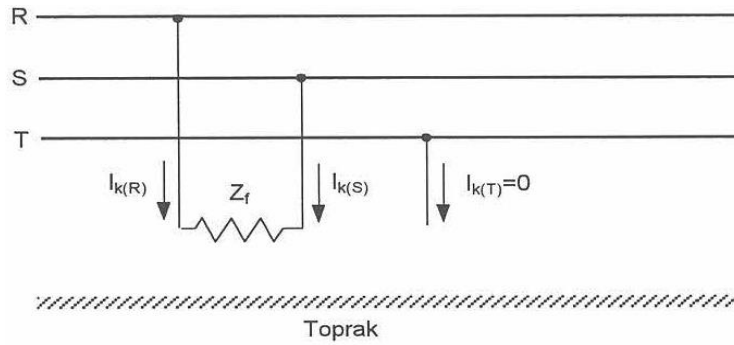
Şekil 4.2’ de faz-toprak kısa devresinin genel gösterimi verilmiştir. Oluşan kısa devrenin empedansı  $Z_f$  ile gösterilmiştir. Bu tür kısa devre durumlarında kısa devre olan fazın gerilimi sıfıra düşmektedir.



Şekil 4.2 : Faz-toprak kısa devre durumunun gösterimi (Küçük, 2018).

#### 4.4.2. Faz-Faz kısa devresi

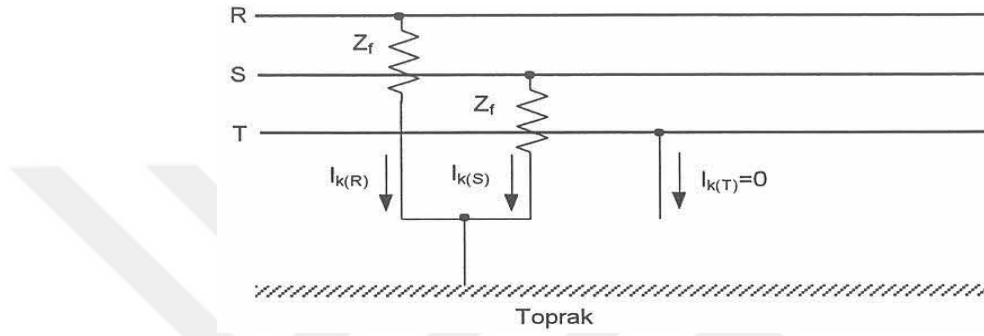
Bu tür kısa devreler genel olarak aynı siper içerisinde olan iletken izolasyonlarının deformasyonu nedeniyle birbirlerine teması nedeniyle oluşmaktadır. Şekil 4.3’de bu durum gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Faz-faz kısa devre durumunun gösterimi (Küçük, 2018).

#### 4.4.3. İki Faz - Toprak kısa devresi

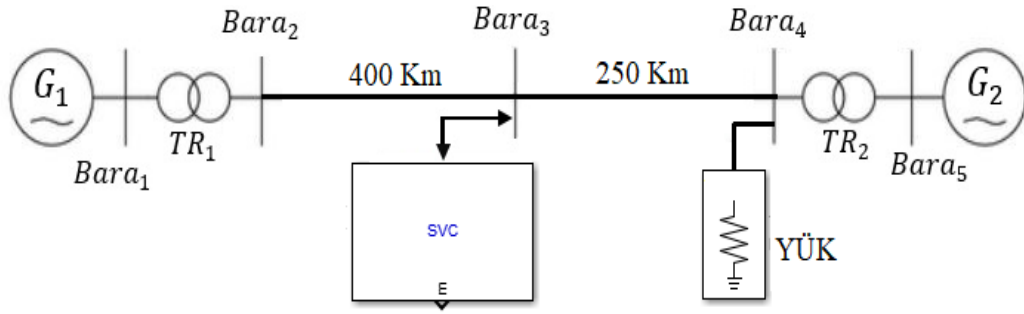
Bu arıza durumunda kısa devre olan fazlar arasındaki gerilim sıfıra düşer. Bu tür arızalar direkt olarak toprakla bağıntılı olan nötr veya koruma iletkenine temas nedeniyle oluşabilmektedir. Çok sık görülmemekle birlikte elektriksel yanlış manevralar da bu arızaya yol açabilmektedir. Şekil 4.4.'de R ve S fazları arasında oluşan bu arıza durumunun şematik gösterimi verilmiştir.



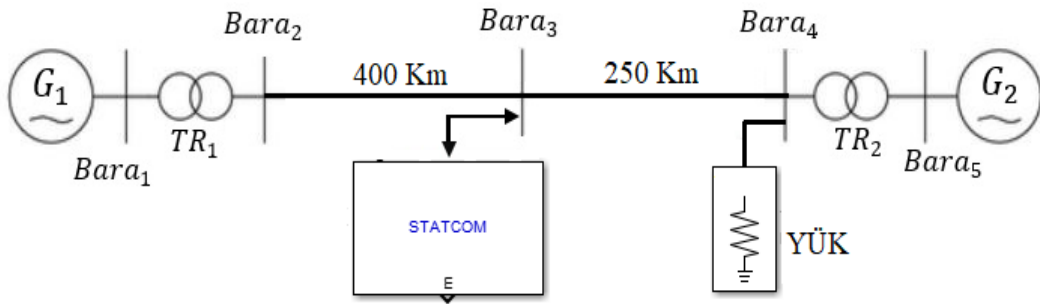
Şekil 4.4 : İki Faz-Toprak kısa devre durumunun gösterimi (Küçük, 2018).

## BÖLÜM 5. TASARIM YÖNTEMİ VE BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu tez çalışmasının son bölümünde daha önceki bölümlerde anlatılmış olan statik VAR kompanzatorlerinin, farklı zamanlarda oluşan simetrik ve asimetrik arıza durumlarında iki makinalı sistemin çalışmasına ve kararlılığına yaptığı etkiler ayrıntılı olarak incelenmiş ve farklı tip FACTS cihazlarının sisteme etkileri karşılaştırılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de tek hat şemaları gösterilen iki makinalı sistem kullanılmıştır. Sisteme şönt bağlanan FACTS cihazları, uygulanan simetrik ve asimetrik arıza durumlarında generatör senkronizasyonlarının bozulmaması ve sonuç olarak sistem kararlılığının sürdürülebilmesi için eklenmiştir.



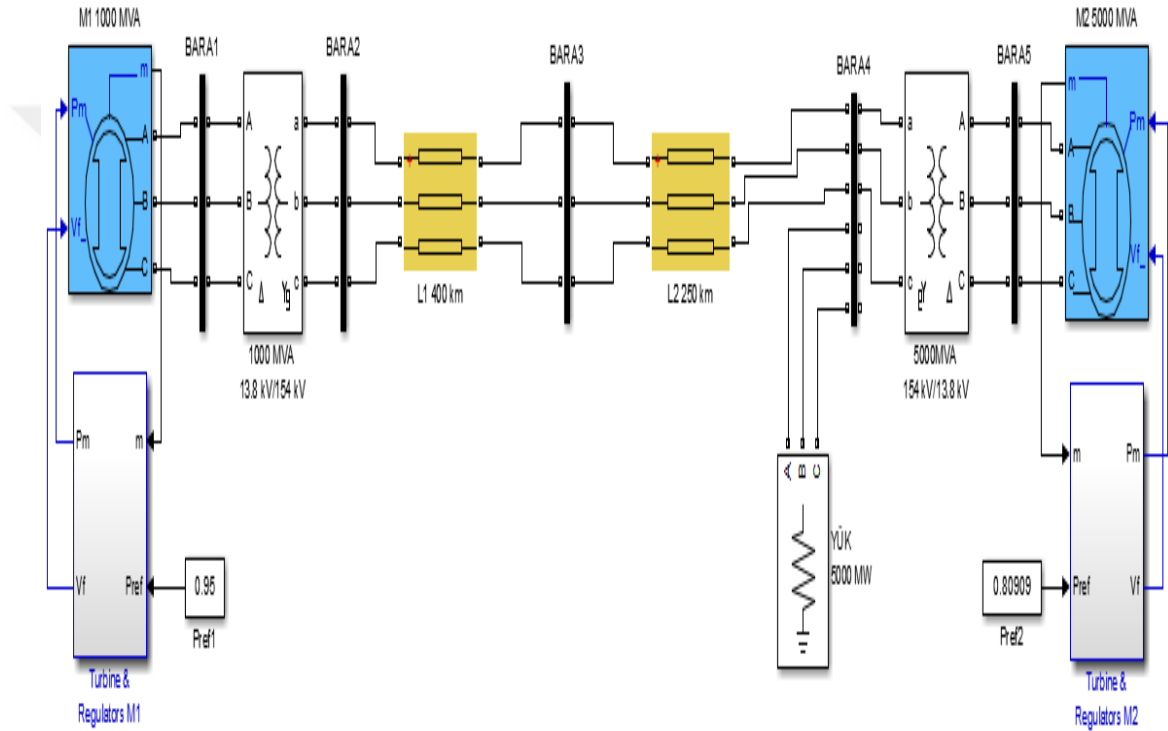
Şekil 5.1 : SVC bağlanan iki makinalı sistem tek hat şeması.



Şekil 5.2 : STATCOM bağlanan iki makinalı sistem tek hat şeması.

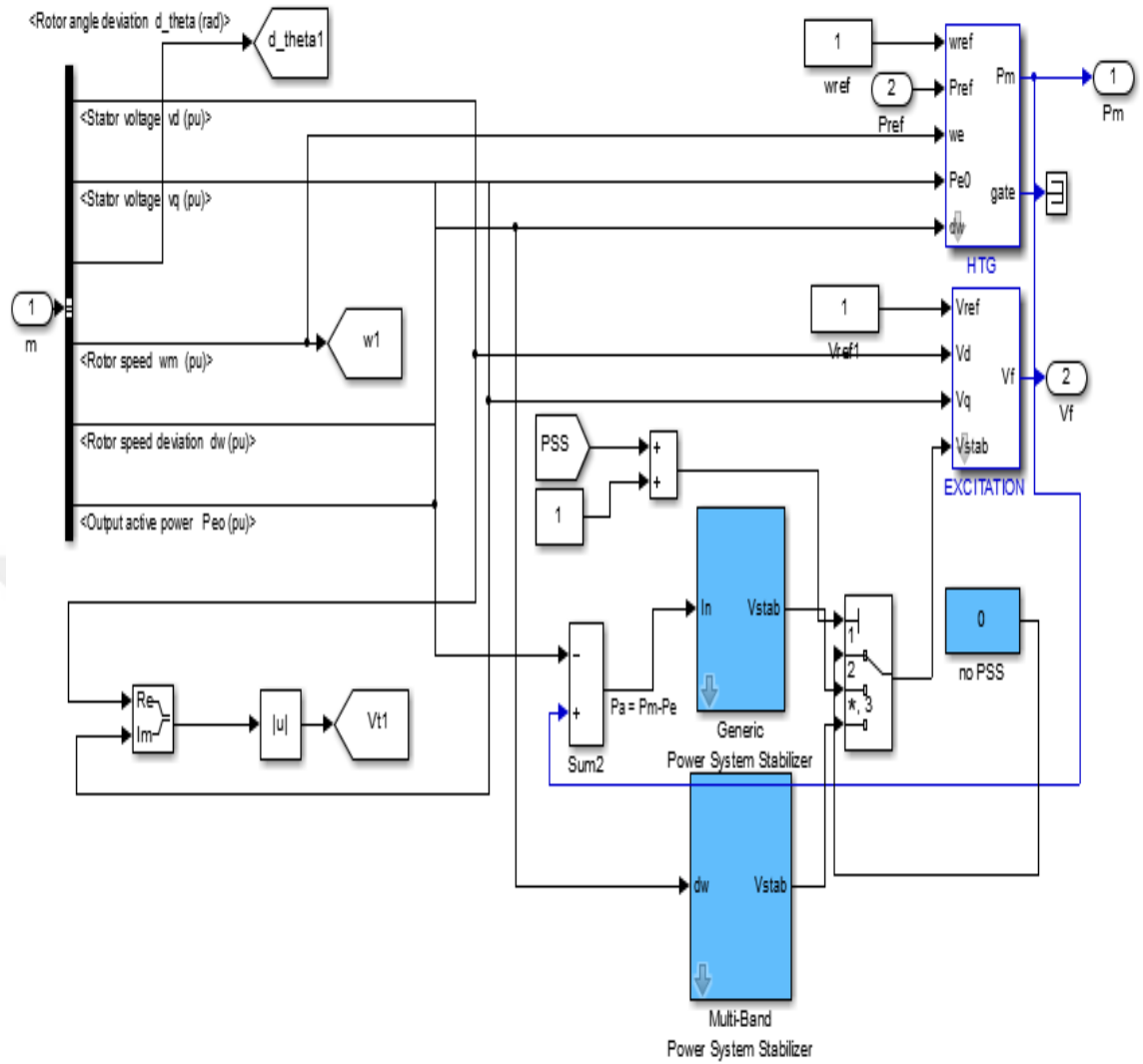
## 5.1. Uygulama Yapılan Sistem

Şekil 5.3’de yapılan benzetim çalışmasında  $G_1$  1000 MW gücünde PV üretim barası olarak ayarlanmış hidrolik türbin-governor sistemiyle birlikte temsil etmektedir. Bu generatör ve salınım barası olarak ayarlanan 5000 MW kapasitede  $G_2$  generatörü ile birlikte 650 km uzakta tamamen omik özellikte 5000 MW değerinde yükü beslemektedir. Matlab powergui bloğu ile yapılan yük akışı analizinde sistemin güç transferi kapasitesinin yaklaşık 950 MW olduğu görülmüştür.



Şekil 5.3 : Tasarlanan sistemin simulink diagramı.

Generatörü kontrol eden sistem governor, pss (güç sistem dengeleyicisi) ve uyarım ünitelerinden oluşmaktadır. Bu sistemin blok diagramı Şekil 5.4’de gösterilmiştir.

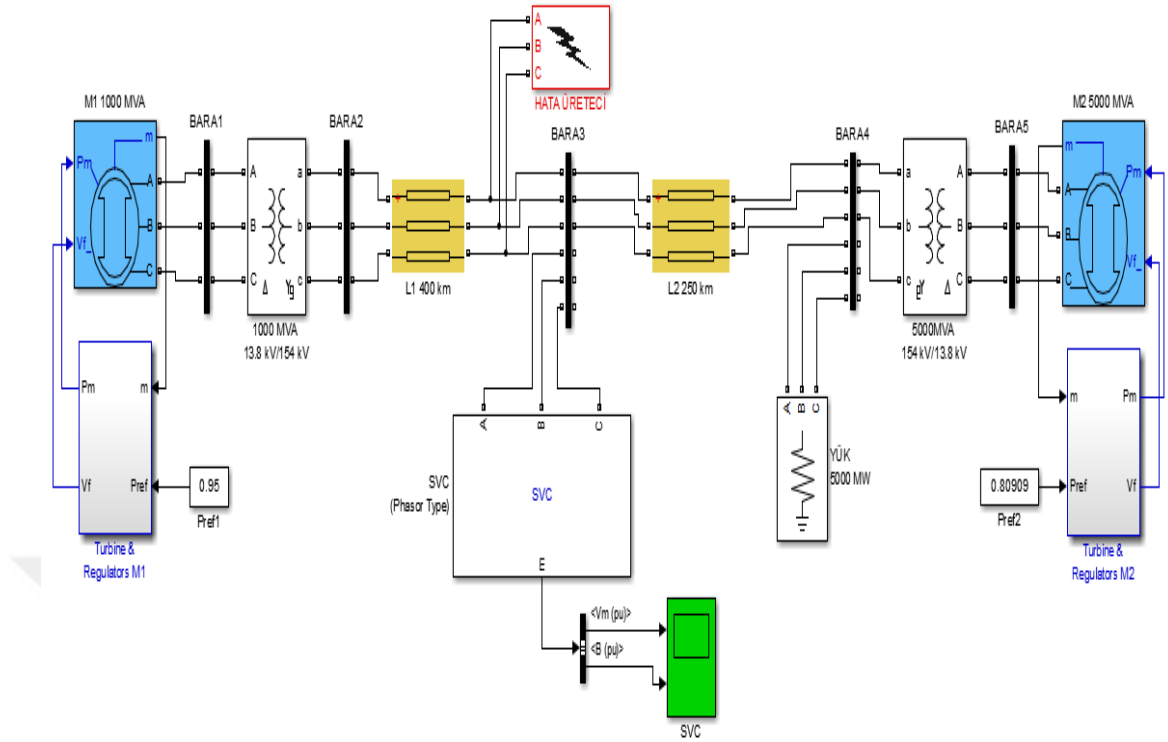


Şekil 5.4 : Generatörlerin kontrol sistemi.

**Güç Sistem Dengeleyicisi:** Yüksek kazançlı ve hızlı tepki sürelerine sahip olan uyarma sistemleri geçici kararlılığa büyük ölçüde yardımcı olur, ancak küçük sinyal kararlılığını da azaltabilir. Güç sistemi dengeleyici (PSS) kontrolü, güç sisteminde geniş bir frekans aralığında bulunan generatör rotor açısı salınımlarını sönümleyerek kararlılığa olumlu bir katkı sağlar.

## 5.2. Asimetrik Hata Durumunda SVC'nin Kararlılığa Etkisi

Şekil 5.5'de oluşturulan sistemde  $Bara_2$  ve  $Bara_3$  arasında oluşan asimetrik bir arıza durumunda kararlılığın yani güç iletiminin devam edip etmediği irdelenmiştir.



Şekil 5.5 : SVC sistemi asimetrik hata durumunda sistem blok diagramı.

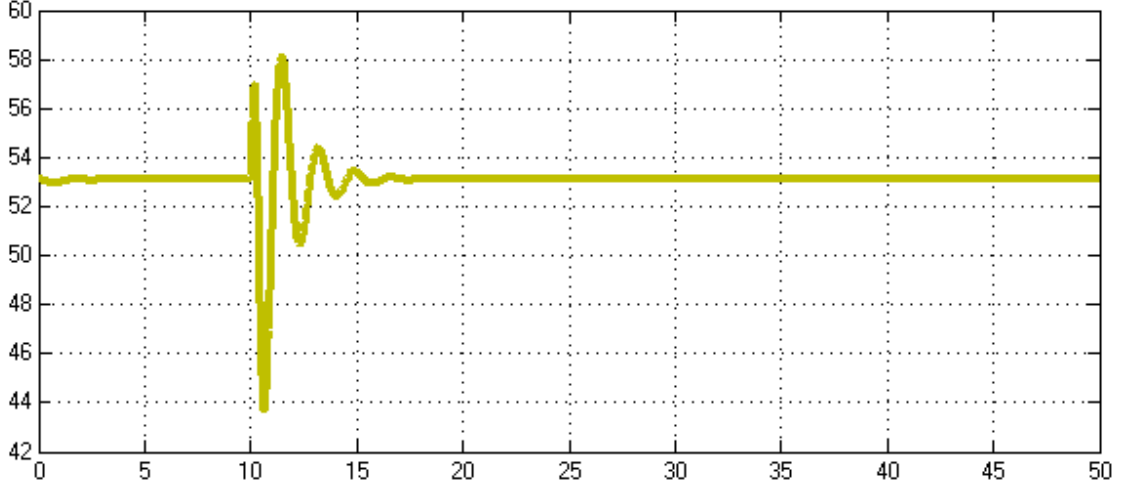
Şekil 5.5’de gösterilen iki makinalı sisteme iki faz – toprak arası asimetrik bir hata uygulanarak benzetimi yapılmış ve sonuçları verilmiştir. Bu sistemde SVC’nin etkin kompanzasyon sahası  $\pm 100$  MVar kapasitede olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca generatör parametreleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 : SVC’li sistemde kullanılan generatörlerin parametreleri.

Generatör		Parametreler									
P	Rs	Xd	X’d	X’’d	Xq	X’’q	Xl	H	T’d	T’’d	Tqo’’
1000	0.002854	1.311	0.298	0.250	0.472	0.243	0.17	3.7	1.01	0.0532	0.1
5000	0.002844	1.304	0.296	0.252	0.473	0.243	0.18	3.7	1.01	0.0531	0.1

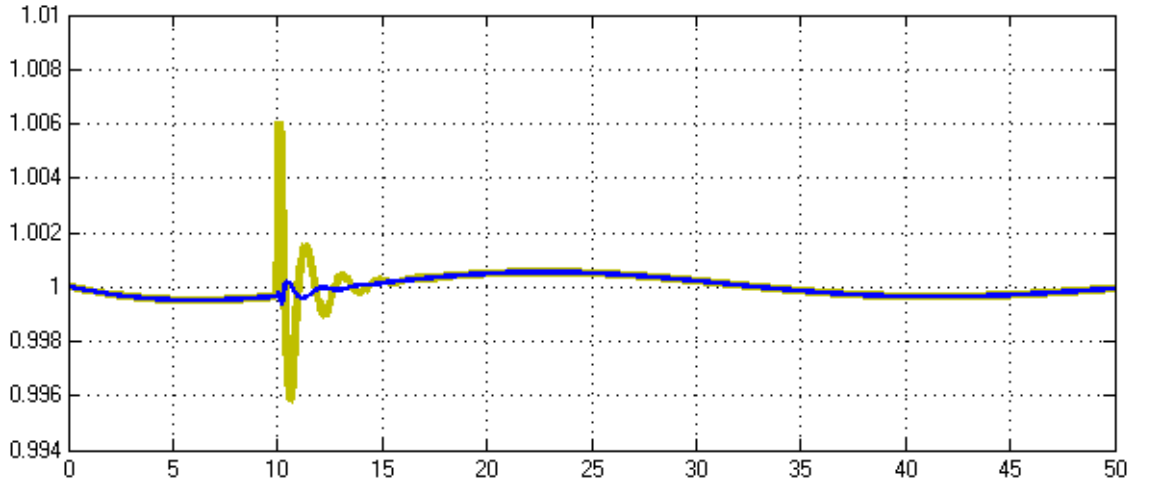
Matlab/Simulink ortamında benzetim 50 saniye için çalıştırılmıştır. Sisteme 10. saniyeden itibaren iki faz-toprak (2L-G) hatası uygulanmıştır. Bu hata 0.1 saniye boyunca devam etmiştir. Daha sonra ortadan kaldırılmıştır.

Şekil 5.6’da verilen diagramda hata anında iki generatör arasındaki rotor açı farkının yaptığı salınım görülmektedir. Fakat hata durumu bittikten sonra sistem yaklaşık 5 saniye içerisinde toparlanarak iki generatör arasındaki açı farkının sabit kaldığı görülmüştür.



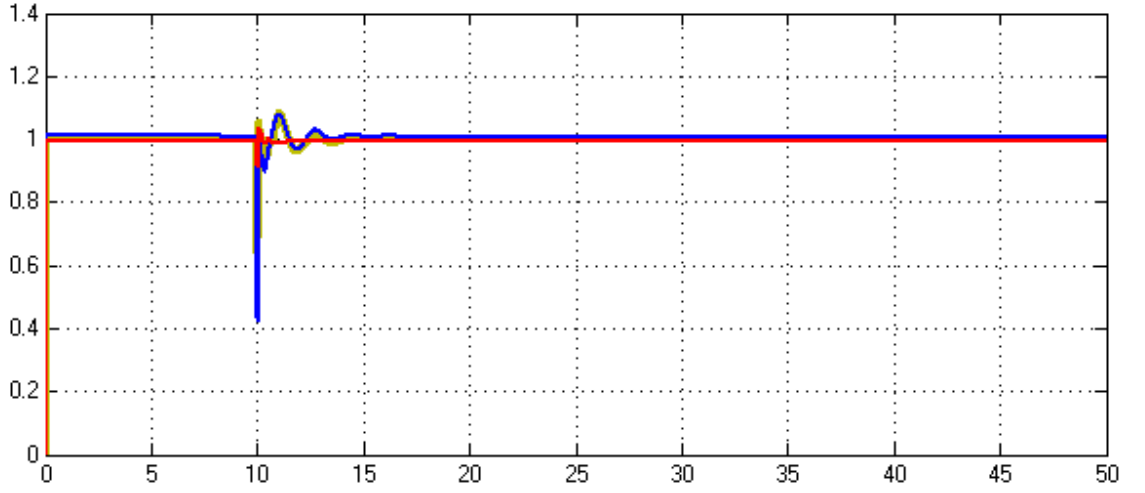
Şekil 5.6 : SVC sistemi 2L-G hatası durumunda iki generatör arasındaki açı farkı.

Şekil 5.7’de görüldüğü gibi hata anında  $G_1$  generatöründe rotor hızı 0,996-1.006 pu arasında değişmektedir. Buna rağmen sistemin kararlılığı korunmuştur.

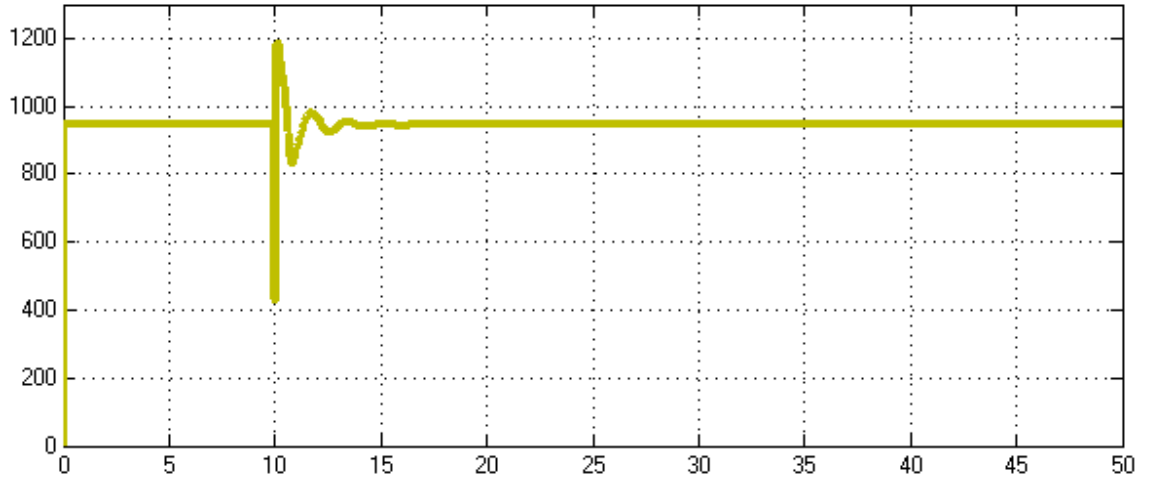


Şekil 5.7 : SVC sistemi hata anında generatörlerin rotor hız salınımları.

Şekil 5.8’de hata anında bara gerilimlerinin değerleri gösterilmektedir. Hata anında  $B_2$  barasındaki gerilimin 0.4 pu değerine kadar düştüğü görülmüştür. Hata 0.1 saniye sürmesine rağmen baralardaki gerilimlerin nominal değerlere gelmesi yaklaşık 5 saniye sürmüştür.



Şekil 5.8 : SVC sistemi hata anındaki bara gerilimleri.



Şekil 5.9 : SVC sisteminde güç akışı.

Şekil 5.9’da sistemde iletilen gücün hata anında 480 MW mertebelerine kadar düştüğü gösterilmektedir. Hata ortadan kalkmasının ardından yaklaşık 4 saniye içerisinde sistem toplanarak kendi nominal değeri olan 950 MW güç iletimine devam etmiştir.

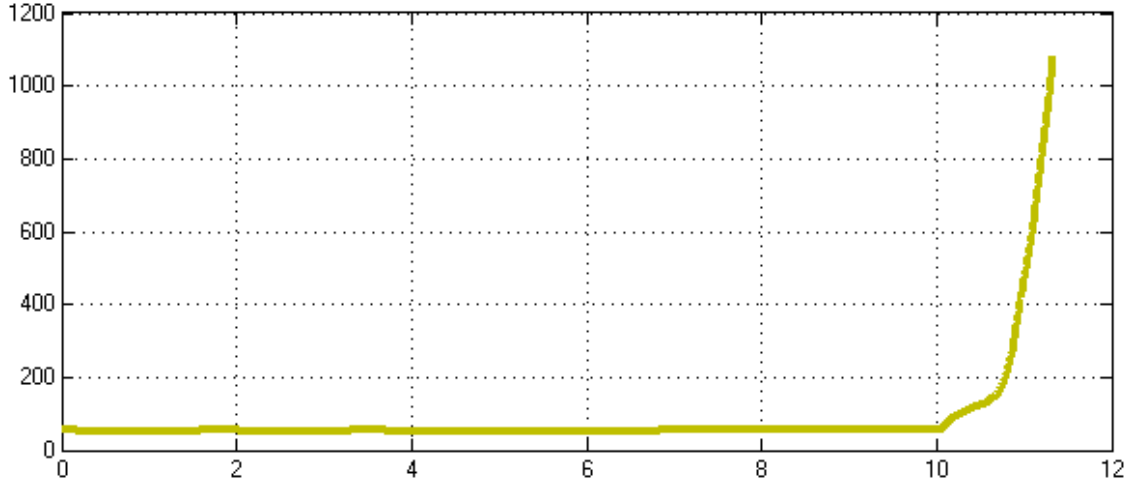


Sonuç olarak SVC'nin tek fazlı asimetrik bir hata durumunda sistemin kararlılığının korunmasına yardımcı olduğu söylenebilmektedir.

### 5.3. Simetrik Hata Durumunda SVC'nin Kararlılığa Etkisi

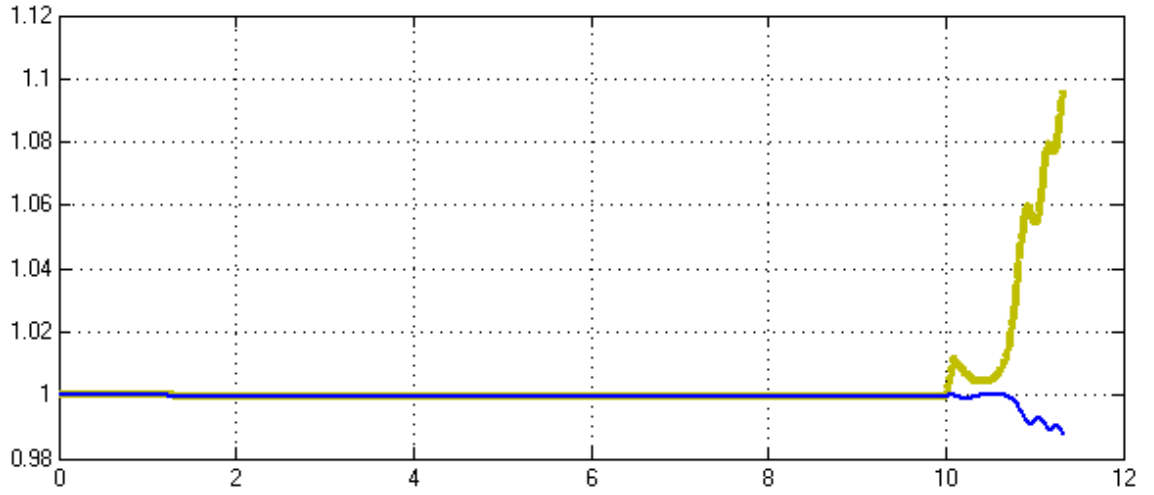
Şekil 5.5'de gösterilen sisteme 3 faz simetrik toprak hatası (3L-G) uygulanarak SVC'nin sistem kararlılığına olan etkisi incelenmiştir. Matlab/Simulink ortamında benzetim tekrar 50 saniye için çalıştırılmıştır. Sisteme 10. saniyeden itibaren üç faz-toprak hatası uygulanmıştır. Bu hata 0.1 saniye boyunca devam etmiştir.

Şekil 5.10'da 3 faz – toprak hatası (simetrik hata) durumunda sistemde kullanılan generatörler arasındaki rotor açı farkları gösterilmektedir.

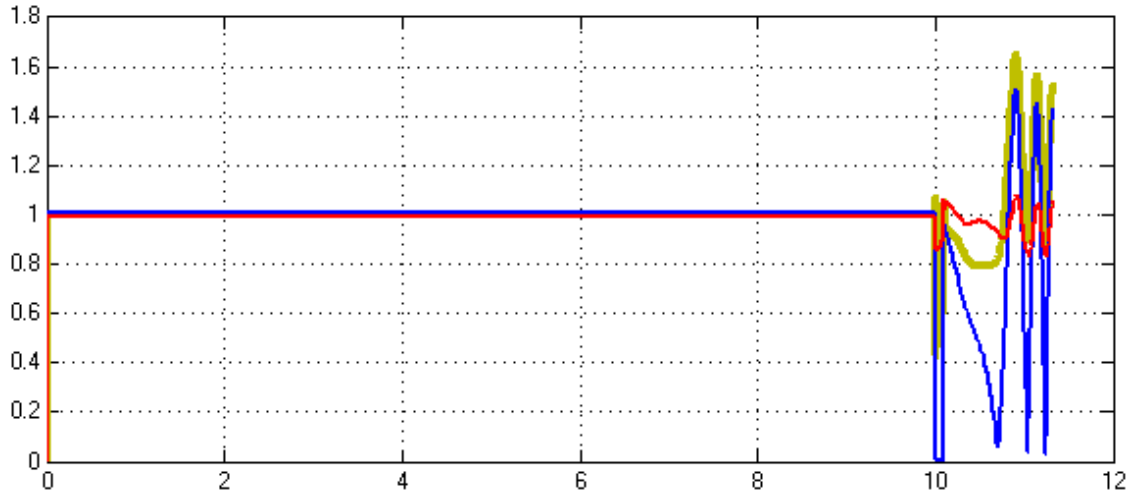


Şekil 5.10 : SVC sistemi 3L-G hatası durumunda iki generatör arasındaki rotor açı farkı.

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 incelendiğinde generatörlerden arasındaki senkronizasyonun kaybolduğu rotor hızlarının hata oluşumundan sonra, 1 saniye içerisinde %10 arttığı ve nominal değerlerin üzerine çıktığı görülmüştür. Yapılan benzetim 50 saniye için çalıştırılmasına rağmen sistem senkronizasyonu ortadan kaybolduğundan 11.1 saniye sonunda acil durum durdurma kesmesi çalışmış ve generatörlerin korunması için hata oluşumundan 1.1 saniye sonra benzetim durmuştur. Şekil 5.12'deki bara gerilimlerine bakıldığında hatanın oluştuğu noktaya yakın olan  $B_2$  ve  $B_3$  baralarında gerilimin aşırı salınım yaptığı görülmüştür.  $B_2$  barasında 0 ile 1.5 pu arasında değişen bir salınım,  $B_3$  barasında ise 0.8-1.6 pu arasında değişen bir salınım görülmüştür. Bu değerler neticesinde sistemde senkronizasyonun kaybolduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.11 : SVC sistemi 3L-G hatası durumunda generatörlerin rotor hızları.



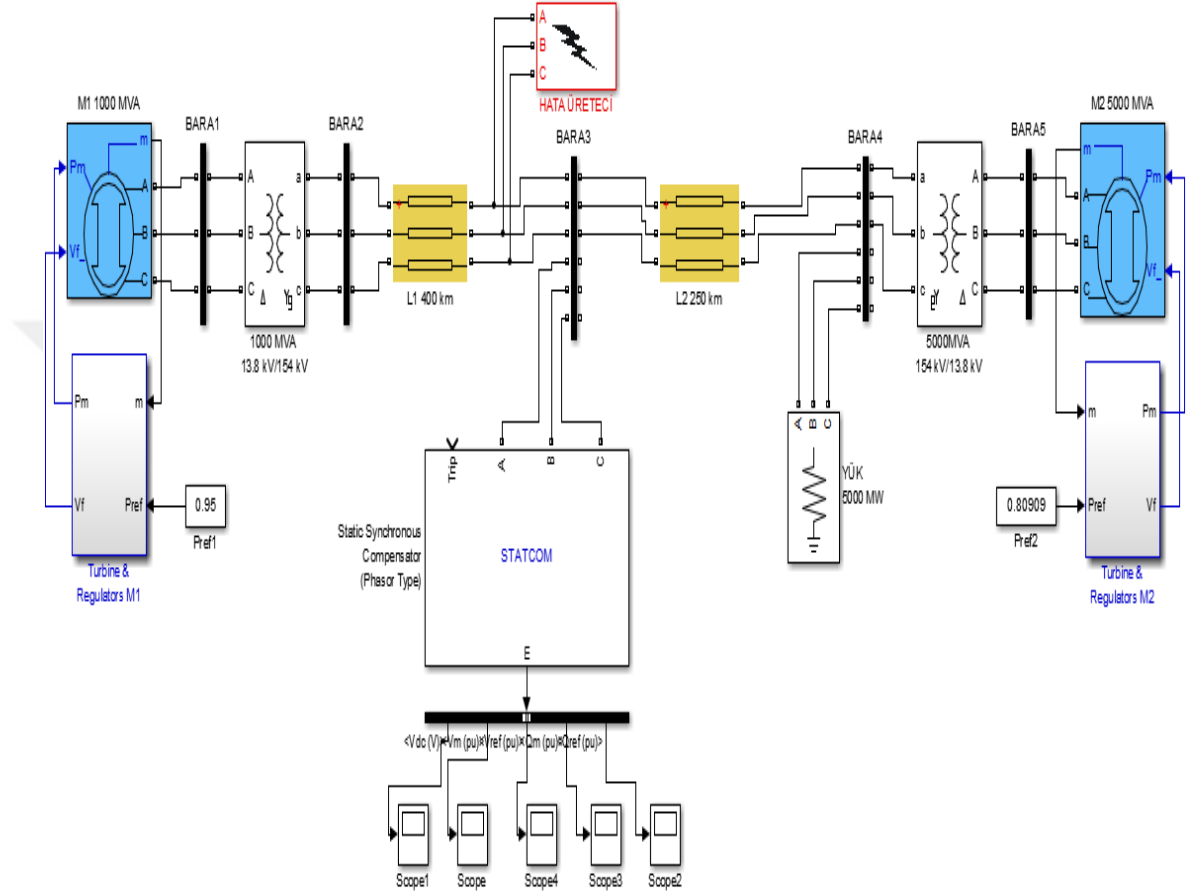
Şekil 5.12 : SVC sistemi 3L-G hatası durumunda bara gerilimleri.

Sonuç olarak TCR ve TSC yapılarından oluşan statik VAR kompanzatorlerinin asimetrik hata durumlarında sistemin kararlılığının korunmasına yardımcı olduğu görülmüştür. Fakat simetrik hata durumlarında SVC sisteminin yetersiz kaldığı anlaşılmıştır.

Aynı hata durumlarında farklı bir FACTS cihazı yapılacak kompanzasyonun sistem kararlılığına etkisi incelenerek karşılaştırma yapılmıştır.

#### 5.4. Asimetrik Hata Durumunda STATCOM'un Kararlılığa Etkisi

Şekil 5.13'de oluşturulan sistemde  $B_2$  ve  $B_3$  baraları arasında oluşan asimetrik bir arıza durumunda güç sisteminin kararlı çalışmasına devam edip etmediği incelenmiştir.



Şekil 5.13 : STATCOM sistemi asimetrik hata durumunda sistem blok diagramı.

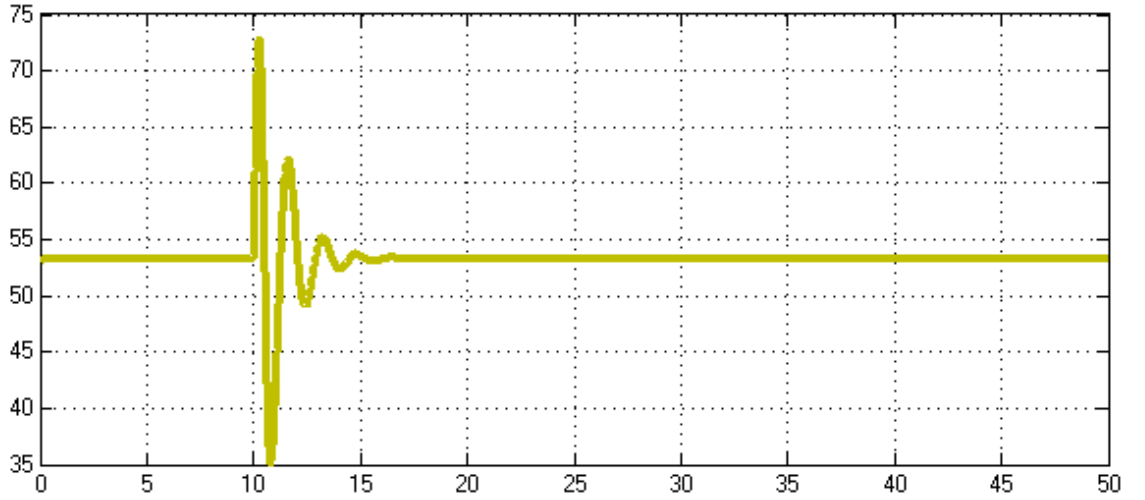
Tablo 5.2 : STATCOM'lu sistemde kullanılan generatörlerin parametreleri.

Generatör		Parametreler									
P	$R_s$	$X_d$	$X'd$	$X''d$	$X_q$	$X''q$	$X_l$	H	$T'd$	$T''d$	$T_{qo}''$
1000	0.002854	1.307	0.295	0.251	0.472	0.241	0.16	3.7	1.01	0.053	0.1
5000	0.002844	1.304	0.296	0.252	0.473	0.243	0.18	3.7	1.01	0.0531	0.1

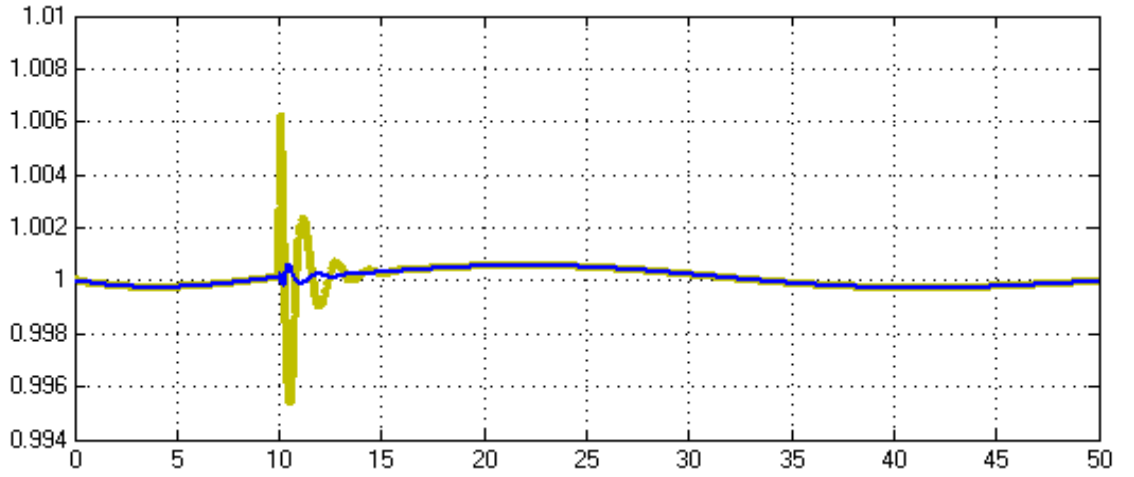
Tablo 5.3 : STATCOM parametreleri.

STATCOM Parametreleri			
Konvertör Kapasitesi	DC Gerilim	Kapasitör	Konvertör Empedansları
100MVA	35KV	350uF	0,0073 - 0.22

SVC ile yapılan benzetimlerde olduğu gibi Matlab/Simulink ortamında benzetim 50 saniye için çalıştırılmıştır. Sisteme 10. saniyeden itibaren iki faz-toprak (L-G) hatası uygulanmıştır. Bu hata 0.1 saniye boyunca devam etmiştir. Daha sonra ortadan kaldırılmıştır. Şekil 5.14’de verilen diagramda hata anında iki generatör arasındaki rotor açısı farkının yaptığı salınım görülsede hatadan 5 saniye sonra  $53^{\circ}$  olan nominal değerde sabit kaldığı görülmektedir.

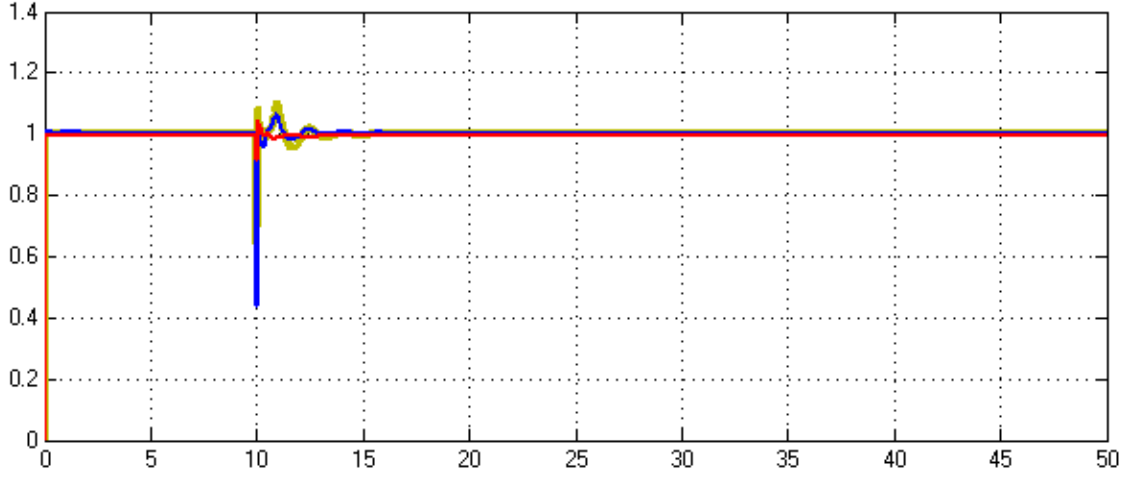


Şekil 5.14 : STATCOM sistemi 2L-G hatası durumunda iki generatör arasındaki rotor açısı farkı.



Şekil 5.15 : STATCOM sistemi hata anında generatörlerin rotor hız salınımları.

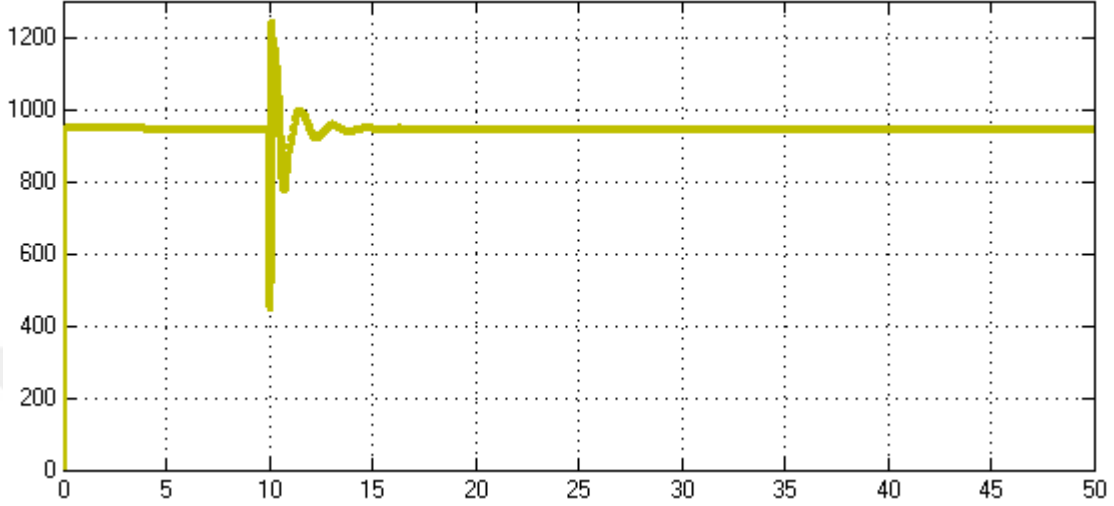
Şekil 5.15’de görüldüğü gibi hata anında  $G_1$  generatöründe rotor hızı 0,997-1.007 pu arasında değişmektedir. Buna rağmen sistemin kararlılığı SVC ile yapılan benzetimde olduğu gibi korunmuştur.



Şekil 5.16 : STATCOM sistemi hata anında generatörlerin bara gerilimleri.

Şekil 5.16 incelendiğinde,  $B_1$  barasındaki gerilimin 0.45 pu değerine kadar düşmüş olmasına rağmen bara gerilimlerinin hatadan yaklaşık 3 saniye sonra toparlandığı ve 1 pu değerine geldiği görülmüştür.

Şekil 5.17’de sistemin güç akışı verilmiştir. 2L-G hatası oluştuğunda sistemin güç akışı 1220 MW-450 MW arasında salınım yaptığı görülmüştür. Fakat hata ortadan kalktıktan 3 saniye sonra güç akışının nominal değerine döndüğü izlenmiştir.



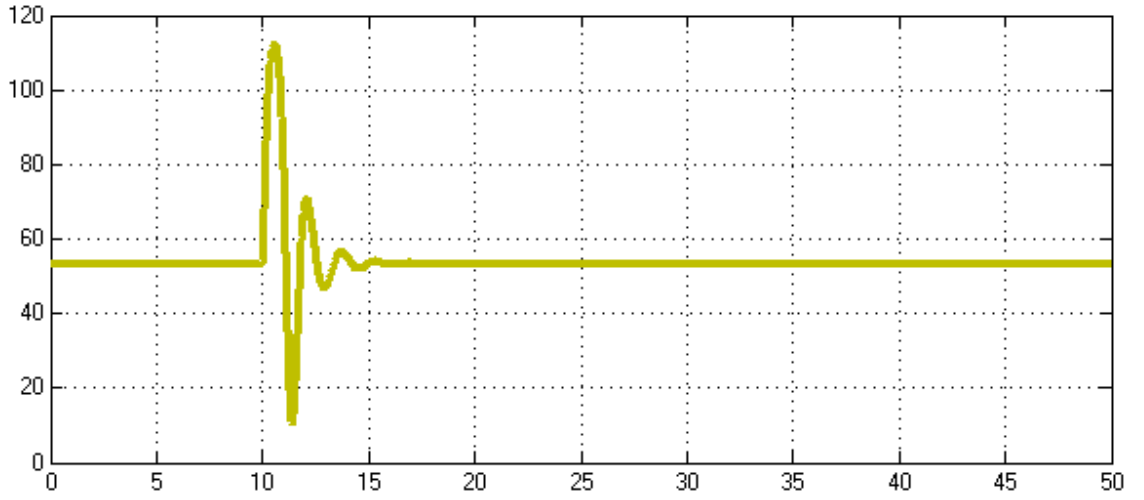
Şekil 5.17 : STATCOM sisteminde güç akışı.

Sonuç olarak iki faz – toprak hatasında iletim hattının ortasına konulan STATCOM cihazının kararlılığı desteklediği, sistemin senkronizasyonun bozulmasına engel olduğu görülmüştür. İki faz – toprak hatasında sistem ortasına eklenen SVC sisteminin de aynı şekilde sistem kararlılığına olumlu yönde etki yaptığı görülmüştü.

### 5.5. Simetrik Hata Durumunda STATCOM’un Kararlılığa Etkisi

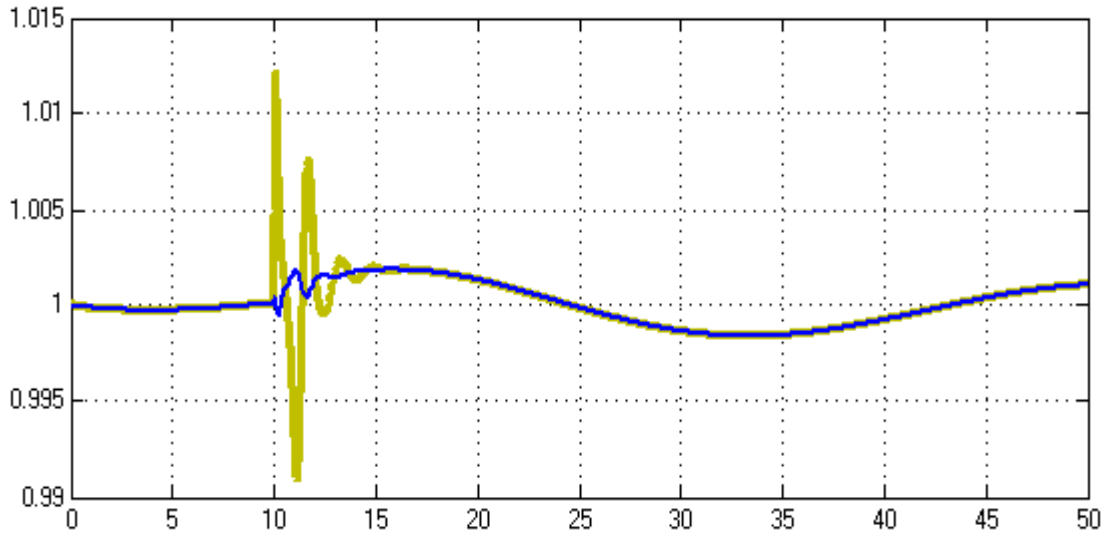
Şekil 5.13’de gösterilen sisteme 3 faz simetrik toprak hatası (3L-G) uygulanarak STATCOM’un sistem kararlılığına ve generatör senkronizasyonlarına olan etkisi incelenmiştir. Matlab/Simulink ortamında benzetim tekrar 50 saniye için çalıştırılmıştır. Sisteme 10. saniyeden itibaren üç faz-toprak hatası uygulanmıştır. Bu hata 0.1 saniye boyunca devam etmiştir. Daha sonra ortadan kaldırılmıştır.

Şekil 5.18’de üç faz – toprak arasında oluşan bir hata durumunda iki generatör arasında oluşan rotor açısı farkı verilmiştir. Hata anında açısı farkının  $110^{\circ}$  ile  $10^{\circ}$  arasında salınım yaptığı görülmektedir. Hatadan yaklaşık 6 saniye sonra açısı farkının nominal değerine geldiği görülmüştür.



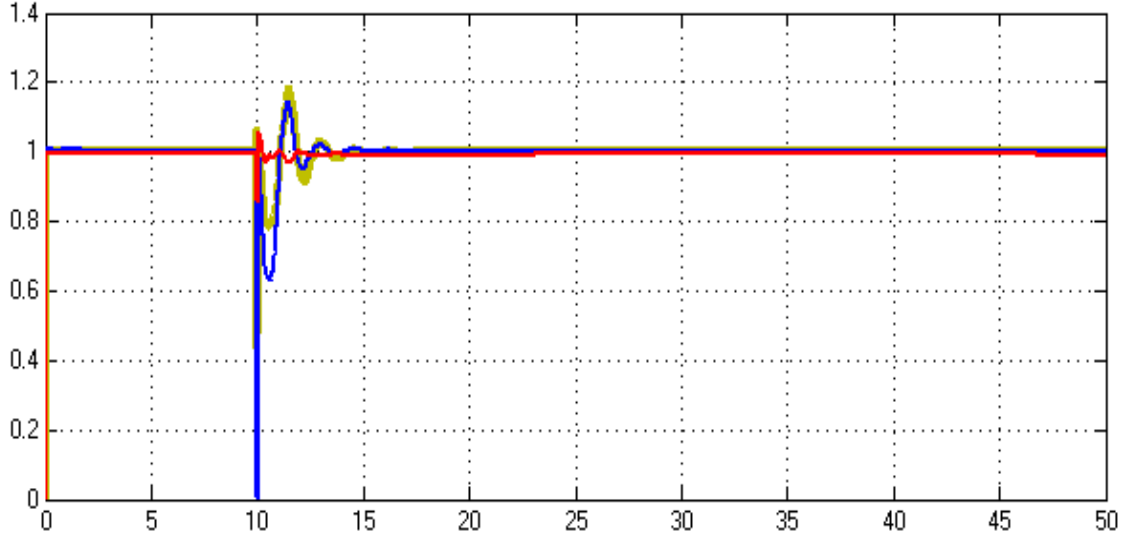
Şekil 5.18 : STATCOM sistemi 3L-G hatası durumunda iki generatör arasındaki rotor açı farkı.

Şekil 5.19’da generatörlerin rotor hızlarının hatadan 5 saniye sonra toparlandığı görülmüştür. Bu durumda sistemin kararlı durumunun korunduğu görülmektedir.



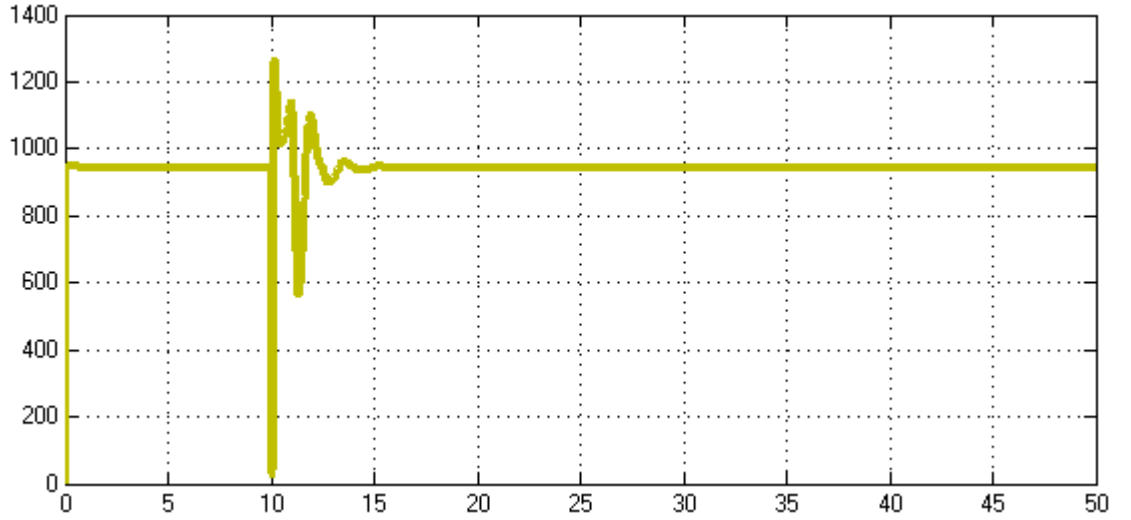
Şekil 5.19 : STATCOM sistemi 3L-G hatası durumunda generatör hızları.

Şekil 5.20’de 3 faz – toprak hatası oluşması durumunda sistemdeki baraların gerilim seviyeleri verilmiştir. Hata anında  $B_1$  barasındaki gerilimin sıfıra kadar düştüğü fakat sisteme şönt bağlı olan STATCOM’un etkisiyle 5 saniye içerisinde sistemin toparlandığı ve nominal değerlere geldiği görülmüştür. Bütün baralardaki gerilimlerin 1 pu değerinde sabit kaldığı görülmüştür.



Şekil 5.20 : STATCOM sistemi 3L-G hatası anında bara gerilimleri.

Şekil 5.21’de 3 faz – toprak hatası durumunda sistemin güç akışı verilmiştir. Hata anında sistemde güç akışının sıfıra kadar indiği gözlemlenmiştir. Hata ortadan kalktıktan sonra sistem toparlanmış, kararlılığını korumuş ve nominal değeri olan 950MW güç akışını sağlamıştır.



Şekil 5.21 : STATCOM sistemi 3L-G hatası durumunda güç akışı.

Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre STATCOM’un SVC’den daha üstün bir FACTS cihazı olduğunu, hem asimetrik hem de simetrik hata durumlarında sistemin kararlı kalabilmesi için gerekli kompanzasyonu yapabildiği görülmüştür.



Tablo 5.4’de sisteme şönt bağlı olan STATCOM ve SVC cihazlarının sisteme etkileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.4 : STATCOM ve SVC sistemlerinin karşılaştırma tablosu.

FACTS Cihazı	Hata Durumu	Baralar (pu)			Kararlılık
		$B_1$	$B_2$	$B_3$	
SVC	Asimetrik	0,4 - 1,05	1,05 – 0,995	1	Var
SVC	Simetrik	0 - 1,5	0,8 - 1,6	0,8 - 1,1	Yok
STATCOM	Asimetrik	0,4 – 1,05	0,998 - 1,05	1	Var
STATCOM	Simetrik	0 - 1,1	0,8 - 1,2	0,7 - 1	Var

## BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yaşadığımız dünyada varolan enerji kaynaklarının önemi her an artarken aynı zamanda yaşamakta olduğumuz enerji arz krizleri nedeniyle, araştırmacılar yeni enerji kaynaklarına yönelmekte ve aynı zamanda var olan enerjiyi de en verimli kullanma noktasında çalışmalarını devam ettirmekteler. Bu bağlamda, bu çalışmada statik VAR kompanzasyon sistemleri için kapsamlı bir araştırma yapılmış ve bu sistemlerin avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Statik VAR kompanzatörleri modern yarı iletken elemanlar kullanılarak sistemin ihtiyacı olan reaktif enerjiyi şebeke üzerinden değil, kendi üzerinden sağlayan cihazlardır denilebilir. Bu yönüyle ilk tesis maliyetleri yüksek olsa da ilerleyen yıllarda ülke ekonomisine büyük katkılar sağlayacağı aşikârdır.

SVC sistemleri reaktif güç gereksiniminin anlık ve hızlı olarak değiştiği, yük dengesizliği ve harmoniklerin olduğu sistemlerde gerilim regülasyonunun sağlanması, akım gerilim harmoniklerinin elimine edilmesi, güç faktörünün düzeltilmesi gibi nedenlerle tesis edilmektedir.

Bu tez çalışmasının 3. bölümünde yapılan statik VAR kompanzatör sistemi benzetimi ile TCR ve TSC yapılarından oluşan bir kompanzatörün sistemin reaktif güç ihtiyacına verdiği anlık cevaplar incelenmiştir. Sistem gerilimi düştüğünde milisaniyeler içerisinde TCR bloklarının devreye girerek sistemin gereksinimi olan reaktif enerjiyi karşıladığı görülmüştür. Benzer şekilde sistem gerilimi arttığında ise ihtiyaç olan reaktif enerjinin TSC blokları üzerinden karşılandığı görülmüştür. Sağlanan reaktif enerji statik elemanlar üzerinden karşılandığından kaynaktan ilave bir güç çekilmemiştir. Bu sayede ilave maliyetlerin önüne geçilebileceği kanıtlanmıştır. Kapasitör ve reaktör gruplarının devreye alınma işlemleri tristörler ile yapıldığından sistem tepkisinin çok hızlı olduğu

görülmüştür. Bu benzetim çalışmasıyla tam bir statik VAr kompanzatörü davranışları gözlenmiştir.

Bu tez çalışmasında yapılan diğer benzetim çalışmasında FACTS cihazlarından olan SVC ve STATCOM'un güç akışı ve kararlılığa yaptığı etki üzerine çalışma yapılmıştır. Simulasyon çalışmaları Matlab/Simulink Simscape Toolbox'ı kullanılmıştır. Sisteme dışardan bozucu etki olarak asimetrik ve simetrik hatalar uygulanarak sistem davranışı gözlemlenmiştir. Asimetrik hata durumunda her iki FACTS cihazının da sistemin kararlılığına olumlu etki yaptığı görülmüştür. Asimetrik hata durumunda SVC sistemi ile yapılan çalışmalarda bara gerilimlerinin 0.7 – 1.1 pu değerler arasında salındığı görülmüştür. Asimetrik hata durumunda STATCOM ile yapılan çalışmalarda ise bara gerilimlerinin 0.8 – 1.05 arasında salındığı görülmüştür. Bu değerlere göre STATCOM'un daha iyi performans sergilediği söylenebilir. Simetrik hata durumunda ise SVC sisteminin kararlılığı koruyamadığı, makine senkronizasyonlarının koptuğu görülmüştür. STATCOM sisteminde ise bara gerilimleri 0 – 1.2 pu arasında salınım yapsa da sistemin toparlandığı ve kararlılığın bozulmadığı görülmüştür. Yapılan bu karşılaştırmalar neticesinde STATCOM'un daha iyi bir kompanzatör olduğu söylenebilir.

Bu tez çalışmasında yapılan benzetimler de orta ve yüksek gerilim sistemleri modellenerek yarı iletken, güç elektroniği tabanlı FACTS cihazlarının avantajları ve farklılıkları ortaya konulmuştur. Bunlara ilave olarak yakın gelecekte alçak gerilim sistemlerinde yapılan kompanzasyon uygulamalarında da yarı iletkenlerle yapılan anahtarlama yönteminin daha da yaygınlaşacağı beklenmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abacı, K. (2007). *Gerilim kararlılığı iyileştiricilerinin çatalaşma ve kaotik analizi*. (Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- AlBakkar, A. (2014). *Adaptive Simplified Neuro-Fuzzy Controller as Supplementary Stabilizer for SVC*. (Phd. Thesis). University of Calgary
- Al-Mubarak, A. H., M, H. Khan., & M, Z. Al-Kadhem. (2015). Dynamic Reactive Power Compensation For Voltage Support Using Static Var Compensator (SVC) In Saudi Arabia. *IEEE Electrical Power and Energy Conference*.
- Bayram, M. (2000). *Reaktif Güç Kompanzasyonu*, Birsen Yayınevi.
- Bharat, G. (2011). *Dynamic harmonic domain modelling of flexible alternating current transmission system controllers*. (Phd Thesis). Department of Electrical and Computer Engineering and the College of Graduate Studies, Cleveland State University, USA.
- Bilki, F. (2008). *Plc Kontrollü Reaktif Güç Kompanzasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Con, İ. (2010). *Medya sektöründe elektrik enerji kalitesinin harmonik yönünden incelenmesi ve çözüm önerileri*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Dirik, H. (2006). *Statcom ve SSSC Denetleyicilerinin Güç Sistemi Gerilim Kararlılığı Üzerine Etkisinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). OnDokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Dixon, J., Morán, L., Rodríguez, J., & Domke, R., (2005). *Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review*. Proceedings of The IEEE, Vol:93 No:12.
- Doğrul, Y. & Aslan, Y. (2016). Single phase static reactive power compensation with adaptive fuzzy-pid by using plc. *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE)*, Iss. 26, Vol. 8, No. 1
- Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği*. (2004). T. C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu.

- Engin, B. (2008). *Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Kompanzasyon ve Enerji Kalitesi Sorunları*. (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Ersamut, R. (2009). *Statik VAR Kompanzasyonu Sistemlerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Esfahan, M. T. & Vahidi, B. (2016). Electric arc furnace power quality improvement by applying a new digital and predicted-based TSC control. *Turk J Elec Eng & Comp Sci*. 24: 3724 – 3740
- Elektrik Şebeke Yönetmeliği*. (2014). T. C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
- Ertay, M. M. & Aydoğmuş, Z. (2012). Güç Sistemlerinde FACTS Uygulamaları, *SDU International Technologic Science*. Vol:4 No:2.
- Ertay, M. M. & Aydoğmuş Z. (2010). Statcom ile bir enerji iletim sisteminde gerilim kontrol. Dumlupınar Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. Sayı 21.
- Garg, A. & Agarwal, S. K. (2011). Modeling and Simulation of Static Var Compensator for Improvement of Voltage Stability in Power System. *International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*. Volume 2, Issue 2, ISSN (Online): 2249–071X, ISSN (Print): 2278–4209.
- Gelen, A. & Yalçınöz, T. (2009). The behavior of thyristor switched capacitor (TSC) installed in an infinite bus system. *IEEE Region 8 Eurocon 2009 Conference*. pp. 629-632, Saint-Petersburg, Russia.
- Gelen, A. & Yalçınöz, T. (2010). Experimental studies of a scaled-down TSR-based SVC and TCR-based SVC prototype for voltage regulation and compensation. *Turk J Elec Eng & Comp Sci*. Vol.18, No.2
- George, M., M, B. B. A. Bakar., & K, P. Basu. (2012). Optimal Design of Three-Phase Static Var Compensation System. *IEEE International Conference on Power System Technology*
- Gökcan, A. O. (2016). *Reaktif güç kompanzasyonu eğitimi için sanal bir laboratuvarın oluşturulması*. (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Güler, Ö. (1995). *Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Sakıncaları*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hatziadoniu, C.J. & Funk, A. K. (1996). Development of a control scheme for a Series Connected Solid State Synchronous Voltage Source. *IEEE Transactions on Power Delivery* 11(2):1138 - 1144
- IEEE., (1992) *Standard Definitions for Power Switchgear*.

- Irmak, E., Bayındır, R., & Köse, A., (2016). Design and experimental analysis of an advanced static VAR compensator with computer aided control. *ISA Transactions*. Volume 64, Pages 384-393
- Kara K. (2006). *Esnek alternatif akım iletim sistemleri kontrolörlerinin incelenmesi ve şebeke üzerindeki etkileri*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karataş, M. (2011). *Statik senkron kompanzatorün PID kontrolör ile kontrolü*. (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Keçecioglu, Ö. F. (2012). *Tristör kontrollü reaktif güç kompanzasyon denetimi ve uygulaması*. (Yüksek Lisans Tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Khan, N., Ahmed, H., & Khattak, A. (2017). Transient Stability Enhancement of Power System Using UPFC, *International Journal of Engineering Works*, ISSN: 2409-2770 Vol. 4, Issue 2, PP. 33-40.
- Koyuncu, M.A. (2012). *Statik var kompanzasyon sistemlerinin harmonikler bakımından incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Koyuncu, S. (2018). *Statik var kontrol sisteminin analizi simülasyonu ve endüstriyel uygulaması*. (Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Kıyan, M. (2010). *Tristör Denetimli Reaktörlü Alçak Gerilim Tepkin Güç Kompanzasyonunun Gerçekleştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Köse, A. (2014). *Sabit kondansatörlü tristör kontrollü reaktör ile güç katsayısının düzeltilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Küçük, S. (2018). *Elektrik Tesislerinde Arızalar*. Papatya Yayıncılık Eğitim, İstanbul, 320s.
- Mathur, R. M. & Varma, R. K. (2002). Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems. *Wiley-IEEE Press*, USA, 495s.
- Matlab,(2019).<https://uk.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/tcscphasormodel.html> Erişim Tarihi: 13.03.2019
- Matlab, (2019). <https://uk.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ug/thyristor-based-static-var-compensator> Erişim Tarihi: 01.04.2019
- Mathad, V. G., Ronad, B. F., & Jangamshetti, S. H. (2013). Review on Comparison of FACTS Controllers for Power System Stability Enhancement. *International Journal of Scientific and Research Publications*. Volume 3, Issue 3.

- Meikandasivam, S., Rajesh, K. N., & Shailendra, K. J. (2008). Behavioral Study of TCSC Device – A MATLAB/Simulink Implementation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering*.
- Memiş, R. (2007). *Statik var sistemlerinin endüstriyel ortamda uygulanması*. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Mehdi, M., Ghazanfar, S., Peghah, S., Manijeh, A., Saeed, F., Mohammadreza, J., (2016). Power System Oscillations Improvement by Using Static Var Compensator. *13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*.
- Mutluer, H. B. (2008). *Design implementation and engineering aspect of TCR for industrial SVS systems*. (Phd Thesis). Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- N. G. Hingorani. & L. Gyugyi. (2000). *Understanding FACTS; Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Press book.
- Nalbantoğlu, M. & Güler, Y. (2017). SSSC tabanlı kaskad kontrolör ile güç sistem kararlılığının iyileştirilmesi, *Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Dergisi*, Cilt 8, Sayı 1, 89-100.
- Nasiru, B. K. & Yusuf, A. M. (2015). An Overview of FACTS Controllers for Power Quality Improvement. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, Volume 4, Issue 9, Pages PP -09-17.
- Oluwagbade Z.V., Wara S.T., Adejumobi, I.A., & Mustapha, A.O. (2015). Effect of Unified Power Flow Controller on Power System Performance: A Case Study of Maryland 132/33/11 kV Transmission Station. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 5, Issue 6, June 2015.
- Özaslan, S. (1997). *Statik VAr Sistemleri ile Reaktif Güç Kompanzasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmit.
- Parlak, D. (2014). *Design implementation and engineering aspect of 12 pulse TCR based svc systems for voltage regulation*. (Msc. Thesis). The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.
- Patil, S., Shinde, Y., Shende, K., & Gudar, U. (2013). Transient Free TBSC Compensator for Dynamic Reactive Load with Closed Loop Control, *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. Vol I WCECS 2013, 23-25 San Francisco, USA
- Rahmani, R., M, F. Othman., A, Shojaei., & R, Yusof. (2014). Static VAR compensator using recurrent neural network, *Electrical Engineering*, Vol. 96 Issue 2, p109-119
- Rahman, M, A. & Islam, M, S. (2014). Voltage Control and Dynamic Performance of Power Transmission Using Static VAR Compensator, *International Journal of Interdisciplinary and Multidisciplinary Studies (IJIMS)* Vol 1, No.4, 141-151.

- Rajendra, K. K. (2016). *Performance Analysis of Flexible A.C. Transmission System Devices for Stability Improvement of Power System*. (Doctor of Philosophy Thesis). National Institute of Technology Rourkela, Department of Electrical Engineering.
- Somsai, K., Oonsivilai, A., Srikaew, A., & Kulworawanichpong, T. (2007). Optimal PI Controller Design and Simulation of a Static Var Compensator Using MATLAB's SIMULINK. *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Power Systems*, Beijing, China, September 15-17.
- Sun, Y. & Wei, L. (2013). Simulation analysis of static Var compensator based on the matlab/simulink. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. Vol. 51 No.2
- Şekkeli, M. & Tarkan, N. (2005). Reaktif güç kontrol rölesinde minimum anahtarlama sayısı ve optimal reaktif güç seçimi. *İtü Dergisi*. Cilt 4 Sayı 5.
- Tür, M. R. & Aydoğmuş, Z. (2011). Enerji İletim Hatlarındaki Kısa Devre Arıza Tiplerinin Bulanık Mantık ile Tespiti. *6th. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*. 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
- Tozar, T. (2001). *Elektrik enerji sistemlerinde facts kontrolörlerin kullanımıyla kayıp azaltılması*. (Yüksek Lisans Tezi,) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yaşar, C., Aslan, Y., & Biçer, T. (2010). Bir dağıtım transformatörü bölgesindeki kayıpların incelenmesi. *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. Sayı:22



## ÖZGEÇMİŞ

Onur Turan, 05.07.1987'de İstanbul'da doğdu. Ortaöğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2004 yılında Atatürk Çağdaş Yaşam Çok Programlı Lisesi Elektronik Bölümünü bitirdi. 2004 yılında başladığı İstanbul Üniversitesi Endüstriyel Elektronik Bölümü'nü 2006 yılında bitirdi. Bir süre eğitim hayatına ara verdi ve 2008 yılında eğitime başladığı Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü 2011 yılında bitirdi. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimine başladı ve halen bu üniversitede eğitimine devam etmektedir. Özel sektörde 2003 yılından beri teknisyen, tekniker ve mühendis olarak çalışmaktadır.