

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

**ÇOK YÖNLÜ BİR FACTS ELEMANI:
UPFC**

ESRA ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MALATYA
2007**

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

**ÇOK YÖNLÜ BİR FACTS ELEMANI:
UPFC**

ESRA ŞAHİN

**DANIŞMAN
Prof. Dr. M. SALİH MAMIŞ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MALATYA
2007**

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇOK YÖNLÜ BİR FACTS ELEMANI: UPFC

Esra ŞAHİN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

119+xi sayfa

2007

Danışman: Prof. Dr. M. Salih MAMIŞ

Günümüzde güç sistemlerine olan talep arttıkça, istenmeyen voltaj ve frekans durumları gibi önemli durumlarla karşılaşmak da kaçınılmazdır. Esnek alternatif akım iletim sistemi (FACTS) araçları ile , güç osilasyon sönümü geliştirilerek ve iletim hatları boyunca güç akışı kontrol edilerek bahsedilen istenmeyen durumlar azalmaktadır. Uzun yıllar boyunca , güç sistemi stabilize ediciler (PSS), otomatik voltaj regülatörlerinin negatif sönümünü ofsetlemede ve osilasyonları azaltmada en yaygın kontrol edicilerden birisi olmuştur. PSS'nin en büyük rolü; rotor osilasyon sönümü eklemek için uyarım sistemi boyunca sinyal davranışlarını ayarlamaktır. Bunun yanı sıra bazı işlem durumlarında , bu araç yeterli sönümü sağlamayabilmekte, dolayısıyla başka etkili alternatifler ortaya çıkabilmektedir. Son zamanlarda FACTS teknolojisi, voltaj kontrolü gibi bazı güç sistemi işlem zorluklarını azaltmakta önemli bir yaklaşım olarak ortaya çıktı. FACTS araçlarının içinde UPFC çok yönlülüğüyle öne çıkmıştır.

Bu çalışmada UPFC'nin RBFNN, POD ve PSS ile geçici rejim performansları karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Esnek AC İletim Sistemleri, UPFC (Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü), RBFNN (Radyal Tabanlı Fonksiyon Neural Network), POD (Güç Osilasyon Sönümü), PSS (Güç Sistemi Stabilizer).

ABSTRACT

Master Degree Thesis

ONE OF THE MOST VERSATILE FACTS DEVICES: UPFC

Esra ŞAHİN

Inonu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

119+xi pages

2007

Supervisor: Prof. Dr. M. Salih MAMİŞ

With the increasing electric power demand, power systems can reach stressed conditions, resulting in undesirable voltage and frequency conditions. Flexible alternating current transmission system (FACTS) devices are among the recent propositions to eliminate such situations by controlling the power flow along transmission lines and improving power-oscillation damping. For many years, power system stabilizers (PSS) have been one of the most common controls used to damp out oscillations and to offset the negative damping of the automatic voltage regulators. The major role of PSS is to introduce modulating signal acting through the excitation system to add rotor-oscillation damping. However, during some operating conditions, this device may not produce enough damping and other effective alternatives are needed in addition to PSS. Recently, FACTS technology has emerged as an interesting approach to help in alleviating several power-system operating difficulties. Among the available FACTS devices for transient stability enhancement, the Unified Power Flow Controller (UPFC) is the most versatile one.

In this work, UPFC is controlled with RBFNN, POD and PSS controllers for comparing their performances.

KEYWORDS: Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS), Unified Power Flow Controller (UPFC), Radial Basis Function Neural Networks (RBFNN), Power Oscillation Damping (POD), Power System Stabilizer (PSS).

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. M. Salih MAMIŞ'e teşekkür ederim.

Ayrıca, maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme özellikle de anneme ve babama sevgi ve őükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	xi
GİRİŞ	1
1. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYON TEKNOLOJİLERİ.....	1
1.1. Reaktif Güç Kompanzasyon Prensipleri.....	2
1.2. Geleneksel VAR Jeneratörler.....	5
1.3. Kendiliğinden Komutalı VAR Kompanzatorler.....	13
2. STATCOM'a GİRİŞ.....	22
2.1. Statik Shunt Kompanzatorlerin Temel İşlem Prensipleri.....	26
2.2. STATCOM'un Yapısı.....	36
2.3. Voltaj Kaynaklı Konverterler (VSC).....	37
2.4. STATCOM'un Kontrolü.....	38
3. STATİK SERİ KOMPANZASYONLAR.....	43
3.1. Statik Senkron Seri Kompanzator (SSSC).....	52
3.2. Statik Seri Kompanzatorlerin Karşılaştırılması.....	53
4. UPFC MODELLEMeye GİRİŞ.....	61
4.1. UPFC Temel İşlemler ve Karakteristikler.....	61
4.2. UPFC Modelleme ve Arayüz.....	74
4.3. UPFC Dinamik Model.....	77
5. KONTROLÖRLER.....	82
5.1. RBFNN(RADIAL BASIS FUNCTION NEURAL NETWORK.....	82
5.2. POD (Power Oscillation Damping) ve PSS (Power System Stabilizer).....	84

6.	KULLANILAN PROGRAMLAR.....	85
6.1.	PSCAD (Power System CAD).....	85
6.1.1.	Yeni Bir Model Oluşturma.....	86
6.1.2.	Master Library.....	86
6.1.3.	Çalışma Prensipleri.....	87
6.2.	PSAT (Power System Analysis Toolbox).....	88
6.2.1.	PSAT ÖZELLİKLERİ.....	90
	A. Genel.....	90
	B. PSAT Başlangıç.....	91
	C. Simulink Kütüphanesi.....	92
	D. Data Dönüşümü ve Kullanıcı Tanımlı Modeller.....	93
	E. Komut Satırı Kullanımı.....	95
7.	UYGULAMALAR.....	96
7.1.	PSCAD İLE ÖRNEK UYGULAMALAR.....	96
7.1.1.	GTO KONTROLLÜ SINGLE-PHASE HALF-WAVE RECTIFIER.....	96
7.1.2.	UPFC MODELLEME.....	98
7.2.	PSAT İLE ÖRNEK UYGULAMALAR.....	100
7.2.1.	SİSTEM MODELLERİ VE ANALİZİ.....	101
	A. Sistem Modelleri.....	101
	B. Komponentlerin Parametreleri.....	102
	C. POD ve RBFNN Kontrol İçin Güç Akışı Raporu.....	106
	D. Grafikselsel Sonuçlar.....	108
8.	TARTIşMA VE SONUÇLAR.....	112
	KAYNAKLAR.....	113
	ÖZGEÇMİş.....	119

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Radyal bir ac sistemde shunt kompanzasyon prensipleri.....	3
Şekil 1.2.	Seri kompanzasyonun prensipleri.....	4
Şekil 1.3.	Seri kapasitör kompanzator ve koruma sistemi.....	5
Şekil 1.4.	Tristör anahtarlamalı kapasitör yapısı.....	7
Şekil 1.5.	Binary tristör diyot anahtarlamalı kapasitör yapısı	8
Şekil 1.6.	Tristör diyot anahtarlamalı kapasitörün deneysel kompanze edilmiş faz akımı	9
Şekil 1.7.	Tristör kontrollü reaktör yapısı.....	10
Şekil 1.8.	Farklı tristör faz kayma açıları için bir TCR’de simüle edilmiş voltaj ve akım dalgaları.....	10
Şekil 1.9.	Fixed kapasitör-tristör kontrollü reaktör yapısı.....	11
Şekil 1.10.	Bir FC-TCR’nin voltaj-reaktif güç karakteristiği.....	11
Şekil 1.11.	Birleşik TSC ve TCR yapısı.....	12
Şekil 1.12.	TCSC’nin güç devresi topolojisi.....	12
Şekil 1.13.	Akım kaynaklı bir konverterli VAR kompanzator topolojisi.....	13
Şekil 1.14.	Voltaj kaynaklı bir konverterli VAR kompanzator topolojisi.....	13
Şekil 1.15.	Voltaj kaynaklı kendiliğinden komutalı bir shunt VAR kompanzatorün akım ve voltaj dalga formları.....	15
Şekil 1.16.	Farklı modülasyon indeksi için kompanzator çıkış voltaj dalga formu.....	16
Şekil 1.17.	Üç seviyeli inverterli shunt bir VAR kompanzator.....	17
Şekil 1.18.	Çok seviyeli konverter.....	18
Şekil 1.19.	Şekil 1.18’deki topolojide genlik modülasyonu.....	18
Şekil 1.20.	81 seviyeli VAR kompanzator	19
Şekil 2.1.	Üretim, iletim ve dağıtım mekanizmalarının gösterimi.....	22
Şekil 2.2.	Tristör tabanlı kontrolörler.....	24
Şekil 2.3.	Konverter tabanlı kontrolörler.....	24
Şekil 2.4.	Güç akış diyagramı.....	26

Şekil 2.5.	Senkron bir kompanzator tarafından reaktif güç üretimi	27
Şekil 2.6.	Statik VAR kompanzator (SVC).....	28
Şekil 2.7.	Tristör kontrollü reaktör (TCR).....	28
Şekil 2.8.	SVC'li iki makineli sistem.....	29
Şekil 2.9.	İki makineli sistemin eşdeğer ağı.....	30
Şekil 2.10.	Bir SVC'de iletilmiş güce karşılık iletim açısı karakteristikleri	30
Şekil 2.11.	Harmonik azalmayı sağlamak için 4 TCR bankasını kontrol etme metodu	31
Şekil 2.12.	Tristör anahtarlama kapasitör.....	32
Şekil 2.13.	Bir güç sisteminde ideal shunt kompanzator yerleşimi	33
Şekil 2.14.	Fazör diyagram.....	33
Şekil 2.15.	Geçici rejim kararlılığında Equal Area Kriteri.....	34
Şekil 2.16.	Voltaj kararlılık limitlerinin değişimi.....	34
Şekil 2.17.	Reaktif shunt kompanzasyonla voltaj kararlılık limitine ilavesi	34
Şekil 2.18.	SVC ve STATCOM'un V/I karakteristikleri.....	35
Şekil 2.19.	STATCOM yapısı.....	36
Şekil 2.20.	6 palsli voltaj kaynaklı konverter.....	37
Şekil 2.21.	6 palsli konverter dalga formları.....	37
Şekil 2.22.	STATCOM'da indüktif ve kapasitif mod.....	38
Şekil 2.23.	Bir güç sisteminde STATCOM operasyonu.....	39
Şekil 2.24.	STATCOM uygulamalarının fazör diyagramları.....	40
Şekil 2.25.	STATCOM ile iki makineli sistem.....	41
Şekil 2.26.	STATCOM'un iletilmiş güce karşın iletim açısı karakteristiği.....	42
Şekil 3.1.	İletim hattının tek hatlı diyagramı.....	44
Şekil 3.2.	Seri kapasitör kompanzasyonu ve fazör diyagramı.....	44
Şekil 3.3.	Güç akışında seri kompanzasyonun etkisi	45
Şekil 3.4.	Tristör kontrollü seri kapasitör elemanın devresi.....	46
Şekil 3.5.	Ateşleme açısı tarafından reaktansın değişimi.....	47
Şekil 3.6.	Temel tristör anahtarlama seri kapasitör elemanın devresi	48
Şekil 3.7.	Kapasitör voltajı ve hat akımının çizimi.....	48

Şekil 3.8.	Tristör anahtarlama seri kapasitör.....	49
Şekil 3.9.	TSSC'nin basit düzenlemesi ve güç akış diyagramı.....	49
Şekil 3.10.	Temel GTO tristör kontrollü seri kapasitör elemanın devresi.....	50
Şekil 3.11.	GCSC'nin yapısı.....	50
Şekil 3.12.	GCSC operasyon dalga formu.....	51
Şekil 3.13.	GCSC kompanzasyonlarının derecesi.....	51
Şekil 3.14.	Bir iletim hattında SSSC'nin temel yapısı.....	52
Şekil 3.15.	Statik seri kompanzasyonların karşılaştırması.....	53
Şekil 3.16.	SSSC'nin tek hat diyagramı ve fazörü.....	54
Şekil 3.17.	SSSC'nin iletim açısı, iletilmiş gücü.....	55
Şekil 3.18.	SSSC'nin temel yapısı.....	56
Şekil 3.19.	6 palsli VSC'nin basit konfigürasyonu.....	57
Şekil 3.20.	VSC'nin farklı konfigürasyonları.....	58
Şekil 3.21.	SSSC kontrol blok diyagramı.....	59
Şekil 3.22.	Tek hatlı diyagramda SSSC.....	60
Şekil 4.1.	Üç fazlı voltaj kaynaklı konverter.....	61
Şekil 4.2.	PWM konverter.....	63
Şekil 4.3.	UPFC'nin temel frekans modeli.....	64
Şekil 4.4.	Bir iletim hattı.....	65
Şekil 4.5.	Kompanze edilmemiş sistemin P-Q lokusu.....	67
Şekil 4.6.	Fazör diyagramlar.....	68
Şekil 4.7.	UPFC ile iletim hattı.....	69
Şekil 4.8.	Çeşitli açılarda UPFC'li basit iki baralı sistem için P-Q ilişkisi.....	70
Şekil 4.9.	Kontrollü seri kapasitif kompanzasyonlu iletim hattı.....	71
Şekil 4.10.	Faz açısı regülatör kontrollü iletim hattı.....	72
Şekil 4.11.	Çeşitli açılarda UPFC ve seri kompanzasyon kontrollü iletim hattında P-Q ilişkisi.....	73
Şekil 4.12.	Çeşitli açılarda UPFC ve PAR kontrollü iletim hattında P-Q ilişkisi.....	74
Şekil 4.13.	UPFC'li güç ağı.....	75

Şekil 4.14.	Güç Akış Algoritması.....	76
Şekil 4.15.	UPFC arayüzü.....	78
Şekil 4.16.	UPFC ‘yi güç ağıyla bağdaştıran algoritma	79
Şekil 5.1.	Gauss fonksiyonu.....	82
Şekil 5.2.	RBFNN’nin yapısı.....	83
Şekil 5.3.	FACTS POD kontrolör.....	84
Şekil 6.1.	PSCAD arayüzü.....	85
Şekil 6.1.2.	PSCAD Master Library.....	86
Şekil 6.1.3.	Komponentlerin özelliklerini görme özelliği.....	87
Şekil 6.1.4.	Yardımcı mesaj balonları.....	87
Şekil 6.1.5.	Grafik ortam.....	88
Şekil 6.2.1.	PSAT’ın snoptik şeması.....	90
Şekil 6.2.2.	PSAT’ın Ana Grafik Arayüzü.....	92
Şekil 6.2.3.	PSAT Simulink Kütüphanesi.....	93
Şekil 6.2.4.	Data format dönüşümü için GUI.....	94
Şekil 6.2.5.	Kullanıcı Tanımlı Modeller için GUI.....	95
Şekil 7.1.	GTO kontrollü single-phase half wave rectifier.....	96
Şekil 7.2.	GTO kontrollü single-phase half wave rectifier için grafiksel sonuçlar.....	97
Şekil 7.3.	UPFC tasarımı.....	98
Şekil 7.4.	UPFC modelleme için grafiksel sonuçlar.....	99
Şekil 7.5.	Two Area Sistemde POD kontrollü UPFC.....	101
Şekil 7.6.	Two Area Sistemde RBFNN kontrollü UPFC.....	101
Şekil 7.7.	AVR.....	102
Şekil 7.8.	09 nolu bara.....	102
Şekil 7.9.	10 nolu bara.....	103
Şekil 7.10.	1 nolu jeneratör.....	104
Şekil 7.11.	Hat parametreleri.....	104
Şekil 7.12.	Transformatör parametreleri.....	105
Şekil 7.13.	POD.....	105

Şekil 7.14.	UPFC.....	106
Şekil 7.15.	POD sistemde birinci makinenin omega1(hız) değişimi.....	108
Şekil 7.16.	POD sistemde ikinci makinenin omega2(hız) değişimi.	108
Şekil 7.17.	POD sistemde üçüncü makinenin omega3(hız) değişimi.....	108
Şekil 7.18.	RBFNN sistemde birinci makinenin omega1(hız) değişimi.....	108
Şekil 7.19.	RBFNN sistemde ikinci makinenin omega2(hız) değişimi.....	108
Şekil 7.20.	RBFNN sistemde üçüncü makinenin omega3(hız) değişimi.....	108
Şekil 7.21.	POD sistemde dördüncü makinenin omega4(hız) değişimi.....	109
Şekil 7.22.	RBFNN sistemde dördüncü makinenin omega4(hız) değişimi.....	109
Şekil 7.23.	Birinci makine için geçici rejim performanslarının karşılaştırılması.....	109
Şekil 7.24.	İkinci makine için geçici rejim performanslarının karşılaştırılması.....	109
Şekil 7.25.	Üçüncü makine için geçici rejim performanslarının karşılaştırılması.....	109
Şekil 7.26.	Dördüncü makine için geçici rejim performanslarının karşılaştırılması.....	109
Şekil 7.27.	POD sistemde 09 nolu barada voltaj değişimi.....	110
Şekil 7.28.	POD sistemde 10 nolu barada voltaj değişimi.....	110
Şekil 7.29.	POD sistemde 9 ve 10 nolu baralarda voltaj değişimi.....	110
Şekil 7.30.	RBFNN sistemde 9 nolu barada voltaj değişimi.....	110
Şekil 7.31.	RBFNN sistemde 10 nolu barada voltaj değişimi.....	110
Şekil 7.32.	RBFNN sistemde 9 ve10 nolu baralarda voltaj değişimi.....	110
Şekil 7.33.	POD sistemde reaktif power profili.....	111
Şekil 7.34.	POD sistemde reel power profili.....	111
Şekil 7.35.	POD sistemde voltaj faz profili.....	111
Şekil 7.36.	RBFNN sistemde reaktif power profili.....	111
Şekil 7.37.	RBFNN sistemde reel power profili.....	111
Şekil 7.38.	RBFNN sistemde voltaj faz profili.....	111

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	VAR kompanzatörlerin karşılaştırması.....	20
Tablo 2.1.	Güç sistemi performansı için geleneksel teknikler.....	23
Tablo 2.2.	FACTS elemanlarının tipleri.....	25
Tablo 2.3.	Kontrolörlerin karşılaştırılması.....	25
Tablo 2.4.	FACTS elemanları ve işlevleri.....	26
Tablo 2.5.	Birkaç shunt kompanzatör elemanının uygulaması.....	35
Tablo 3.1.	Seri kompanzasyon uygulamaları.....	43
Tablo 6.1.	Güç sistem analizi için Matlab tabanlı paket programlar.....	89
Tablo 6.2.	MATLAB ve GNU platformlarında fonksiyon yeterliliği.....	91

GİRİŞ

Günümüzde güç sistemlerine olan talep arttıkça, istenmeyen voltaj ve frekans durumları gibi önemli durumlarla karşılaşmakta kaçınılmazdır. Esnek alternatif akım iletim sistemi (FACTS) araçları ile , güç osilasyon sönümü geliştirilerek ve iletim hatları boyunca güç akışı kontrol edilerek bahsedilen istenmeyen durumlar azalmaktadır. Uzun yıllar boyunca , güç sistemi stabilize ediciler (PSS), otomatik voltaj regülatörlerinin negatif sönümünü ofsetlemede ve osilasyonları azaltmada en yaygın kontrol edicilerden birisidir. PSS' nin en büyük rolü; rotor osilasyon sönümü eklemek için uyarım sistemi boyunca sinyal davranışlarını ayarlamaktır. Bunun yanısıra bazı işlem durumlarında , bu araç yeterli sönümü sağlamayabilir, dolayısıyla başka etkili alternatifler ortaya çıkabilmektedir. Son zamanlarda FACTS teknolojisi, voltaj kontrolü gibi bazı güç sistemi işlem zorluklarını azaltmakta önemli bir yaklaşım olarak ortaya çıktı. FACTS araçlarının içinde UPFC çok yönlülüğüyle öne çıkmıştır.

1. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYON TEKNOLOJİLERİ

VAR kompanzasyon, ac sistemlerin performansını geliştirmede reaktif güç yönetimi olarak tanımlanır. VAR kompanzasyon konsepti, güç kalitesi konularıyla ilgili sistem ve tüketici problemlerinin geniş ve farklı bir alanını içerir[1]. Genelde reaktif güç kompanzasyonu problemi iki yönden ele alınabilir: yük kompanzasyonu ve voltaj desteği. Yük kompanzasyonunda, büyük ve dalgalanan nonlinear endüstriyel yükleri tarafından üretilmiş akım harmonik komponentlerini elimine etmede ve voltaj regülasyonunu kompanze etmede, ac destekle birlikte reel güç dengelemede, güç sistem faktörünün değerini artırır[2,3]. Voltaj desteği, bir iletim hattının verilen bir terminalinde voltaj dalgalanmalarını azaltmak için gereklidir. İletim sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu, iletilebilen maksimum aktif gücü artırarak ac sistemin kararlılığını da geliştirir. Ayrıyeten, güç iletiminin tüm seviyelerinde voltaj profilini düzenlemeye yardımcı olur, HVDC (Yüksek Voltaj Doğru Akım) terminal performansını geliştirir, iletim etkinliğini artırır, kalıcı durum ve geçici voltaj aşımını kontrol eder[4-6].

Seri ve shunt VAR kompanzasyon, ac sistemlerin doğal elektriksel karakteristiklerini modifiye etmede kullanılır. Seri kompanzasyon iletim veya dağıtım sistemi parametrelerini kontrol ederken, shunt kompanzasyon yükün eşdeğer empedansını

değiştirir[1,7]. Her iki durumda da, sistem üzerinden akan reaktif güç, tüm ac güç sisteminin performansını geliştirmede etkili bir şekilde kontrol edilebilmektedir.

Geleneksel olarak, rotatif senkron kondenserler ve mekanik olarak anahtarlamalı kapasitörler veya indüktörler, reaktif güç kompanzasyonu için kullanılmaktadır. Buna rağmen, son yıllarda, gerekli reaktif gücü emmede veya üretmede tristör kontrollü reaktörler ve tristör anahtarlamalı kapasitörleri kullanan Statik Var Kompanzatörler geliştirildi[7-9]. Uygun bir kontrol şemasıyla kendiliğinden komutalı PWM konverterlerin kullanımı, temel güç ağı saykılından daha hızlı bir cevapla reaktif akım komponentlerini üretme ve emmenin statik kompanzatörlerin düzenlemesine izin vermektedir[10-12].

Güvenilir yüksek hızlı güç elektroniği, güçlü analitik araçları, gelişmiş kontrol ve mikrobilgisayar teknolojileri, FACTS olarak bilinen Esnek AC İletim Sistemleri'nin kullanımına dayalı olarak geliştirildi ve güç iletim sistemlerinin operasyonlarının yeni bir konsepti olarak sunuldu[13,14]. Bu sistemlerde, statik VAR kompanzatörlerin kullanımı; kararlılık limitlerine uymaksızın, termal kapasitesine yakın, varolan hat boyunca görünür güç transferinin miktarını artırmaya izin vererek önemli bir rol oynamaktadır.

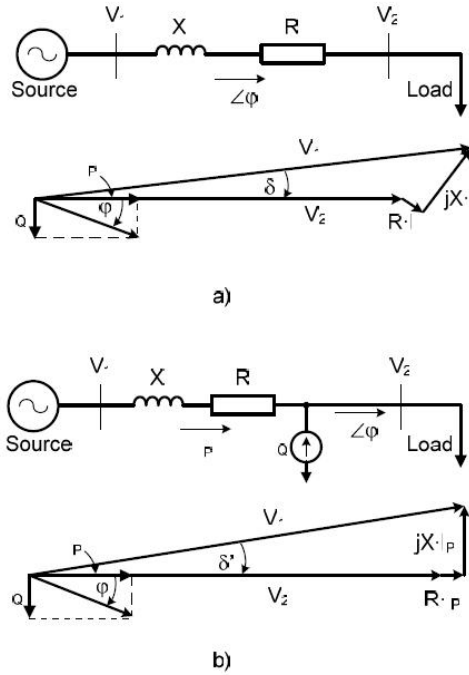
1.1. Reaktif Güç Kompanzasyon Prensipleri

Lineer bir devrede, reaktif güç, 50 veya 60 Hz'lik bir sistemde 100/120 Hz'e eşit bir frekansla ani gücün ac komponenti gibi tanımlanabilir. AC güç kaynağından üretilen reaktif güç, çeyrek saykıl boyunca bir reaktör veya kapasitörde depolanır ve sonraki çeyrek saykılta güç kaynağına geri gönderilir. Diğer bir deyişle, 50 veya 60 Hz değerinin iki katına eşit bir frekansta, ac kaynak ve kapasitör veya reaktör arasında reaktif güç osilasyon gösterir. Bu sebeple, VAR jeneratörleri kullanarak, yük ve kaynak arasındaki sirkülasyon önlenir ve böylece güç sisteminin voltaj kararlılığını geliştirilerek kompanze edilebilir. Reaktif güç kompanzasyonu, paralel veya seri bağlı VAR jeneratörlerle düzenlenebilir.

Şekil 1.1, tipik bir indüktif yük, bir güç hattı ve V_1 kaynağını içeren temel bir ac sistemde shunt reaktif güç kompanzasyonunun teorik etkilerini ve prensiplerini göstermektedir. Şekil 1.1.a, kompanzasyonsuz bir sistemi fazör diyagramı ile göstermektedir. Fazör diyagramında, akımın faz açısı, yük tarafıyla ilgilidir yani I_p aktif akımı V_2 yük voltajıyla aynı fazdadır. Yük indüktif kabul edildiğinde, uygun işlem için reaktif güç gerektirir ve bu nedenle güç hatları boyunca jeneratörden akımı artırarak

kaynak onu beslemelidir. Reaktif güç yükün yanında üretildiğinde, yük terminallerinde voltaj regülasyonu geliştirilerek ve güç kayıpları azaltılarak hat akımı azaltılabilir. Bu 3 yolla yapılmaktadır: a) bir kapasitörle b) bir voltaj kaynağıyla c) bir akım kaynağıyla. Şekil 1.1.b ' de, I_Q yük akımının reaktif komponentini kompanse etmede akım kaynaklı bir eleman kullanılabilmektedir. Sonuç olarak, sistem voltaj regülasyonu geliştirilmekte ve kaynaktan reaktif akım komponenti azaltılmaktadır veya çoğunlukla elimine edilmektedir.

Şayet yük ilerleyen kompanzasyona gerek duyarsa, bu durumda bir indüktöre ihtiyaç duyulur. İndüktif shunt kompanzasyon için bir akım kaynağı veya bir voltaj kaynağı kullanılabilir. Voltaj veya akım kaynağı VAR jeneratörleri (indüktör veya kapasitör yerine) kullanmanın avantajı, bağlantı noktasındaki voltajın bağımsızca ürettiği reaktif güçtür.



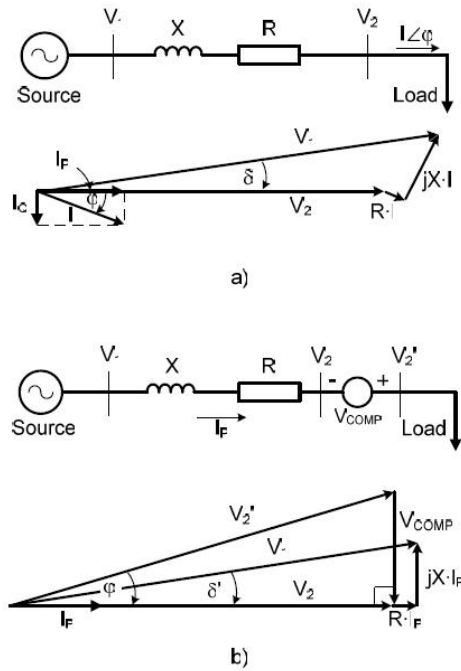
Şekil 1.1. Radyal bir ac sistemde shunt kompanzasyonun prensipleri.

- a) Reaktif kompanzasyon yokken,
- b) Bir akım kaynağıyla shunt kompanzasyon.

VAR kompanzasyon da bir tür seri kompanzasyon türü olabilir. Tipik seri kompanzasyon sistemleri, bir iletim hattının eşdeğer reaktansını azaltmada kapasitörleri kullanır. Bir seri kapasitör bağlantısı reaktif güç üretir şöyle ki hattın transfer

reaktansının bir kısmını dengeler. Sonuçta güç iletim sisteminin fonksiyonelliğini geliştirir.

Shunt kompanzasyona benzer şekilde, seri kompanzasyon da, Şekil 1.2’de gösterildiği gibi akım veya voltaj kaynağı elemanlarıyla düzenlenebilmektedir. Şekil 1.2.a, V_2 ’de referans açısıyla da birlikte Şekil 1.1.a’ nin güç sistemiyle aynısını göstermektedir ve V_2 ’ deki birim güç faktör operasyonuna sahip olmada yeniden düzenlenebilen bir voltaj kaynağı üzerinden seri kompanzasyonla Şekil 1.2.b’de sonuçlar elde edilmiştir. Buna rağmen, shunt kompanzasyonla karşılaştırıldığında kompanzasyon stratejisi farklıdır. Bu durumda, yük tarafındaki voltaj olan V_2 ’ nin açısını değiştirmede yük ve hat arasında V_{COMP} voltajı eklenmektedir. V_{COMP} un uygun genlik düzenlemesiyle, birim güç faktörü V_2 ’de tekrar ulaşılabilir. Şekil 1.2.b’nin fazör diyagramından görüleceği gibi, V_{COMP} , I_P akımını gerileyen hat indüktansında voltaj düşümünün karşısında bir voltaj üretir.

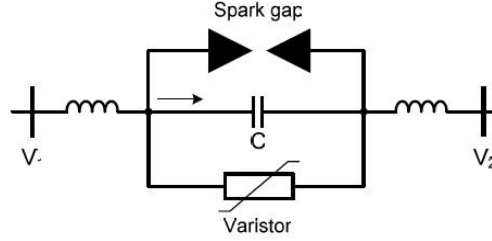


Şekil 1.2. Seri kompanzasyonun prensipleri.

- a) Kompanzasyonsuz sistem,
- b) Bir voltaj kaynağıyla seri kompanzasyon.

Kapasitörlerle seri kompanzasyon, en yaygın stratejidir. Şekil 1.3’te gösterildiği gibi seri kapasitör, bir iletim hattına seri olarak kurulmuştur, ki burada sistem voltajından tamamen izole edilmiş bir platform üzerine kurulu tüm ekipmanlarından

bahsedilmektedir. Bu platformda, ana kapasitör, aşırı gerilimden koruma devreleriyle birlikte yerleştirilmiştir. Aşırı gerilimden koruma, yakınında birkaç hata olsa bile hata akımına direnmek zorunda kalan kapasitör bankası gibi önemli bir dizayn faktörüdür. Asıl aşırı gerilimden koruma; nonlineer metal oksit varistörleri, kıvılcım atlama aralığını ve hızlı bir bypass anahtarını gerektirmektedir.



Şekil 1.3. Seri kapasitör kompanzator ve koruma sistemi.

VAR jeneratörlerinin başarılı bir operasyonu için kaynak tipinden veya sistem konfigürasyonundan bağımsız, farklı gereksinimler dikkate alınmalıdır. Bu gereksinimlerin bazıları basitlik, kontrol edilebilirlik, dinamiklik, güvenilirlik ve harmonik bozulmadır.

1.2. Geleneksel VAR Jeneratörler

Genelde, VAR jeneratörler, kullanılan teknolojiye ve sisteme bağlandığı yere göre sınıflandırılırlar. Reaktif gücü kompanze etmede genellikle rotatif ve statik jeneratörler kullanıldı. Son yüzyılda, güç elektroniği teknolojilerini kullanarak çok sayıda farklı statik VAR jeneratörler geliştirildi[7]. Güç elektroniği tabanlı VAR kompanzatorları iki farklı yaklaşımla ele alınır, birisi tristör anahtarlamalı kapasitör ve reaktörlerle çalışanlar, diğeri kendiliğinden komutalı statik konverterleri kullananlardır.

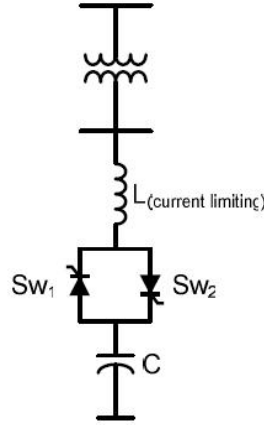
1914 yılında ilk kez güç faktörü düzeltmesi için shunt kapasitörler kullanıldı[16]. Shunt kapasitörler tarafından iletme akımı, yük tarafından gerileme akımı kompanze edilir. Shunt kapasitörlerin seçimi, çoğu faktöre bağlıdır, en önemlisi yük tarafından alınan gerileme reaktif gücün miktarıdır. Çok dalgalanmalı yükler durumunda, reaktif güç büyük aralıklarla değişir. Değişken VAR kompanzasyon, anahtarlamalı kapasitörler kullanılarak gerçekleştirilir[17]. Toplam VAR gereksinimine bağlı olarak, kapasitör bankalarında sistemin anahtarı açılır veya kapatılır. Daha yumuşak kontrol, kullanılan anahtarlamalı kapasitör birimlerinin sayısına bağlıdır. Anahtarlama genellikle röleler ve devre kesicileri kullanılarak gerçekleştirilir. Buna rağmen, mekaniksel anahtarlar ve

rölelere dayalı bu metotların, güvenilirlikten dolayı dezavantajı vardır. Ayrıca, yüksek ani boşalma akımları üretmektedirler ve sık sık bakım gerektirmektedir[16].

Senkron kondenserler, 50 yıldan daha fazla süredir voltaj ve reaktif güç kontrolünde önemli rol oynamaktadırlar. Bir senkron kondenser, güç sistemine bağlanmış basit bir senkron makinedir. Birim senkronize edildikten sonra, ac sistem tarafından gerekli reaktif gücü emerek veya üreterek alan akımı ayarlanır. Uygun otomatik uyarım devresi ile kullanıldığında makine sürekli reaktif güç kontrolü sağlayabilir. Değişken yük durumları ve olasılıklı durumlar altında beklenen limitlerde voltajları sağlamada ve kararlılığı geliştirmede iletim voltaj seviyeleri ve dağıtımın her ikisinde de senkron kondenserler kullanılmaktadır. Buna rağmen senkron kondenserler bugün nadiren kullanılmaktadır çünkü dayanıklı tesisler ve büyük koruma ekipmanları gerektirmektedirler. Bunun yanısıra kısa devre akımlarına neden olabilmektedirler ve hızlı yük değişimini yeterli seviyede kontrol edememektedirler. Dahası, kayıpları ve maloluşu, statik kompanzatörlerinkinden daha yüksektir[1].

Senkron kondenserdeki gibi, VAR aralığının tümü boyunca doğru kontrolü yapmanın amacı, statik kompanzatörlerin (SVC) gelişimiyle gerçekleşmiştir[6,7]. Statik VAR kompanzatörler (SVC), hızlı ve değişken reaktif güç sağlayan standart reaktif güç shunt elemanlarını (reaktörler ve kapasitörler) içermektedir. Bunlar iki kategoride sınıflandırılabilir: tristör anahtarlamalı kapasitör ve tristör kontrollü reaktör.

Şekil 1.4 tristör anahtarlamalı kapasitör (TSC) tipi için statik bir kompanzatörün temel şemasını göstermektedir. İlk defa 1971'de ASEA tarafından ortaya konan shunt kapasitör bankası iki küçük adımda gösterilir: bireysel anahtarlamalı ve çift yönlü tristör anahtarlamalı[14]. Tek fazlı her bir kol iki ana parçayı içerir: C kapasitörü ve S_{w1} ve S_{w2} tristör anahtarları. Buna ek olarak, bir parça daha var, L indüktörü, ağdaki rezonansı önlemek ve tristörler boyunca geçen akım oranının artış oranının limitini kontrol etmek için kullanılır. TSC tipli statik kompanzatörlerin şu özellikleri vardır: adım kontrolü, bir yarım saykıldaki ortalama gecikme ve harmoniği azaltma.



Şekil 1.4. Tristör anahtarlamalı kapasitör yapısı.

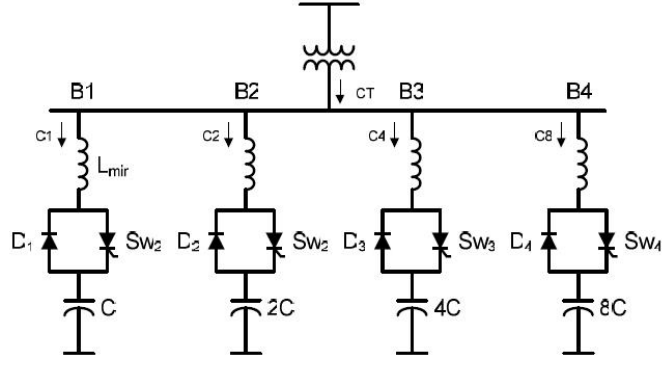
Verilen bir t zamanında, kapasitör üzerinden geçen akım, aşağıdaki gibi gösterilir:

$$i(t) = \frac{V_m}{X_C - X_L} \cos(\omega t + \alpha) - \frac{V_m}{X_C - X_L} \cos(\alpha) \cos(\omega_r t) + \left[\frac{X_C V_m \sin(\alpha)}{\omega_r L (X_C - X_L)} - \frac{V_{CO}}{\omega_r L} \right] \sin(\omega_r t) \quad (1)$$

Bu denklemden X_C ve X_L kompanzasyon kapasitif ve indüktif reaktansını, V_m kaynak maksimum ani voltajını, α kapasitörün bağlandığı yerdeki voltaj faz kaydırma açısını, ω_r sistem rezonans frekansını, V_{CO} t=0 anında kapasitör voltajını belirtmektedir.

Bu ifade, sistem eşdeğer rezistansı ihmal edilerek elde edilmiştir. Bu yaklaşım, yüksek voltaj iletim hatlarında geçerlidir. Şayet kapasitör kaynak voltajın maksimum olduğu anda bağlandıysa akım iletim komponenti sıfırdır.

Anahtarlamalı kapasitör şemasının basit teorik gösterimine rağmen, popüleritesini birkaç dezavantajdan dolayı kaybetmiştir: VAR kompanzasyon sürekli değildir, her bir kapasitör bankası ayrı bir tristör anahtarına gerek duyar ve bu nedenle yapısı ekonomik değildir. Bu dezavantajlara TSC kullanarak etkili bir çözüm, tristör anahtarlarının birini bir diyotla değiştirmektir. Bu durumda, tristörler doğru zamanda ateşlendiğinde ani boşalma akımları elimine edilir ve her kapasitör bankası binary bir kombinasyonda ele alındığında daha devamlı reaktif güç kontrolüne ulaşılabilir[13,18]. Şekil 1.5'te L_{min} indüktörü ani boşalma akımlarını önlemede kullanılmıştır.



Şekil 1.5. Binary tristör-diyot-anahtarlamalı kapasitör yapısı.

Her kolu bağlamak için , voltaj desteği maksimum negatif değerine ulaştığında tristör geytinde bir ateşleme pulsü uygulanmıştır. Bu sayede, yumuşak bir bağlantı elde edilmiştir. Hiçbir bozulma olmadan akım sıfırdan itibaren başlangıç artacak, saykıl tamamlandıktan sonra, kapasitör voltajı $-V_m$ voltajına sahip olacak ve tristör otomatik olarak bloklanacaktır. Bu tür operasyonda, kolun bağlantısı veya bağlantısızlığının her ikisi de yumuşak olacak ve bozulma olmayacaktır. Şayet ateşleme pulsleri ve $-V_m$ voltajı düzgün düzenlendiğinde, harmonik veya ani boşalma akımları oluşmayacaktır, iki duruma erişilecektir:

- $v = -V_m$ sıfır olduğunda dv/dt dir.
- anottan katoda tristör voltajı sıfıra eşittir.

Kaynak voltajı $v(t) = V_m \sin \omega t$, V_{co} kapasitör başlangıç voltajı ve $v^{TH}(t)$ tristör anot katot voltajı olarak farzederek, $v^{TH}(t) = 0$ durumunda kolun doğru bağlantısı şöyle olur:

$$v^{TH}(t) = v(t) - V_{co} = V_m \sin \omega t - V_{co} \quad (2)$$

$V_{co} = -V_m$ olduğunda:

$$v^{TH}(t) = V_m \sin \omega t + V_m = V_m (1 + \sin \omega t) \quad (3)$$

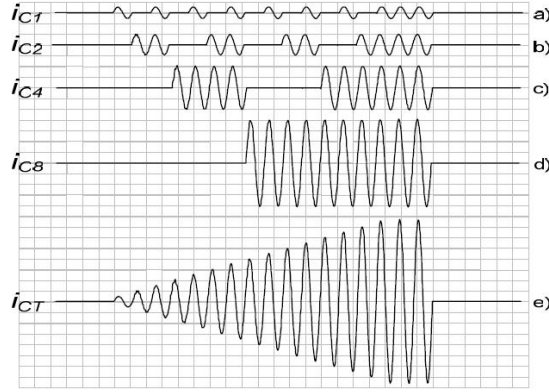
$$v^{TH}(t) = 0, \sin \omega t = -1, \omega t = 270^\circ$$

$\omega t = 270^\circ$ de, tristör anahtarlaması açık ve C kapasitörü deşarj olmaya başlar. Bu noktada, $\sin(270^\circ) = -\cos(0^\circ)$ ve bundan dolayı $\omega t \geq 270^\circ$ için $v_c(t)$, $v_c(t_0) = -V_m \cos \omega t_0$ olacaktır. t_0 da başlayan kompanze edilmiş kapasitör akımı şöyle olacaktır:

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} = C V_m \frac{d}{dt} (-\cos \omega t_0) = C V_m \sin \omega t_0 \quad (4)$$

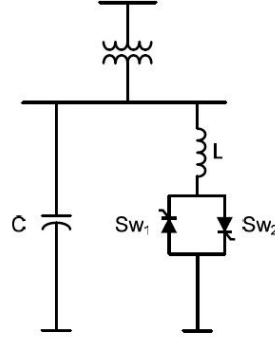
Denklem 4, hiçbir bozulma ve ani boşalma olmadan sinüsoidal bir dalga formu gibi akımın sıfırdan başladığını göstermektedir. Şayet anahtarlama durumları uygunsa, L indüktörü elimine edilebilir.

Şekil 1.6'nın deneysel osilogramları, kolların çoğunun binary bağlantısının sürekli bir kompanze edilmiş akım değişikliğine nasıl imkan verdiğini göstermektedir.



Şekil 1.6. Tristör diyot anahtarlama kapasitörünün deneysel kompanze edilmiş faz akımı. a) B1'deki akım, b) B2'deki akım, c) B3'teki akım, d) B4'teki akım, e) Tüm sistem kompanzasyon akımı.

Şekil 1.7, tristör kontrollü reaktör (TCR) tipinde statik bir kompanzatör şemasını göstermektedir. Çoğu durumda, bu şekilde yer almayan düşük seviye harmonikli bir filtre ve bir fixed kapasitör de bulunur. 3 faz kolunun her biri L indüktörünü ve S_{w1} ve S_{w2} tristör anahtarlarını içermektedir. Reaktörlerin her ikisi anahtarlama ve faz açısı kontrollü olabilir[20-22]. Faz açısı kontrolü kullanıldığında, reaktif güç tüketiminin sürekli bir aralığı elde edilir. Full kondüksüyon 90^0 lik bir gating açısıyla elde edilir. Parçalı kondüksüyon ise 90^0 ve 180^0 arasındaki açılarda elde edilir (Şekil 1.8). Tristör gating açısının artmasıyla, akım reaktörünün temel elemanı azaltılır. Bu, indüktansı artırmayla ve reaktör tarafından emilen reaktif gücü azaltmayla eşdeğerdir. Buna rağmen şuna da dikkat etmek gerekir ki; reaktör akımındaki değişiklik sadece zamanın ayırık noktalarında elde edilir, bu da şu anlama gelir; geliştirmeler, yarım saykıl frekanstan daha fazla yapılamaz. TCR tipi statik kompanzatörler; pratikte hiçbir geçici durumun olmadığı ve bir yarım saykıl maksimum gecikme, sürekli kontrolü sağlama yeteneğiyle karakterize edilir. Bu yapının prensip olarak dezavantajları, düşük frekans harmonik akımı komponentlerin üretimi ve daha yüksek kayıplardır[20].



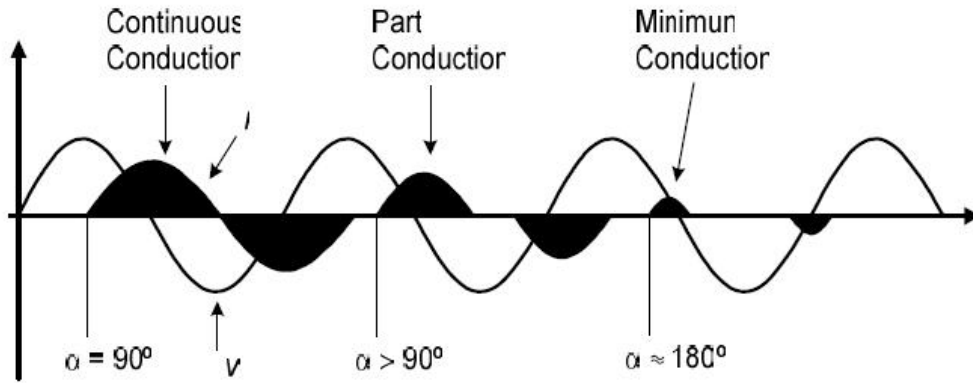
Şekil 1.7. Tristör kontrollü reaktör yapısı.

Reaktör akımının temel komponenti ve α faz kayma açısının arasındaki ilişki şöyle verilebilir:

$$I_1 = \frac{V_{rms}}{\pi\omega L} (2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)) \quad (5)$$

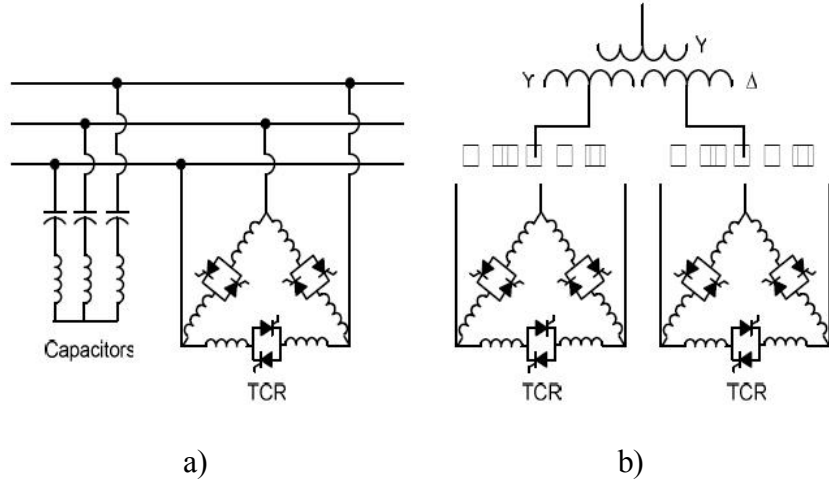
Tek fazlı bir birimde, dengelenmiş faz kaydırma açılarıyla birlikte, reaktör akımında sadece tek harmonik komponentler sunulmuştur. Her bir harmonik komponentin genliği şöyle tanımlanabilir:

$$I_k = \frac{4V_{rms}}{\pi X_L} \left[\frac{\sin(k+1)\alpha}{2(k+1)} + \frac{\sin(k-1)\alpha}{2(k-1)} - \cos(\alpha) \frac{\sin(k\alpha)}{k} \right] \quad (6)$$



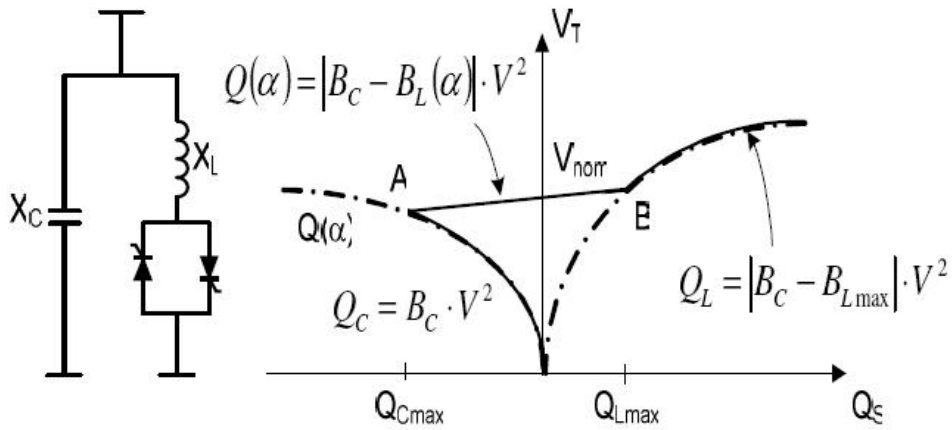
Şekil 1.8. Farklı tristör faz kayma açıları için bir TCR'de simüle edilmiş voltaj ve akım dalgaları.

Düşük frekans akım harmoniklerini elimine etmek yerine, delta konfigürasyonları ve pasif filtreler Şekil 1.9.a' da gösterildiği gibi kullanılabilir. 12 pals konfigürasyonları da Şekil 1.9.b'de gösterildiği gibi kullanılabilir. Bu durumda pasif filtrelere gerek yoktur.



Şekil 1.9. Fixed kapasitör- tristör kontrollü reaktör yapısı a) 6 palsli topoloji b) 12 palsli topoloji.

Şekil 1.10'da gösterildiği gibi, statik VAR kompanzatorlarının ana karakteristiklerinden biri, uygulanan voltaja bağlı sistemle değiştirilmiş reaktif güç miktarıdır. Bu şekil, fixed kapasitör-tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) kompanzatorunun bir kombinasyonunun Q-V kalıcı durum karakteristiklerini göstermektedir. Bu karakteristik FC-TCR tarafından emilen veya üretilen reaktif güç miktarını gösterir.

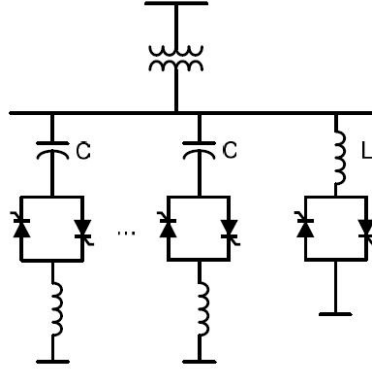


Şekil 1.10. Bir FC-TCR nin voltaj-reaktif güç karakteristiği.

Gerekli reaktif güç kontrol aralığına bakmaksızın, Şekil 1.11'de gösterildiği gibi her statik kompanzator birbiriyle kullanılabilir. Bu durumda, anahtarlamalı kapasitörlerle sistem her nerede kullanılırsa, reaktif güç çeşitli adımlara bölünür ve değişiklikler ele alınır. Sürekli kontrol, tristör kontrollü bir reaktörün eklenmesiyle sağlanabilir. Şayet

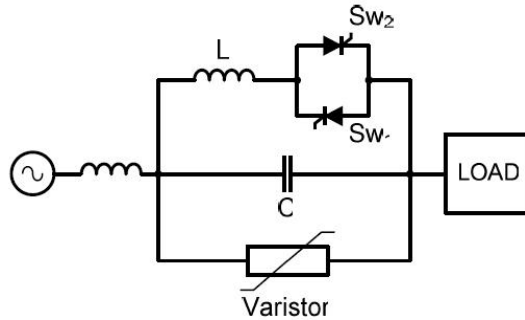
reaktif gücü emmek gerekirse, kapasitör banklarının tamamının bağlantısı kesilir ve emme işlemi için eşdeğer reaktör sorumlu tutulur.

Birleşik TSC ve TCR tipi statik kompanzatörler, sürekli bir kontrolle, geçici rejim olmayan, düşük seviye harmonikler, kontrol ve işlemde esneklikle karakterize edilebilir. TSC-TCR birleşiminin en açık dezavantajı yüksek maliyetidir.



Şekil 1.11. Birleşik TSC ve TCR yapısı.

Şekil 1.12' de Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC)'ün tek hat diyagramı gösterilmiştir. TCSC'ler, enterkonnekte büyük elektriksel sistemler de gereken sönüm artışını elde etmede etkili bir araçtır. Bunun yanı sıra, SSR(Subsenkron Rezonans)'nin problemlerini aşmada da kullanılırlar.



Şekil 1.12. TCSC'nin güç devresi topolojisi.

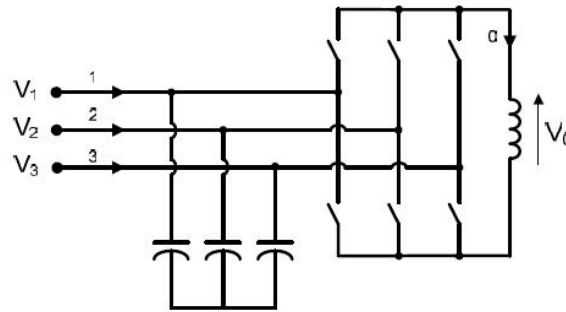
TCSC kavramında iki önemli nokta vardır. Birincisi, TCSC, spesifik enterkonnekte bir güç hattının reaktansını değiştirerek büyük elektriksel sistemler arasında elektromekanik sönümü sağlar, TCSC değişken bir kapasitif reaktans sağlar. İkincisi, beklenen subsenkron rezonansı önlemek gibi subsenkron frekanslar için görünür empedansı TCSC değiştirebilir. Güç osilasyon sönümü için, TCSC şeması, güç iletim koridorunun efektif reaktansının modülasyonunun bir kontrolünü içerir. Uygun sistem

kontrolüyle, reaktansın bu modülasyonu, aktif güç transferinin osilasyonlarını engellemede kullanılır.

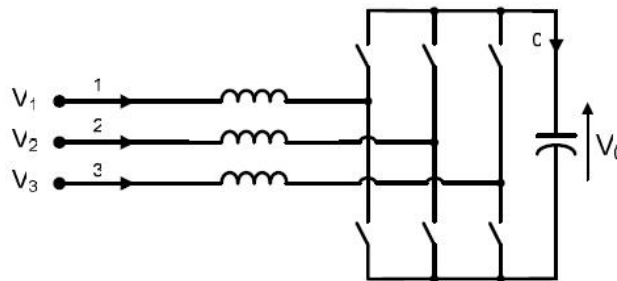
1.3. Kendiliğinden Komutalı VAR Kompanzatörler

Reaktif güç kompanzasyonu gibi kendiliğinden komutalı konverter uygulaması da etkili bir çözümdür. Bu teknoloji; statik senkron kompanzatörler, birleştirilmiş güç akış kontrolörü (UPFC) ve dinamik voltaj restorerler (DVRs) gibi daha sofistike kompanzatör araçlarını kullanır[15,19].

Gate komutalı yarıiletken elemanlardaki büyük gelişmeyle, dikkatler, büyük kapasitör ve reaktör bankalarına gerek duymayan reaktif güç emme veya üretme kabiliyetine sahip kendiliğinden komutalı VAR kompanzatörlere çekilmiştir. Akım kaynaklı ve voltaj kaynaklı konverterler gibi birkaç yaklaşım vardır. Şekil 1.13'te gösterilen akım kaynaklı yaklaşım, regüle edilmiş bir dc akımla beslenen bir reaktör kullanır ve Şekil 1.14'te gösterilen voltaj kaynaklı inverter regüle edilmiş bir dc voltajlı bir kapasitör kullanır.

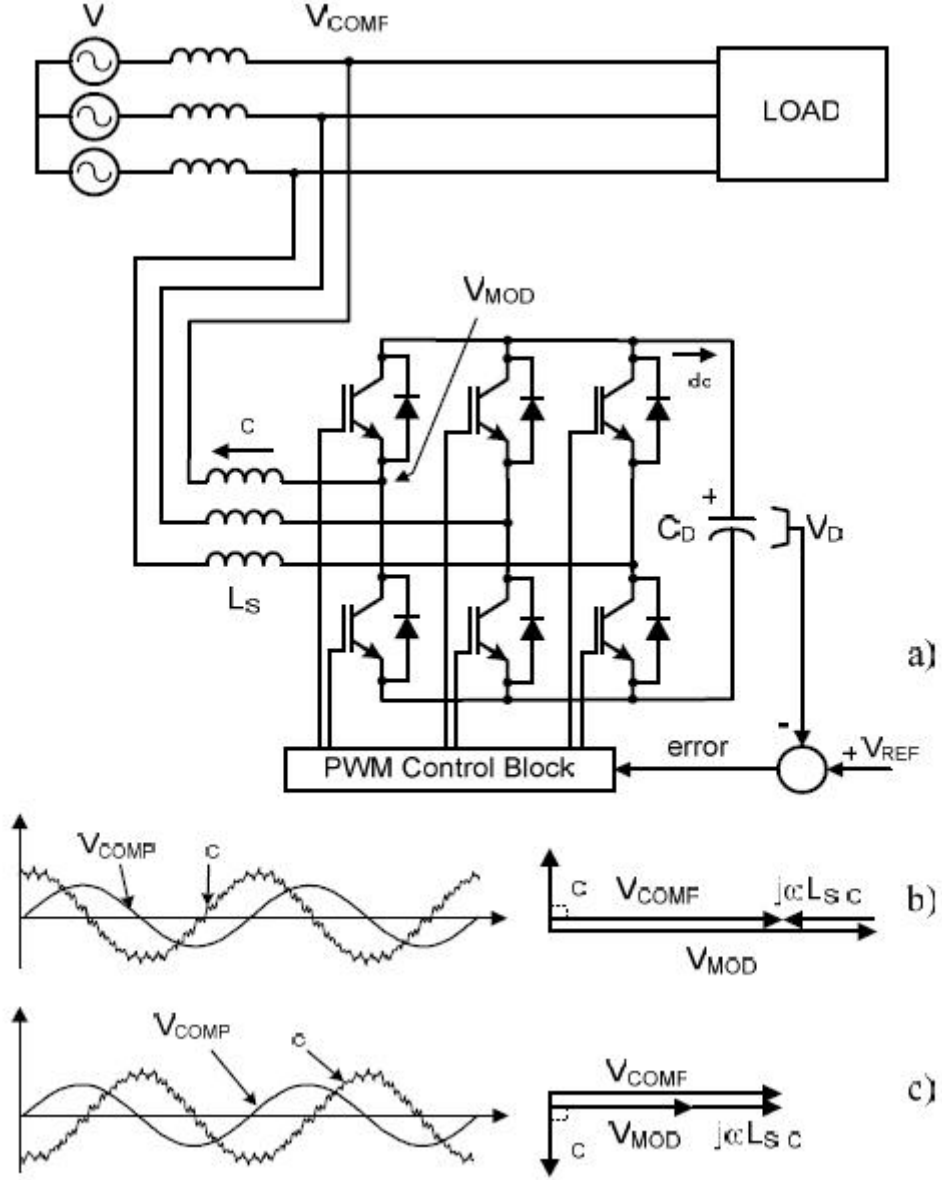


Şekil 1.13. Akım kaynaklı bir konverterli VAR kompanzatör topolojisi.



Şekil 1.14. Voltaj kaynaklı bir konverterli VAR kompanzatör topolojisi.

Kendiliğinden komutalı VAR kompanzatörlerin avantajları: boyutun önemli miktarda azalışı ve büyük sayıda pasif elemanlar ve daha düşük oranlı kapasite gereksinimli yarıiletken elemanları elimine edilmesinden elde edilen potansiyel masrafın azalmasıdır[19, 23]. Kendiliğinden komutalı kompanzatörler; iletim sistemini stabilize etmede, voltaj regülasyonunu geliştirmede ve doğru güç faktörü ve yük dengeziklikleri konularında kullanılır[19,23]. Dahası, VAR kompanzatörler shunt ve seri kompanzatörlerinin düzenlenmesinde de kullanılır. Şekil 1.15, boost tipi bir voltaj kaynaklı konverterle düzenlenmiş shunt bir VAR kompanzatörü göstermektedir. Konverterdeki tüm güç kayıplarını ihmal ederek, reaktif güç kontrol; Şekil 1.16' da gösterilen PWM yapısıyla modifiye edilmiş V_{MOD} çıkış voltajının temel komponentinin genliği düzenlenerek yapılabilir. V_{MOD} , V_{COMP} voltajından daha büyük olduğunda, VAR kompanzatör reaktif güç üretir (Şekil 1.15.b) ve V_{MOD} , V_{COMP} voltajından daha küçük olduğunda, kompanzatör reaktif gücü emer (Şekil 1.15.c). Çalışma prensibi senkron bir makineye benzer. Kompanzasyon akımı, V_{MOD} ve V_{COMP} genliklerine bağlı olarak ilerletilebilir veya geriletilebilir. Konverterin dc linkine bağlı V_D kapasitör voltajı sabit tutulur ve V_{MOD} ve V_{COMP} arasındaki faz kayma açısını kontrol eden bir döngü geribeslemesiyle V_{REF} referans değerine eşit olur.



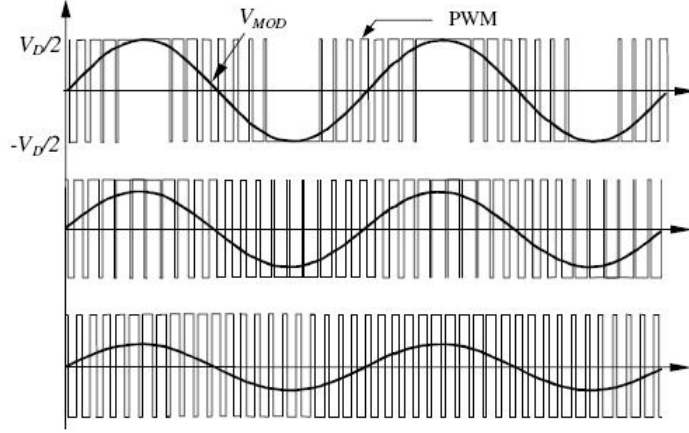
Şekil 1.15. Voltaj kaynaklı kendiliğinden komutalı bir shunt VAR kompanzatorün akım ve voltaj dalga formları.

a) Kompanzator topolojisi b) ($V_{MOD} > V_{COMP}$) ilerleten kompanzasyon için akım ve voltaj dalga formları c) ($V_{MOD} < V_{COMP}$) geriletan kompanzasyon için akım ve voltaj dalga formları.

(V_{MOD}) kompanzator çıkış voltajının genliği, anahtarlama modülasyon indeksi değiştirilerek kontrol edilir (Şekil 1.16). V_D konverter dc voltajı; konverter tarafından emilen aktif gücün küçük bir miktarının düzenlenmesiyle değiştirilebilir.

$$P = \frac{V_{COMP} \cdot V_{MOD}}{X_S} \sin(\delta) \quad (7)$$

Bu denklemde X_S konverter bağlantılı reaktörü ve δ , V_{MOD} ve V_{COMP} voltajları arasındaki faz kayma açısını belirtmektedir.

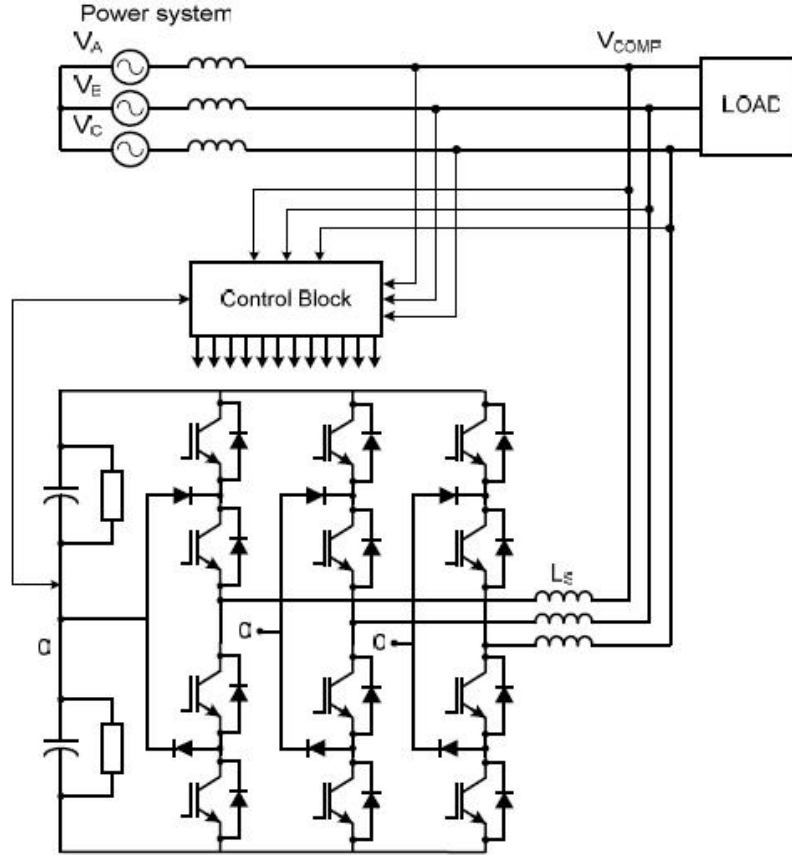


Şekil 1.16. Farklı modülasyon indeksi için kompanzator çıkış voltaj dalga formu.

Yüksek voltaj sistemlerindeki kendiliğinden komutalı konverterlerin kullanımında çözülmesi gereken ana problemlerden biri, piyasadaki kontrollü yarı iletkenlerin (IGBTs ve IGCTs) sınırlı kapasitesidir.

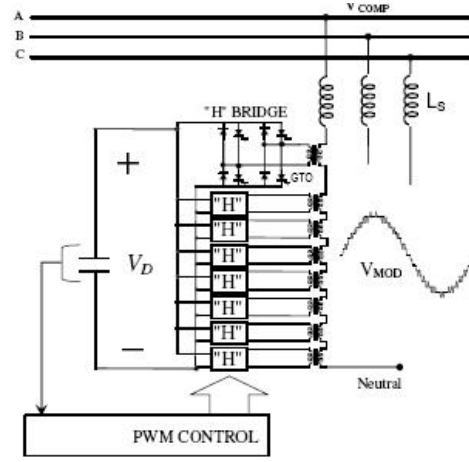
Çok seviyeli kompanzatorlar araştırılmaya devam edilmekte ve bugün statik VAR kompanzatorlar gibi bazı topolojiler kullanılmaktadır. Çok seviyeli konverterlerin ana avantajları; daha az harmonik üretimi ve daha yüksek voltaj yeteneğidir. Çok seviyeli kompanzatorlar içinde en popülerleri üç seviyeli topolojilerdir.

Şekil 1.17 üç seviyeli bir konverterle düzenlenmiş shunt bir kompanzatoru göstermektedir. Üç seviyeli konverterler; makine sürücüleri ve aktif front-end rectifierler gibi orta seviyeli voltaj konverter uygulamaları için standart bir topoloji olmaya başlamıştır[24]. Üç seviyeli konverterlerin avantajı, geleneksel iki seviyeli topolojiden daha fazla seviyeli voltaj dalga formu ürettiğinden beri, üretilen harmonik içeriği azaltabilmeleridir. Diğer bir avantaj; anahtarlama frekansı ve yarıiletken voltaj aralığını azaltabilmeleridir. Üç seviyeli konverterler; IGBTs veya IGCTs gibi 12 kendiliğinden komutalı yarıiletken içerirler ve bunların her biri bir reverse paralel bağlı güç diyotuyla paraleldir ve 6 diyot kolu dc link barasının ortasına bağlıdır ve anahtarların her parçasının ortası Şekil 1.17' de gösterilmiştir. DC kaynağı, çıkış terminallerine dizisel bağlandığında, konverter, bir küme PWM sinyali üretebilir ki bu durumda frekans, genlik ve ac voltajın fazı yeterli kontrol sinyalleriyle modifiye edilebilir.

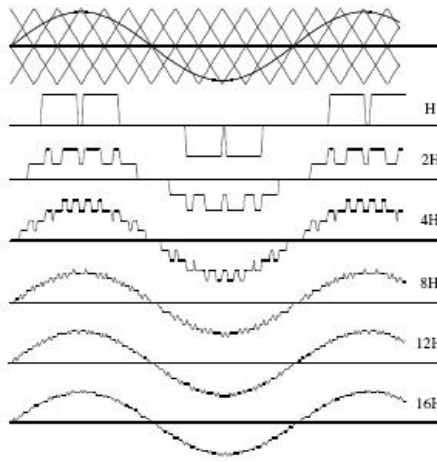


Şekil 1.17. Üç seviyeli inverterli shunt bir VAR kompanzator.

Bir diğer ilginç teknoloji, güç transformatörleri üzerinden hatta bağlı Şekil 1.18'de gösterilen "H" köprülerinin kullanımınıdır. Bu transformatörler, konverter tarafına paralel ve hat tarafına seri bağlıdır[25]. Sistem, köprülerin zincirinde bağlı konverterlerin sayısına bağlı ve kaymış üçgen taşıyıcılarla SPWM (Sinüsoidal Pals Genişlik Modülasyonu) i kullanır, voltaj dalga formu daha fazla sinüsoidalleşir. Şekil 1.18.a Sekiz "H" köprüsüyle düzenlenmiş bu topolojinin bir fazını gösterir ve Şekil 1.18.b "H" köprülerinin sayısının bir fonksiyonu gibi voltaj dalga formlarını gösterir. Bu konverterle ilgili ilginç bir sonuç şudur: ac voltajlar (PWM ve AM) genlikleriyle ve pals genişliğiyle modüle edilebilmektedir. Bu şundan dolayıdır: pals modülasyonu değiştiğinde, genliğin adımları da değişir. Sonuç voltajının adımlarının maksimum sayısı, konverter sayısının iki katı ile sıfır seviyesinin toplamına eşittir.



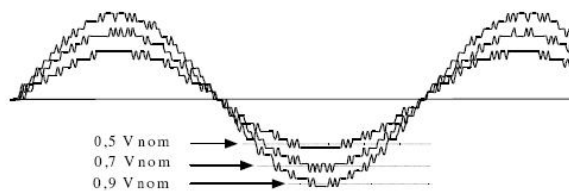
a)



Şekil 1.18. Çok seviyeli konverter.

- a) Sekiz "H" köprüsüyle ve üçgensel taşıyıcı kaymasıyla çok seviyeli konverter
- b) Köprülerin sayısının bir fonksiyonu gibi voltaj kalitesi.

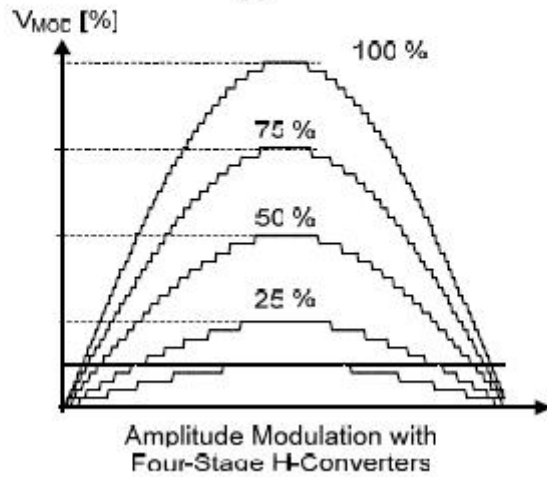
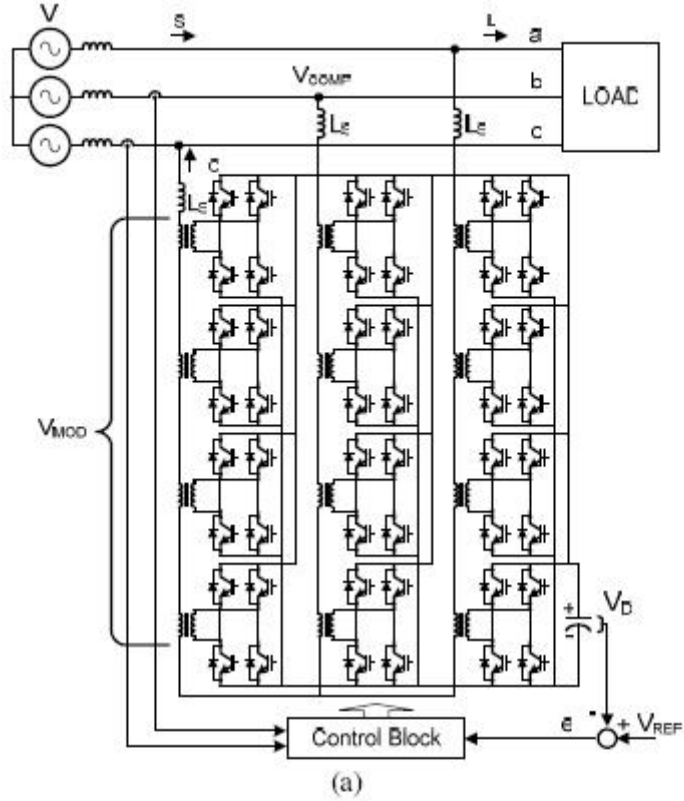
Şekil 1.19, AM işlemini göstermektedir. Voltaj azaldığında, bazı adımlar kaybolur ve sonra modülasyon genliği ayrık bir fonksiyon olur.



Şekil 1.19. Şekil 1.18'deki topolojide genlik modülasyonu.

Seviyelerin sayısı, birkaç konverterle hızlıca artırılabilir. Şekil 1.18.a'daki konvertere benzer şekilde, Şekil 1.20.a' nın topolojisi, hat tarafına seri bağlı çıkış transformatörleri

boyunca voltaj izolasyonu ile ortak bir dc link içermektedir. Şekil 1.20'deki örnekte, 81 seviyeli voltajlı Genlik Modülasyonu, faz başına sadece 4 "H" konverteri kullanarak sağlanmıştır. Bu sayede, "bedava harmonik" karakteristikleriyle VAR kompanzatorler düzenlenebilmektedir.



Şekil 1.20.a) 81 seviyeli VAR kompanzator b) Genlik modülasyonunu kullanarak konverter çıkışı.

SVC'de uygulamalar için bir çok eleman var: tristörler, IGBT ler ve IGCT ler. Uygulamanın bu alanı , kV aralığında yüksek voltajları bloklamada yarıiletkenlere

gerek duyar. SVC uygulamaları için yarıiletkenlerde önemli bir gelişme Light Triggered Tristör (LTT) dir. Bu eleman, ultra yüksek güç uygulamaları için çok önemlidir. Bu elemanlarla maliyeti azaltma imkanı vardır[27].

Tristör kontrollü kapasitör ve reaktör bankalarıyla karşılaştırıldığında, kendiliğinden komutalı VAR kompanzatorler aşağıdaki avantajlara sahiptir:

- i) İlerleme ve gerileme reaktif gücünün her ikisini de sağlayabilir. Bu , bazı kritik işlem durumlarında rezonansları azaltmayı da sağlar.
- ii) Kendiliğinden komutalı konverterlerin zaman cevabı, temel güç ağ saykılından daha hızlı olduğundan beri, reaktif güç sürekli olarak kontrol edilebilmektedir.
- iii) Kendiliğinden komutalı konverterlerin yüksek frekans modülasyonu, destek akımının düşük harmonik içeriğiyle sonuçlanır, böylece filtre komponentlerinin boyutu azaltılır.
- iv) Ani boşalma akımı üretmezler.
- v) Voltaj değişiklikleri ve geçici durumları altında dinamik performans geliştirilir.
- vi) Uygun kontrolle kendiliğinden komutalı kompanzatorler aynı bir aktif hat harmonik filtresi, dinamik voltaj restorerler veya birleştirilmiş güç akış kontrolleri gibi davranır.

Tablo 1.1 VAR kompanzatorlerin karşılaştırmasını içermektedir.

	Synchronous Condenser	Static Compensator		Self-commutated Compensator
		TCR (with shunt capacitors if necessary)	TSC (with TCR if necessary)	
Accuracy of Compensation	Good	Very Good	Good, very good with TCR	Excellent
Control Flexibility	Good	Very Good	Good, very good with TCR	Excellent
Reactive Power Capability	Leading/Lagging	Lagging/Leading indirect	Leading/Lagging indirect	Leading/Lagging
Control	Continuous	Continuous	Discontinuous (cont. with TCR)	Continuous
Response Time	Slow	Fast, 0.5 to 2 cycles	Fast, 0.5 to 2 cycles	Very fast but depends on the control system and switching frequency
Harmonics	Very Good	Very high (large size filters are needed)	Good, filters are necessary with TCR	Good, but depends on switching pattern
Losses	Moderate	Good, but increase in lagging mode	Good, but increase in leading mode	Very good, but increase with switching frequency
Phase Balancing Ability	Limited	Good	Limited	Very good with 1- ϕ units, limited with 3- ϕ units
Cost	High	Moderate	Moderate	Low to moderate

Tablo 1.1. VAR kompanzatorlerin karşılaştırması.

Yeni VAR kompanzatör teknolojileri şunlardır:

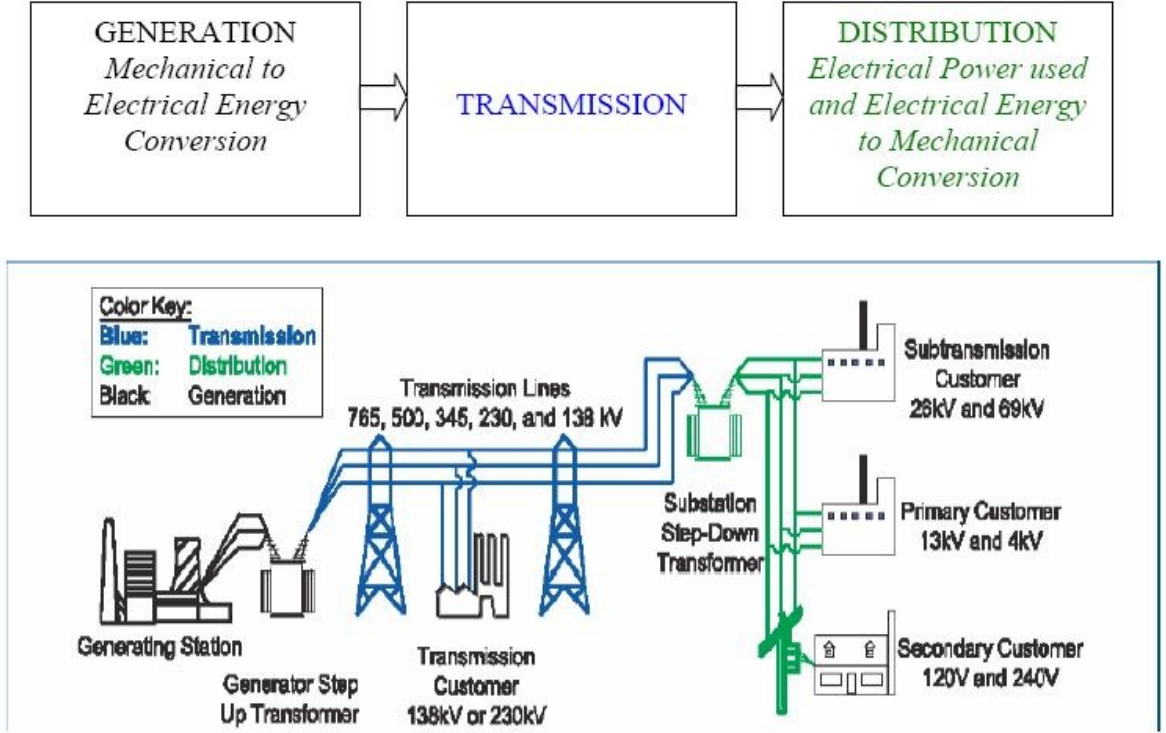
- Statik Senkron Kompanzatörler (STATCOM)
- Statik Senkron Seri Kompanzatörler (SSSC)
- Dinamik Voltaj Restorer (DVR)
- Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (UPFC)
- İnterline Güç Akış Kontrolörü (IPFC)

Bu tezde STATCOM, SSSC ve özellikle UPFC ele alınacaktır.

2. STATCOM' a GİRİŞ

Elektriksel güç sistemi, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi üç ana sınıfta toplanabilir:

- Üretim
- İletim
- Dağıtım



Şekil 2.1. Üretim, iletim ve dağıtım mekanizmalarının gösterimi[36].

İletim hatlarının sınırlılıkları şunlardır:

- Kalıcı durum güç transfer limiti
- Voltaj kararlılık limiti
- Dinamik voltaj limiti
- Geçici rejim kararlılık limiti
- Güç sistemi osilasyon sönüm limiti
- Termal limit
- Kısa devre akım limiti

Bu sınırlılıkların her birinin, bir veya daha fazla sistem problemleri vardır. Bu problemlerin çözümü sistem mühendisliği kapsamındadır. Geleneksel iletim tekniklerinin sınırlılıkları Tablo 2.1’de gösterilmektedir.

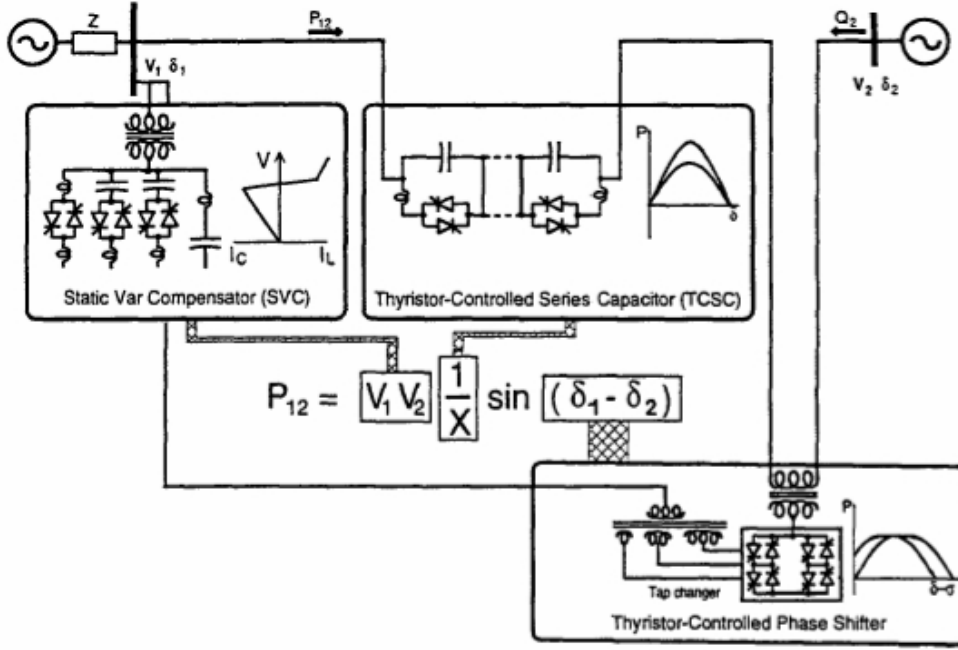
Conventional Transmission Enhancement Techniques	Impedance Control	Voltage Control	Angle Control	Power Control
Series Capacitor	♠			
Switched Shunt- Capacitor and Reactor		♠		
Transformer LTC		♠		
Phase Shifting Transformer			♠	
Synchronous Condenser		♠		
Special Stability Controls		♠		♠
Others	Can include reconstruction of conductors, raising conductors, dynamic line monitoring, adding new lines, etc			

Tablo 2.1. Güç sistemi performansı için geleneksel teknikler[36].

Bu geleneksel teknikler, maliyetine bakılacak olursa daha az optimal ve karlı olmaya eğilimlidir. Hem operasyonel güvenilirlik hem de finansal kazancı başarmak için daha etkili ekipmanlar ve kontrol sisteminin gerekliliği aşıkardır. Bu gereksinimlere çözüm öneri olarak, Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) ileri sürülebilir[36,37].

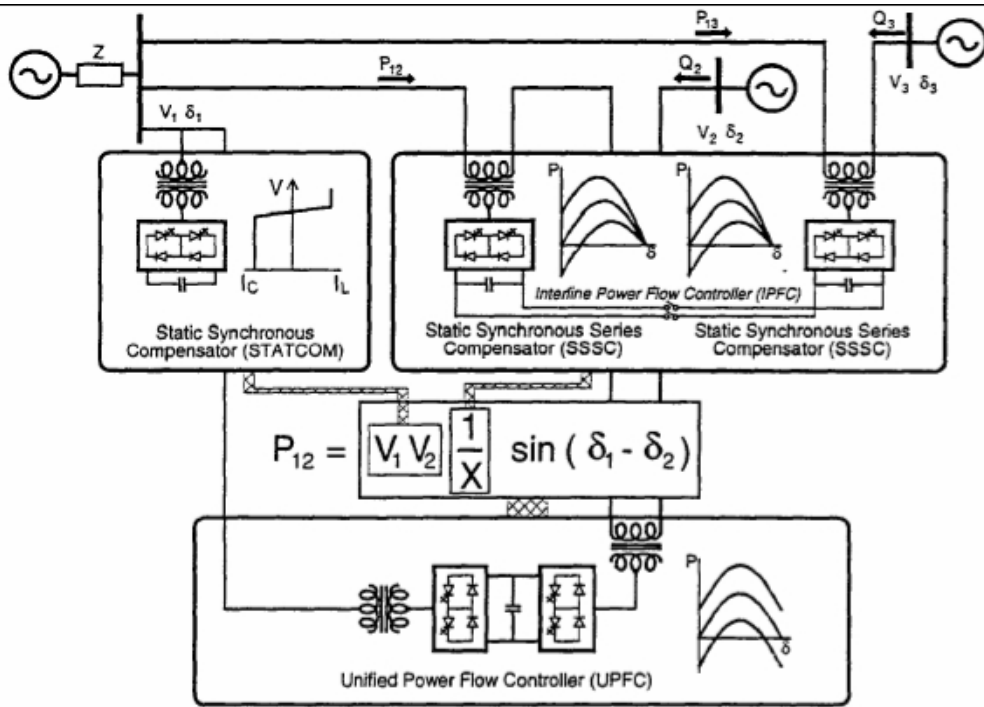
FACTS elemanları, güç elektroniği tabanlı elemanlardır ki bunlar voltajın, empedansın ve fazın dinamik kontrolünde kullanılırlar. İki tip FACTS kontrolör vardır. Bunlar; Tristör tabanlı kontrolörler ve konverter tabanlı kontrolörler. Tristör tabanlı FACTS kontrolörler (Statik Var Kompanzator veya SVC, Tristör Kontrollü Seri Kapasitör veya TCSC ve Tristör Kontrollü Faz Açısı Regülatörü veya TCPAR elemanlarını içerir) şu parametreleri kontrol eder: voltaj (SVC), iletim empedansı (TCSC) ve iletim açısı (TCPAR). Bu gruptaki en önemli iki eleman olan SVC ve TCSC’nin ortak karakteristikleri şunlardır: kompanzasyon için gerekli olan reaktif güç; geleneksel kapasitör ve reaktör bankaları tarafından üretilir veya emilir ve tristör anahtarları, bu bankaların birleşik reaktif empedansını kontrol için kullanılır.

Tristör tabanlı kontrolörler aşağıdaki diyagramda gösterilmiştir:



Şekil 2.2. Tristör tabanlı kontrolörler [38].

Konverter tabanlı FACTS kontrolörler kendiliğinden komuta edilmiş gibi çalışırlar. Konverter tabanlı FACTS kontrolörler aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Konverter tabanlı kontrolörler[38].

FACTS elemanları: shunt ve series olarak sınıflandırılabilir(Tablo 2.2).

FACTS DEVICES	
<i>SHUNT CONNECTED</i>	<i>SERIES CONNECTED</i>
Static VAR Compensator (SVC)	Thyristor Switched Series Reactor (TSSR)
Static Synchronous Compensator (STATCOM)	Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer (TCPST)
Static Synchronous Generator (SSG)	Static Synchronous Series Compensator (SSSC)
Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)	Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)
Static Var System (SVS)	Thyristor Controlled Series (TCS)
Static Var Generator or Absorber (SVG)	Thyristor Controlled Series Reactor (TCSR)
Static Var Compensator (SVC)	Thyristor Switched Series Capacitor (TSSC)
Static Condenser (STATCON)	
Thyristor Switched Reactor (TSR)	<i>SERIES-SHUNT COMPENSATORS</i>
Thyristor Switched Capacitor (TSC)	Unified Power Flow Controller (UPFC)
Thyristor Controlled Reactor (TCR)	Interphase Power Flow Controller (IPFC)
Thyristor Controlled Braking Resistor (TCBR)	
Var Compensating System (VCS)	

Tablo 2.2. FACTS elemanlarının tipleri[39].

Principle	Devices	Scheme	Impact on System Performance		
			Load Flow	Stability	Voltage Quality
Variation of the Line Impedance: Series Compensation	FSC (Fixed Series Compensation)		●	●●●●	●
	TPSC (Thyristor Protected Series Compensation)		●	●●●●	●
	TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation)		●●	●●●●	●
Voltage Control: Shunt Compensation	SVC (Static Var Compensator)		○	●●	●●●●
	STATCOM (Static Synchronous Compensator)		○	●●	●●●●
Load-Flow Control	HVDC (B2B/GPFC, LDT)		●●●●	●●●●	●●
	UPFC (Unified Power Flow Controller)		●●●●	●●●●	●●●●

○ low or no
● small
●● medium
●●● strong

Tablo 2.3. Kontrolörlerin karşılaştırılması[40].

FACTS DEVICES	Impedance Control	Voltage Control	Angle Control	Power Control
Static Synchronous Compensator (STATCOM)		♣		
Static Var Compensator (SVC)		♣		
Unified Power Flow Controller (UPFC)	♣	♣	♣	♣
Convertible Series Compensator (CSC)	♣	♣	♣	♣
Inter-phase Power Flow Controller (IPFC)	♣	♣	♣	♣
Static Synchronous Series Controller (SSSC)	♣	♣	♣	♣
Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)	♣			

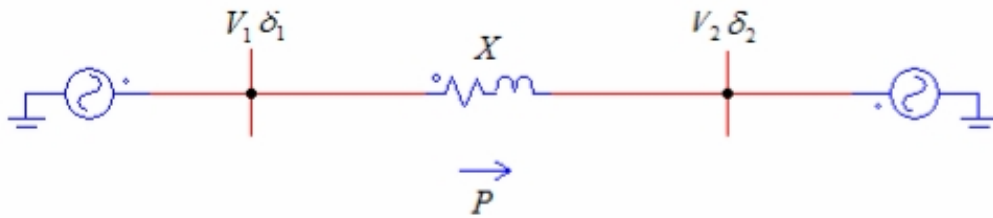
Tablo 2.4. FACTS elemanları ve işlevleri[36].

2.1. Statik Shunt Kompanzatorlarının Temel İşlem Prensipleri

Bir sistemin güç yük akışı aşağıdaki formülle gösterilir ve şematik sunumu Şekil 2.4' deki gibidir.

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (8)$$

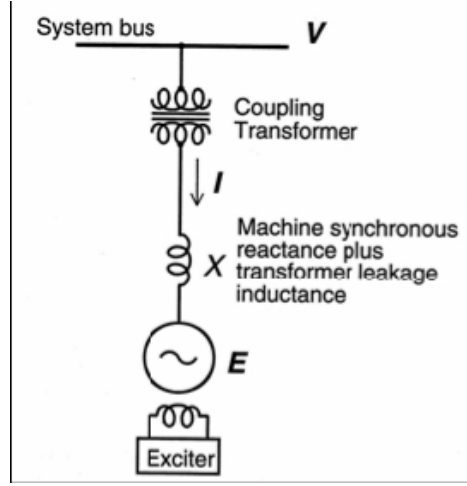
Burada V_1 ; δ_1 açısıyla birlikte gönderme sonu voltajı ve δ_2 açısıyla birlikte V_2 alma sonu voltajı ve X sistem empedansdır.



Şekil 2.4. Güç akış diyagramı[41].

Statik shunt kompanzatorlarının temel prensibi, reaktif gücü üretmektir. Üretim, voltaj kaynaklı bir konverter tarafından yapılır ki bu konverter, geleneksel bir senkron makine

ile benzerlik gösterir (Şekil 2.5). Voltaj kaynaklı bir konverter; bir kapasitörden dc voltajı sisteme enjekte edilmiş üç fazlı voltaja dönüştürür ki bu yönüyle senkron makinenin çalışmasına benzerdir.



Şekil 2.5. Senkron bir kompanzator tarafından reaktif güç üretimi[42].

Reaktif güç akışı için; senkron makinenin elektromotive forcesları (EMFs) e_a, e_b, e_c sistem voltajları v_a, v_b ve v_c ile aynı fazdadır. I reaktif akımı; V sistem voltajının genliği, E internal voltajı ve tüm devre reaktansını içeren bir denklemlerle bulunur:

$$I = \frac{V - E}{X} \quad (9)$$

Reaktif güç denklemi ise şöyledir:

$$Q = \frac{1 - \frac{E}{V}}{X} V^2 \quad (10)$$

Statik shunt kompanzasyonda , reaktif güç akışı; sistem voltaj genliğine (V) bağlı makinenin uyartımı (E) tarafından kontrol edilir. V 'ye karşın E 'nin artışı, ileri bir akımla sonuçlanır ki bu durumda, makine , kapasitör gibi görünür. E 'nin azalması, geri bir akım oluşturur ki bu durumda , makine, indüktör gibi görünür.

Shunt kompanzasyonun güç iletim yeteneğini artırması sırasında, sistemin güç iletimi dolaylı olarak voltaj kontrolü tarafından etkilenir[38,43].

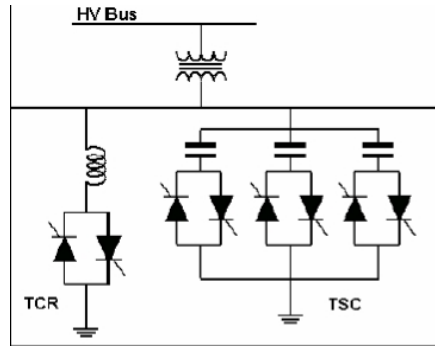
Temel kompanzasyon sürecinin gereksinimleri 2 gruba ayrılabilir[44]:

1. Direkt voltaj desteği(voltaj kararsızlıklarını önlemek için)
2. Geçici rejim ve dinamik kararlılık gelişmeleri (güç osilasyon sönümünü sağlamak ve ilk swing kararlılığının aralığını artırmak için)

STATCOM , SVCs'lerden geliştirilmiştir. Dolayısıyla SVCs'lerin açıklanmasında yarar vardır. SVC, çoğu eleman için koruyucu bir şemsiye gibidir. SVC'nin karakteristikleri şöyle tanımlanabilir:

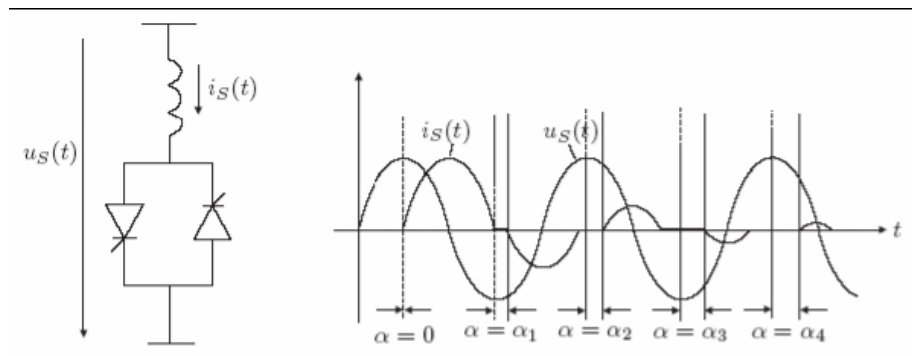
- Normal indüktif ve kapasitif eleman tabanlıdır.
- Makine tabanlı değildir.
- Kontrol fonksiyonu, güç elektroniği tabanlıdır.

Bir SVC , kapasitör ve reaktörlerin bir kombinasyonunu içerir ki Tristör Anahtarlamalı Kapasitörler (TSC) ve Tristör Kontrollü Reaktörler (TCR) elektriksel sisteme paralel bağlanmıştır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Statik Var Kompanzator (SVC)[45].

Şekil 2.7' deki devre, tek fazlı bir TCR'yi göstermektedir. Ateşleme gecikme açısı kontrolü metoduyla reaktördeki akım, maksimumdan sıfıra kadar kontrol edilebilir.

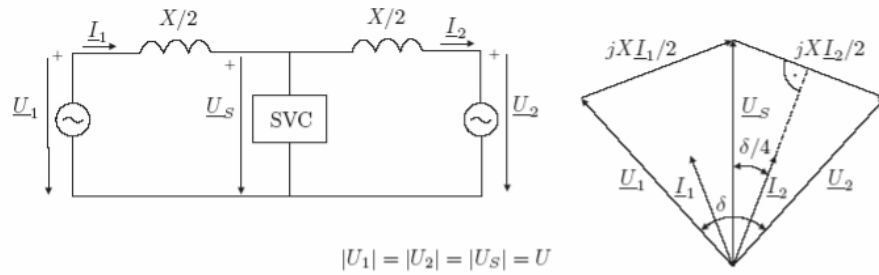


Şekil 2.7. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)[45].

Akım kondüksiyon aralıklarının devam süresi, her yarım saykılıda uygulanmış voltajın tepe değerine bakılarak tristör valfının sonuyla gecikmesi sayesinde kontrol edilebilir.

$\alpha = 0^\circ$ için genlik maksimumdur ve $\alpha = 90^\circ$ için genlik sıfırdır ve her yarım saykılıda hiçbir akım akmaz. Buna benzer olarak, aynı etki, değişken değerli bir indüktansla sağlanabilir. Tristör Anahtarlamalı Reaktör (TSR), TCR ile aynı ekipmanlara sahiptir, farkı ise full kondüksiyon veya kondüksiyonsuz açılarda kullanılır. $i_s(t)$ reaktif akımı, uygulanmış voltaja orantılıdır. Bazı TSR'ler, reaktif admitans sağlayabilir.

Şayet hattın başından sonuna kadar voltaj kararlılığını sağlamada TSR veya TCR hattın ortasına yerleştirilirse, maksimum iletilebilen güç iki katına çıkar. Bu durum Şekil 2.8' de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. SVC'li iki makineli sistem (ortada)[46].

Hat sonu voltajları ve ortadaki voltajların hepsinin aynı genliğe(U) sahip olduğu varsayılacaktır. U_2 'nin fazör açısı sıfıra ayarlanır ve bu nedenle diğer fazör miktarları için referans değer olarak kullanılır.

$$\underline{U}_2 = U, \underline{U}_1 = Ue^{j\delta}, \underline{U}_S = Ue^{j\delta/2} \quad (11)$$

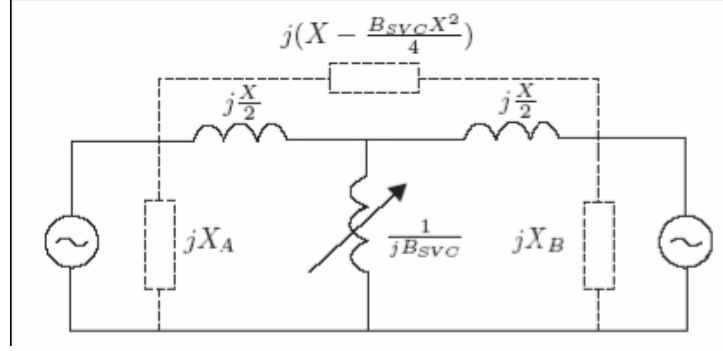
Matematiksel işlemlerle, I_2 şöyle hesaplanabilir:

$$\underline{I}_2 = 4U / X \sin(\delta / 4).e^{j\delta/4} \quad (12)$$

İletilmiş güç şöyle bulunur:

$$P = 2U^2 / X \sin(\delta / 2) \quad (13)$$

Bu denklemlerden de görüleceği üzere, SVC ile güç iki katına çıktı ve SVC'siz maksimum iletilen güç $U^2 / X \sin \delta$ dir. Bu açıklamalar sadece $|U_S| = U$ olduğunda geçerlidir. İletim açısı ne kadar büyürse o derece yüksek akım sağlanır. Bir önceki iletim açısı eşdeğer devresi yıldızdan delta transformuna dönüştürülür (Şekil 2.9).

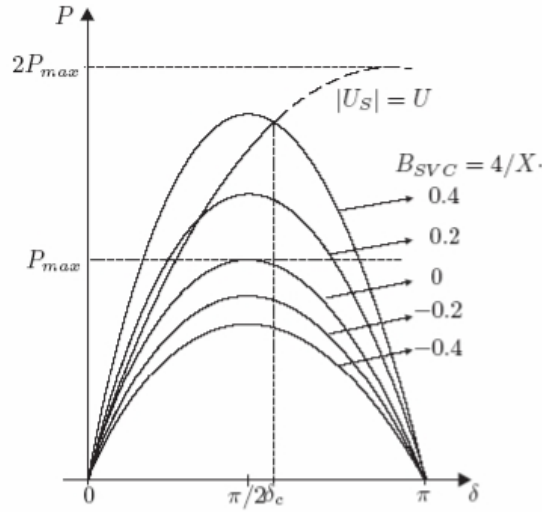


Şekil 2.9. İki makineli sistemin eşdeğer ağı[46].

U_1 ve U_2 sabit alındığından beri, X_A ve X_B empedansları güç iletimini etkilemez. Bu nedenle iletilmiş güç şöyle olur:

$$P = P_1 = P_2 = (U_1 U_2) / [X - (X^2 B_{SVC} / 4)] \quad (14)$$

Bu sonuçlardan Şekil 2.10'daki iletilmiş güce karşılık iletim açısı karakteristikleri elde edilir:



Şekil 2.10. Bir SVC'de iletilmiş güce karşılık iletim açısı karakteristikleri[46].

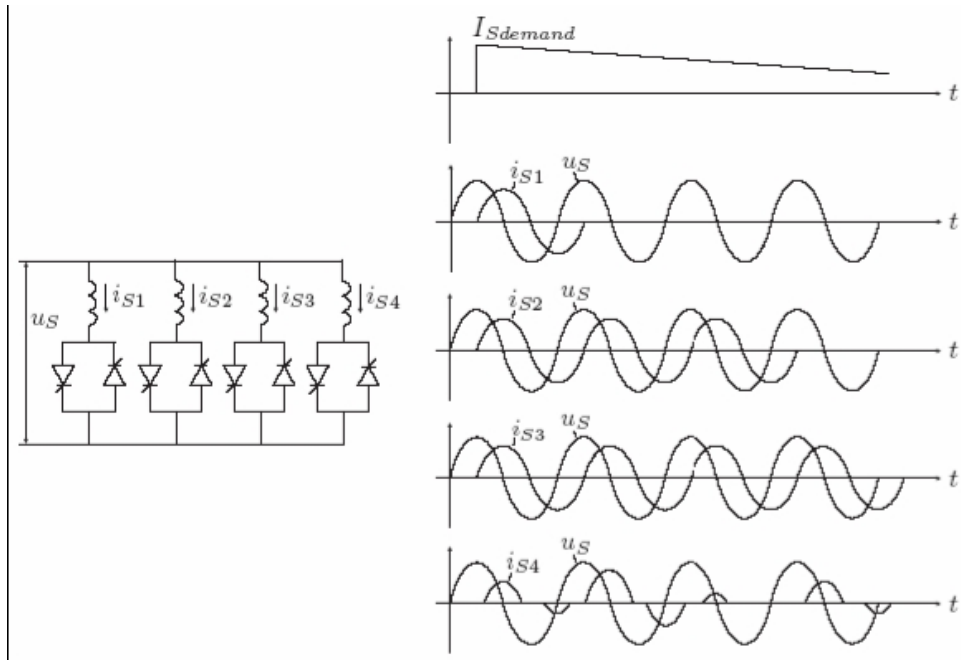
SVC ne kadar uzun süre aynı voltajı, hat sonu voltajları gibi sağlarsa, karakteristik $|U_s| = U$ kadar noktadan yukarıyı takip eder, ki bu hat B_{SVC} maksimum hattını geçer.

Daha önce de görüldüğü gibi, Şekil 2.7'den, ateşleme açısı kontrol şeması, nonsinüsoidal reaktör akım dalga formuyla sonuçlanır. Sonuçta, beklenen temel akımla birlikte, harmonikler oluşur. Böylece şayet pozitif ve negatif saykılar benzerse, aşağıda ki genliklerle tek sayılı harmonikler oluşturulur:

$$I_{Sn}(\alpha) = \frac{U}{\omega L \pi} \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{\sin \alpha \cos(n\alpha) - n \cos \alpha \sin(n\alpha)}{n(n^2 - 1)} \right\} \quad (15)$$

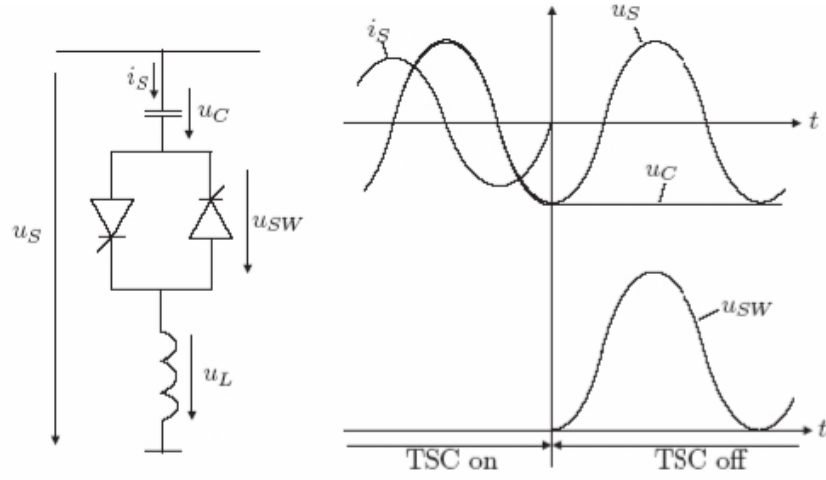
burada $n=2k+1$ ve $k=1,2,3,\dots$

m paralel bağlantılı TCR'ler bir metotla çalışır, her biri için $1/m$ kadar toplam oranlama gereklidir (Şekil 2.11). Reaktörler sırasıyla kontrol edilir, m adet reaktörden sadece biri gecikme açısı kontrollüdür, kalan $m-1$ adet reaktörün her biri tamamen açık veya tamamen kapalıdır. Sonuçta, her harmoniğin genliği maksimum temel akıma bakılarak m faktörüyle azaltılır.



Şekil 2.11. Harmonik azalmayı sağlamak için 4 TCR bankasını kontrol etme metodu[46].

TSC, TSR ve TCR'den farklıdır şöyle ki onun kolu, akım geçerken sıfıra anahtarlanabilir (Şekil 2.12).



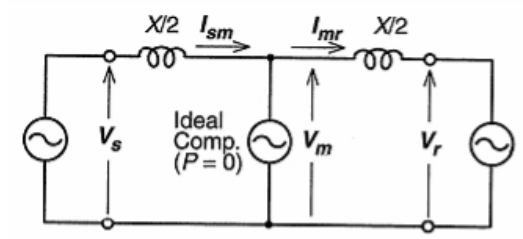
Şekil 2.12. Tristör Anahtarlamalı Kapasitör[46].

Sıfır geçme zamanında, kapasitör değeri tepeye ulaşır. Bağlantısı kopmuş kapasitör, tepe değerinde şarj edilir ve tristör karşısındaki voltaj ac voltajla aynı fazda değişir.

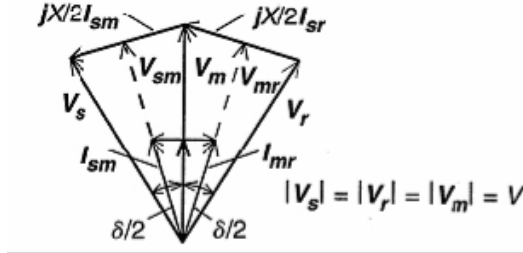
Normalde, kapasitör karşısındaki voltaj tristör anahtarlaması yokken sabit değildir, ama o bağlantı koptuktan sonra deşarj edilebilir. Kapasitörün yeniden bağlanması bir anlıktır ki bu anda ac voltaj ve kondüktör karşısındaki voltaj eşittir. Bu yeniden bağlanma bütün geçici rejimi ortadan kaldırmaz. Reaktörsüz , bu geçici rejimler kapasitörde ani bir akımla sonuçlanacaktır. Ateşleme gecikme açısı kontrolü, yukarıdaki ayrıntılı analizinden kapasitörlere uygulanmaz. Kapasitör anahtarlaması spesifik bir anda, minimum geçici rejim koşullarındaki her saykılta meydana gelmektedir. Bu nedenle, TSC tek bir kapasitif admitans elemanıdır, ki bu eleman ac sistemle bağlantılı veya bağlantısız olabilmektedir. Kapasitör boyunca akım, uygulanan voltajla değişir.

Shunt kompanzasyon, sistemin kararlılığında olduğu kadar kalıcı durum iletim kararlılıklarını geliştirmede de gereklidir. Voltaj kararsızlığını önlemek için, geçici rejim kararlılığını ve güç osilasyonlarını söndürmeyi artırmada dinamik voltaj kontrol için olduğu gibi, VAR kompanzasyon iletim hattının sonu ve orta noktasında voltaj regülasyonu için de kullanılabilir.

Şekil 2.13 ve 2.14 bir hattın ortasında shunt yerleştirilmiş ve bu nedenle hattı iki bölüme bölerek kontrollü bu noktada voltajı kontrol edebilir şöyle ki hat sonu voltajları ile aynı değerlere sahiptir.



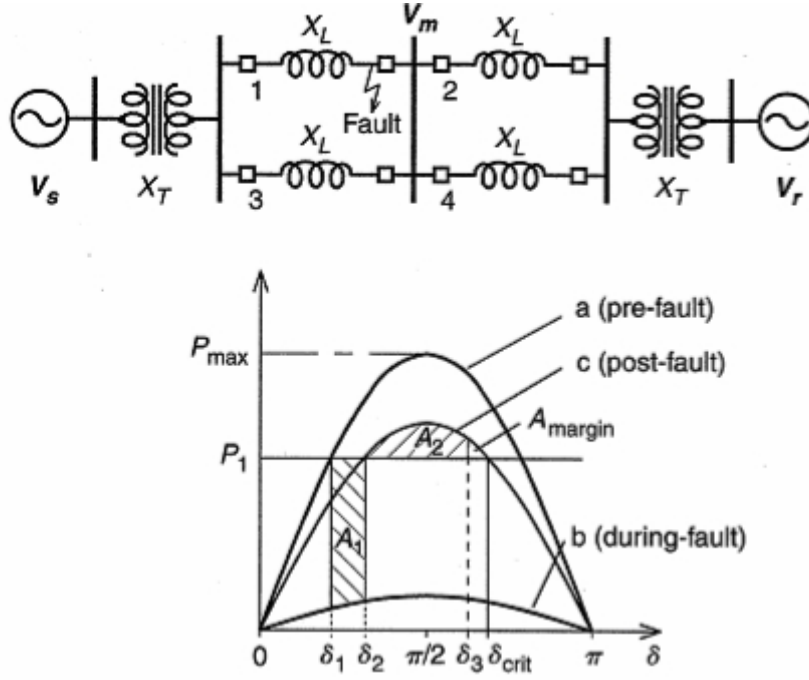
Şekil 2.13. Bir güç sisteminde ideal shunt kompanzator yerleşimi[42].



Şekil 2.14. Fazör diyagram[42].

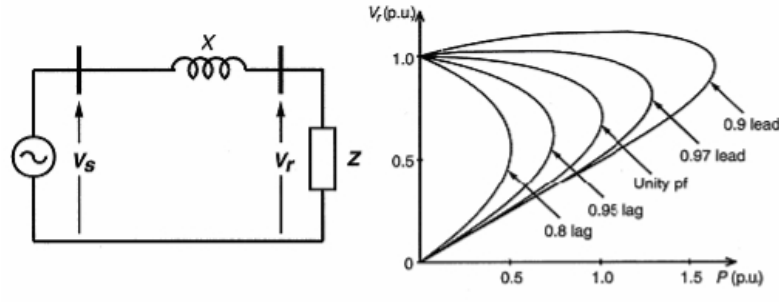
Bu, maksimal güç iletiminin artışı gibi bir avantaja sahiptir. Şayet shunt kompanzator, yüke paralel bir hattın en sonunda yerleştirilirse, bu sondaki voltajı regüle etmekte mümkündür ve bu nedenle voltaj kararsızlığını önlemek üretim veya yük değişikliklerine neden olabilmektedir. Shunt kompanzasyonun sistemdeki güç akışını değiştirildiğinde, dinamik bozucu etkiler boyunca uygulanmış shunt kompanzasyonun değeri değiştirilerek, geçici rejim kararlılık limiti artırılabilir ve etkin güç osilasyon sönümü sağlanabilir. Reaktif shunt kompanzasyon, sıkça, verilen baranın voltajını regüle etme gibi pratik uygulamalarda kullanılır.

Bir iletim sisteminde güç osilasyon sönümünü sağlamak ve geçici rejim kararlılık limitini artırmak için, dinamik bozucu etkiler boyunca sistemde güç akışını değiştirmede shunt kompanzasyon kullanılır. “Equal Area Kriteri” kullanarak geçici rejim kararlılık gelişimi ele alınabilir. Bu kriterde iki hata tipi vardır: pre-fault ve post-fault. Bir güç sisteminin geçici rejim yeteneğini analiz ederken post-fault ele alınacaktır.

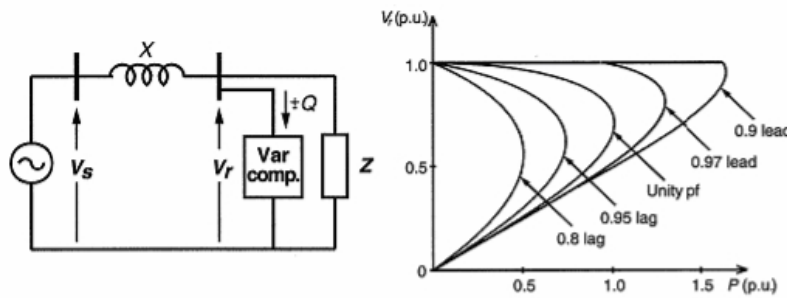


Şekil 2.15. Geçici rejim kararlılığında Equal Area Kriteri[42].

Uygun shunt kompanzasyon efektif voltaj desteği sağlar, böylece bu da post-fault sistemin iletim kapasitesini artırır ve böylece geçici rejim kararlılığı geliştirilir (Şekil 2.16 ve 2.17).

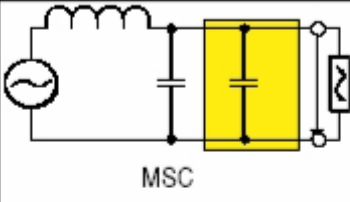
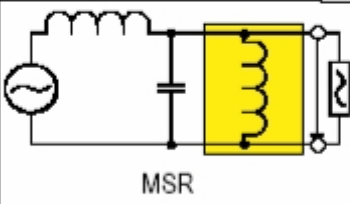
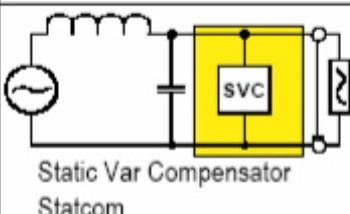


Şekil 2.16. Voltaj kararlılık limitlerinin değişimi[42].



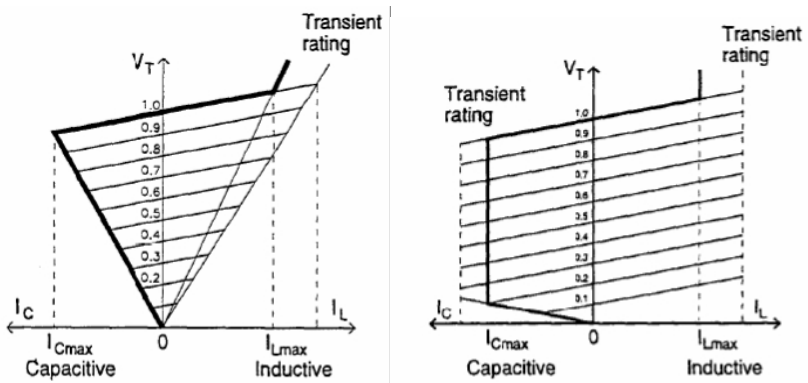
Şekil 2.17. Reaktif shunt kompanzasyonla voltaj kararlılık limitine ilavesi[42].

Tablo 2.5'te farklı shunt kompanzator tiplerinin uygulamaları gösterilmiştir.

Shunt compensation	Application	Short -circuit level	Transmission phase angle
 MSC	voltage stabilisation at heavy load	nearly unchanged	slightly increased
 MSR	voltage stabilisation at light load	nearly unchanged	slightly decreased
 Static Var Compensator Statcom	fast voltage control reactive power control damping of power swings	nearly unchanged	controlled

Tablo 2.5. Birkaç shunt kompanzator elemanının uygulaması[37].

Voltaj ve reaktif güç kontrolü için SVC ve STATCOM diğer statik kompanzatorlerden daha hızlıdır. Bu iki eleman arasındaki karşılaştırma Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. SVC(solda) ve STATCOM(sağda)'un V/I karakteristikleri[38].

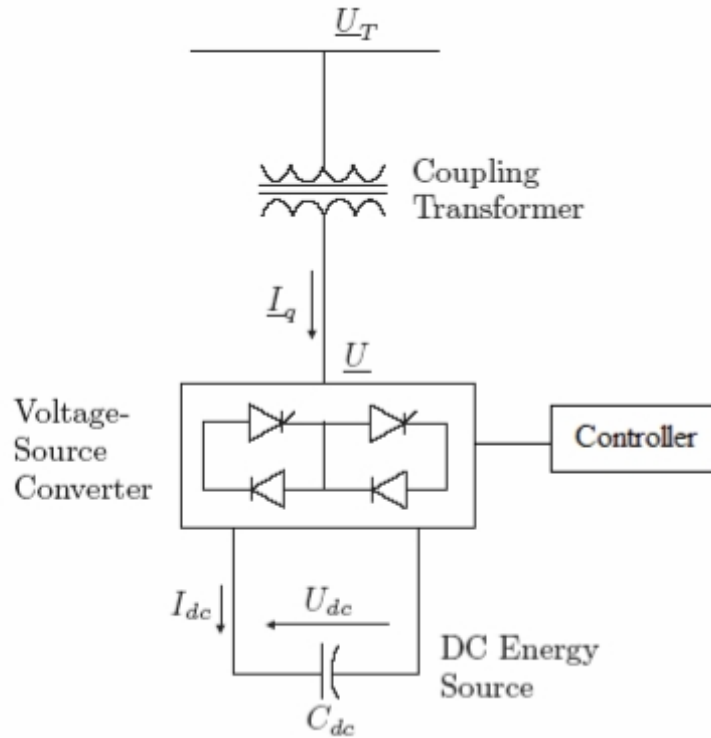
Şekil 2.18'i incelediğimizde, STATCOM'un hem kapasitif hem de indüktif kompanzasyonu sağlayabildiği ve ac sistem voltajının bağımsız maksimum kapasitif veya indüktif aralığında çıkış akımını kontrol edebildiği görülmektedir. Şöyle ki,

STATCOM, her sistem voltajında full kapasitif çıkış akımı sağlayabilmektedir, SVC ise, maksimum eşdeğer kapasitif admitansla tanımlanan sistem voltajını azaltarak çıkış akımını destekleyebilir. Ayrıca STATCOM, hem indüktif hem de kapasitif işlem bölgelerinde geçici rejim aralığını artırmaktadır, buna karşın SVC, geçici rejimle ilgili bir fonksiyonu yoktur. Düşük sistem voltajında full kapasitif çıkış akımı sağlamada STATCOM, SVC'ye göre daha etkindir.

STATCOM, SVC'nin bir katı hal tabanlı güç konverter versiyonudur. Paralel bağlı bir SVC gibi işlem görmesiyle birlikte, onun kapasitif veya indüktif çıkış akımları, terminalinin AC bara voltajından bağımsız olarak kontrol edilebilir. Güç konverterlerinin hızlı anahtarlama karakteristiği nedeniyle, STATCOM, SVC'ye nazaran daha hızlı cevap üretir. Buna ek olarak, sistem voltajındaki hızlı bir değişme durumunda, kapasitör voltajı hemen değişmez; buna karşın STATCOM etkili bir şekilde istenen cevabı üretir. STATCOM, güç sistemindeki bozucu etkilere karşı dayanıklıdır ve etkindir.

2.2. STATCOM'un Yapısı

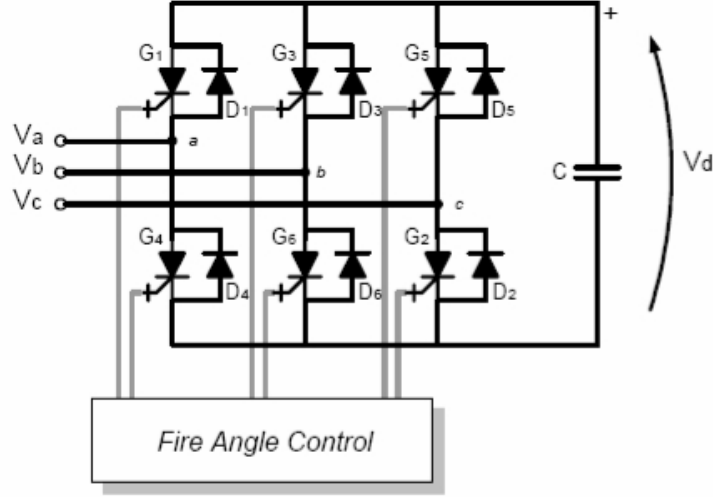
STATCOM üç ana parçadan oluşur (Şekil 2.19): bir voltaj kaynaklı konverter (VSC), bir kuplaj transformörü ve bir kontrolör.



Şekil 2.19. STATCOM yapısı[39].

2.3. Voltaj Kaynaklı Konverterler(VSC)

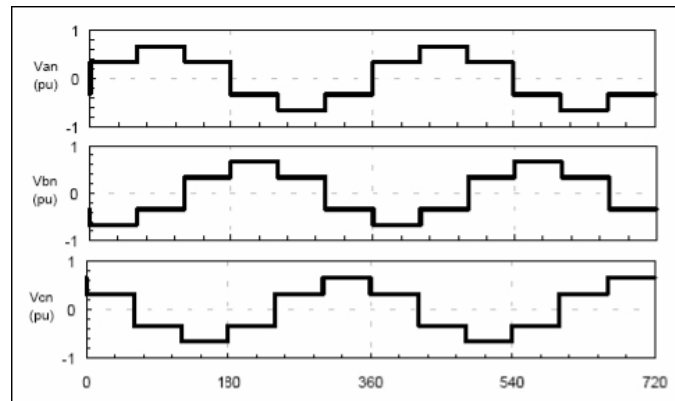
Bir voltaj kaynaklı konverter, hem shunt hem de seri kompanzatörlerde kullanılabilir. Bu konverter; bir DC kapasitörün DC voltajını, GTO anahtarlamaları üzerinden üç fazlı bir AC voltaja dönüştürür. AC voltajın genliği, anahtarların ateşleme açıları tarafından kontrol edilebilir. Şekil 2.20’de bir 6 palsli konverter gösterilmiştir.



Şekil 2.20. 6 palsli voltaj kaynaklı konverter[47].

6 subap, her biri bir diyotla paralel bağlı GTO içerir, bu konverteri oluşturmaktadır. DC tarafta, konverter bir voltaj kaynağına bağlıdır. Konverter , AC gride bir kuplaj transformatörü boyunca bağlıdır.

Konverter, Şekil 2.21’de gösterilen üç voltaj kümesini oluşturur.



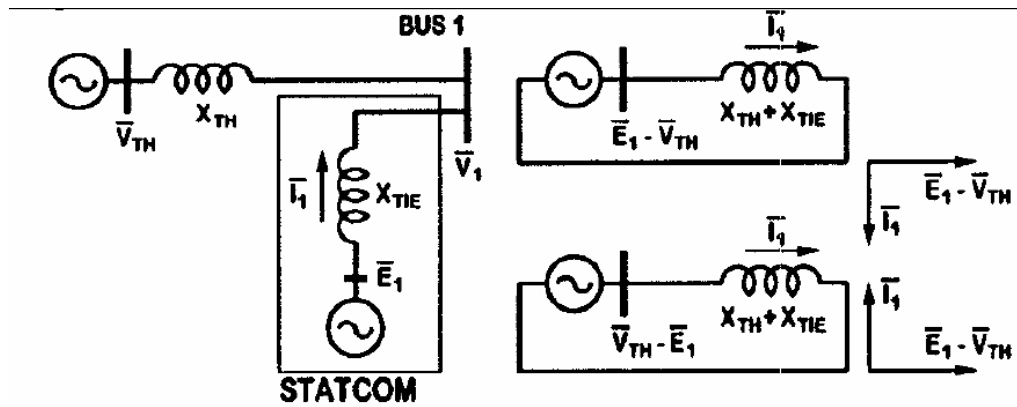
Şekil 2.21. 6 Palsli konverter dalga formları[47].

Bu voltajlar, $(6k \pm 1)f$ frekanslarında harmonik elemanlara sahiptir ki burada f , temel sistem frekansıdır ve $k(=1,2,3\dots)$ dir.

2.4. STATCOM'un Kontrolü

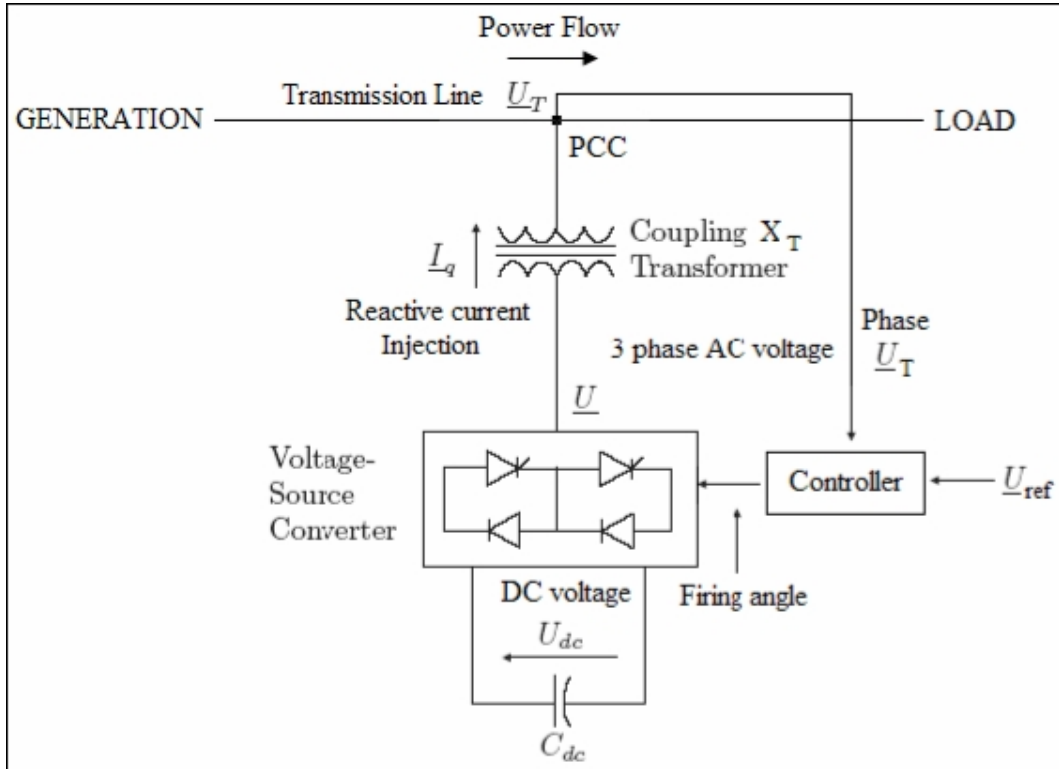
Bir STATCOM kontrolöründe, konverter voltajı ve iletim hattı voltajı arasındaki faz açısı dinamik olarak düzenlenmiştir ve böylece STATCOM kuplajlama bağlantı noktasında gerekli olan VAR'ı üretir veya emer. Şekil 2.22, STATCOM'un basitleştirilmiş bir diyagramını göstermektedir.

STATCOM'un iki işlem modu vardır: indüktif mod ve kapasitif mod. Şekil 2.22'deki fazör diyagramlara bakacak olursak; \bar{I}_1 , STATCOM'un reaktif akım komponenti, 90° tarafından $(\bar{E}_1 - \bar{V}_{TH})$ iletir, bu durum indüktif moddur ve 90° tarafından geriletirse, bu durum kapasitif moddur.



Şekil 2.22. STATCOM'da indüktif ve kapasitif mod[48].

STATCOM, bir kontrol edilebilir reaktif güç kaynağıdır. Öyle ki, büyük external reaktörler ve kapasitör bankalarına gerek duymadan ortak kuplajlama noktasında reaktif gücü emerek veya üreterek voltaj desteğini sağlar. Şekil 2.23'de STATCOM operasyonu gösterilmiştir.



Şekil 2.23. Bir güç sisteminde STATCOM operasyonu[42].

Şarj olmuş C_{dc} kapasitörü, konvertere U_{dc} DC voltajını sağlar ki bu AC sistemle birlikte senkron olan U kontrol edilebilir üç faz çıkış voltajınının bir kümesini oluşturur. İletim hattı voltajıyla birlikte olan üç faz çıkış voltajının senkronizasyonu harici bir kontrolör tarafından yapılmaktadır. STATCOM karşısındaki beklenen voltajın miktarı, ki U_{ref} referans voltajı, kontrolöre manuel bir yolla hazırlanmıştır. Konverter ve AC sistem arasındaki reaktif güç değişimi de kontrol edilebilir. Bu reaktif güç değişimi, STATCOM tarafından enjekte edilmiş reaktif akımdır ki bu AC sistemden reel gücün emilmesiyle üretilmiş kapasitörden elde edilen akımdır.

Reaktif akım, şöyle gösterilebilir:

$$\underline{I}_q = \frac{\underline{U}_T - \underline{U}_{eq}}{X_{eq}} \quad (16)$$

burada \underline{I}_q STATCOM tarafından enjekte edilmiş reaktif akımdır.

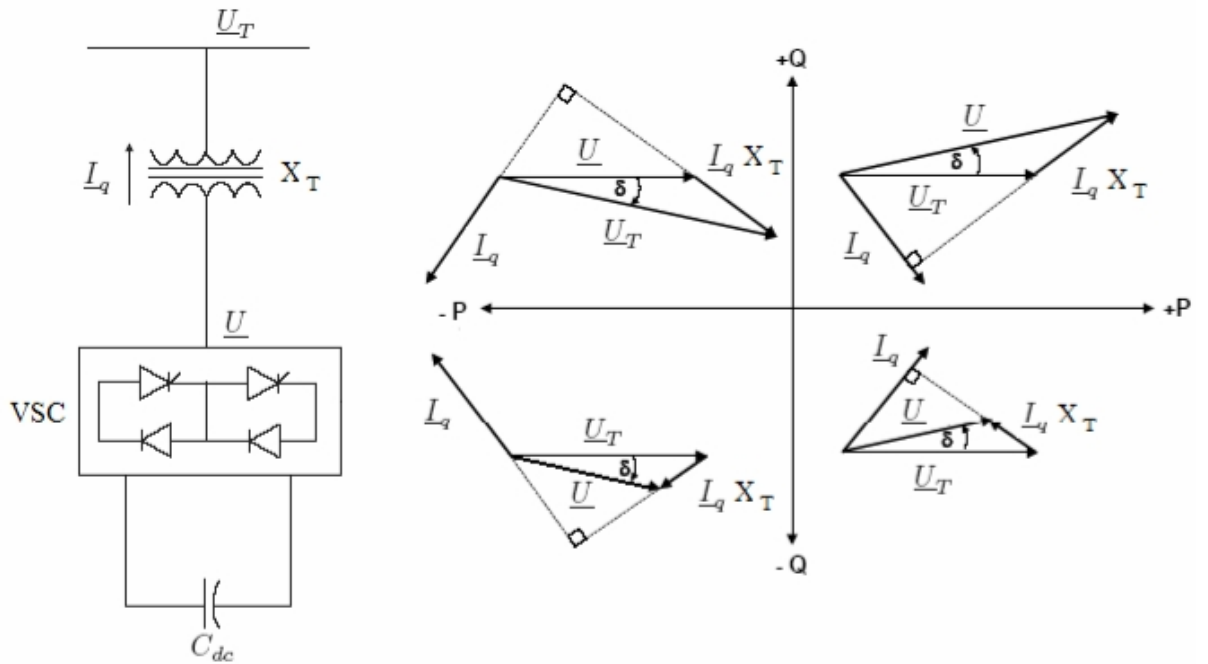
\underline{U}_T STATCOM terminal voltajıdır.

\underline{U}_{eq} STATCOM tarafından görülen eşdeğer Thevenin voltajıdır.

X_{eq} STATCOM tarafından görülen güç sisteminin eşdeğer Thevenin reaktansıdır.

Şayet \underline{U} çıkış voltajının genliği AC sistem voltajının, \underline{U}_T nin, üzerinde artarsa, bir ilerleyen akım oluşur, STATCOM, AC sistem tarafından bir kondüktör gibi görülür, reaktif güç üretilir. AC sistem voltajının altında bir değere düşerse bu çıkış voltajının genliği, gerileyen bir akım oluşur ve STATCOM bir indüktör gibi görülür. Bu durumda reaktif güç emilir. Şayet genlikler eşitse, hiçbir değişiklik olmaz.

Şekil 2.24'teki diyagramda terminaldeki voltajın fazör diyagramları, konverter çıkış akımı ve PQ düzleminin tüm dörtlü gösterimi verilmiştir.



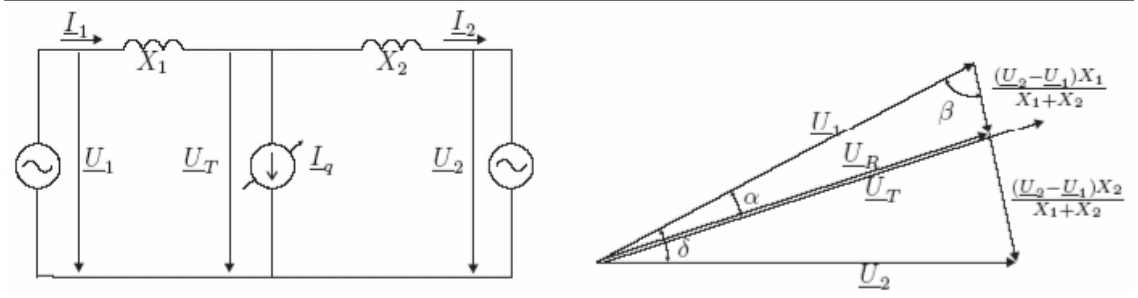
Şekil 2.24. STATCOM uygulamalarının fazör diyagramları[46].

Faz açısının mekanizması, δ açısı, \underline{U} çıkış voltajıyla referansla, \underline{U}_{dc} kapasitör voltajının artması veya azalmasıyla reaktif güç üretiminin veya emiliminin kontrolünde kullanılabilir. Kapasitörün yerine bir pil de DC enerji için kullanılabilirdi. Bu durumda, konverter AC sistemle birlikte olan hem aktif hem de reaktif güç değişiminin kontrolünü sağlar. Bu çok önemli bir özellik ki böylece güç osilasyon sönümü gerektiren uygulamalarda etkin bir kullanım sağlar.

Şekil 2.25'teki değişkenleri kullanarak ve Kirşof kurallarını kullanarak aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_T - \underline{U}_2}{jX_2} = \frac{(\underline{U}_1 - j\underline{I}_1 X_1) - \underline{U}_2}{jX_2} \quad (17)$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 - \underline{I}_q \quad (18)$$



Şekil 2.25. STATCOM ile iki makineli sistem[46].

Yukarıdaki denklemde eşitlemeler yapılarak, I_1 bulunabilir:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{j(X_1 + X_2)} + \underline{I}_q \frac{X_2}{(X_1 + X_2)} \quad (19)$$

Buradan, \underline{U}_T voltajı türetilir:

$$\underline{U}_T = \underline{U}_1 - j\underline{I}_1 X_1 = \underline{U}_1 - \frac{(\underline{U}_1 - \underline{U}_2)X_1}{(X_1 + X_2)} - j\underline{I}_q \cdot \frac{X_1 X_2}{(X_1 + X_2)} = \underline{U}_R - j\underline{I}_q \cdot \frac{X_1 X_2}{(X_1 + X_2)} \quad (20)$$

burada \underline{U}_R , STATCOM'un işlem dışı olduğu zamanlardaki ($I_q = 0$) STATCOM terminal voltajıdır.

$$\underline{I}_q = j\underline{I}_q \cdot \frac{\underline{U}_R}{U_R} \quad (21)$$

Denklem (20) tekrar yazılırsa:

$$\underline{U}_T = \underline{U}_R + \underline{I}_q \frac{\underline{U}_R}{U_R} \cdot \frac{X_1 X_2}{(X_1 + X_2)} = \underline{U}_R \left(1 + \frac{\underline{I}_q}{U_R} \cdot \frac{X_1 X_2}{(X_1 + X_2)}\right) \quad (22)$$

Şekil 2.25'teki diyagrama Sinüs kuralı uygulanarak aşağıdaki iki denklem oluşur:

$$\frac{\sin \beta}{U_2} = \frac{\sin \delta}{|\underline{U}_1 - \underline{U}_2|}$$

$$\frac{\sin \alpha}{|\underline{U}_1 - \underline{U}_2| \frac{X_1}{(X_1 + X_2)}} = \frac{\sin \beta}{U_R} \quad (23)$$

Buradan $\sin \alpha$ çekilir:

$$\sin \alpha = \frac{U_2 \sin \delta X_1}{U_R (X_1 + X_2)} \quad (24)$$

İletilen aktif güç formülü şöyle verilebilir:

$$P = P_1 = P_2 = \frac{U_T U_1}{X_1} \sin \alpha = \frac{U_1 U_2 \sin \delta}{(X_1 + X_2)} \cdot \frac{U_T}{U_R} \quad (25)$$

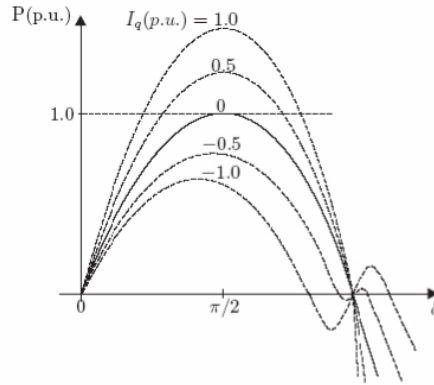
Şekil 2.25'teki diyagrama Cosinüs kuralı uygulanarak:

$$U_R = |\underline{U}_R| = \left| \frac{U_1 X_2 + U_2 X_1}{(X_1 + X_2)} \right| = \frac{\sqrt{U_1^2 X_2^2 + U_2^2 X_1^2 + 2U_1 U_2 X_1 X_2 \cos \delta}}{(X_1 + X_2)} \quad (26)$$

İletilen aktif güç sonuç formülü:

$$P = \frac{U_1 U_2 \sin \delta}{(X_1 + X_2)} \left(1 + \frac{I_q}{U_R} \cdot \frac{X_1 X_2}{(X_1 + X_2)} \right) \quad (27)$$

Şekil 2.26'da iletim açısına karşın iletilmiş gücün sonuç karakteristiği gösterilmiştir:



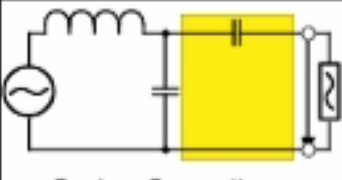
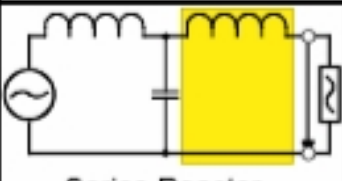
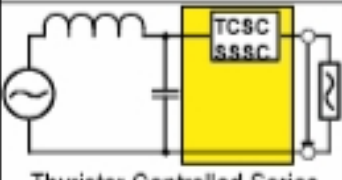
Şekil 2.26. STATCOM'un iletilmiş güce karşın iletim açısı karakteristiği[46].

3. STATİK SERİ KOMPANZASYONLAR

Statik seri kompanzatorlerinin ana işlevi, statik shunt kompanzatorlerinin eksikliklerini kompanse etmektir. Shunt kompanzatorler, iletilen gücün seri hat empedansı ve hattın son voltajları arasındaki açığa bağımlı olmasından dolayı gerçek iletilen gücü kontrol etmede yetersiz olmaktadır. Diğer yandan, seri kompanzatorler, sistem değişkenleri üzerinde dinamik kontrolü sağlamada shunt kompanzatorlerin dezavantajlarını elimine edebilmektedirler. Buna ek olarak, statik seri kompanzasyon, dinamik kompanzasyon konusunda da etkilidir:

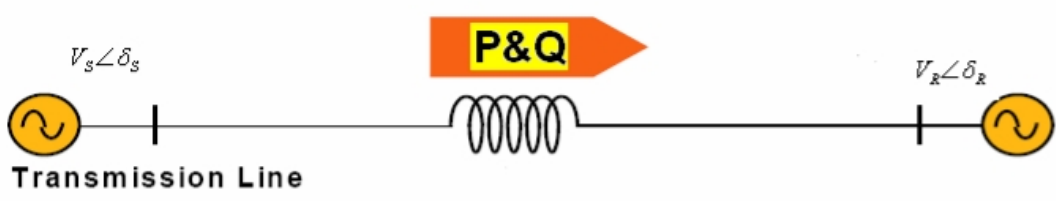
- Yüke bağımlı voltaj düşüşlerini azaltır (Voltaj kararlılığı).
- Sistem transfer empedansını azaltır.
- İletim açısını azaltır (Geçici rejim kararlılığını geliştirme).
- Yük akış kontrolünü sağlar.
- Aktif güç osilasyonlarının sönümünü sağlar.

Tablo 3.1 seri kompanzasyonların farklı uygulamalarını göstermektedir.

Series compensation	Application	Short-circuit level	Transmission phase angle
 Series Capacitor	long transmission lines bulk power transmission	increased	much smaller
 Series Reactor	short transmission lines, limitation of short-circuit currents	decreased	much larger
 Thyristor Controlled Series Compensation, SSSC	PFC POD SSR mitigation FCL	controlled	controlled

Tablo 3.1. Seri kompanzasyon uygulamaları[49].

Seri kompanzasyonun temellerini yeniden ele almak, maximal güç iletimi ve kalıcı durum güç iletimine nasıl elde edildiğini anlamak için gereklidir. Bu, voltaj kararlılığıyla ve güç osilasyon sönümüyle yakından ilişkilidir.



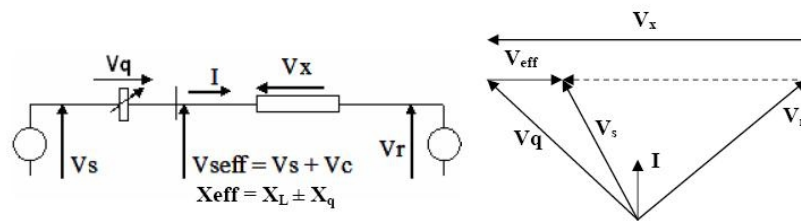
Şekil 3.1. İletim hattının tek hatlı diyagramı.

Şekil 3.1'de, V_S ve V_R , gönderme ve alma sonu voltajlarını gösterir. Bir iletim hattında reel ve reaktif güç akışının genel formülü şöyle türetilebilir:

$$\text{Reel güç,} \quad P = \frac{V_R * V_S}{X_L} * \sin(\delta_S - \delta_R) \quad (28)$$

$$\text{Reaktif güç,} \quad Q = \frac{V_R * V_S}{X_L} * [1 - \cos(\delta_S - \delta_R)] \quad (29)$$

Bu denklemlerden, iletim hatlarındaki reel ve reaktif güç akışı birkaç değişkenden etkilendiği görülür. Bunlar; sistem karşısındaki voltajlar, iletim hattı empedansı ve son voltajlar arasındaki faz farkı. Seri kompanzasyonları uygulayarak, X_L iletim hattı empedansı değişebilir şöyle ki, kullanılan kompanzasyonların miktarına bağlı olarak hat indüktif veya kapasitif olabilir. İndüktif kompanzasyon durumunda, X_q , kapasitif kompanzasyon için hat empedansını artıran pozitif bir değer gibi tanımlanır; X_q , hat empedansını azaltacak negatif bir değer gibi de tanımlanabilir. İletim hattındaki empedandaki değişimler, sistemde, reel güç akışını (P) artırıp azaltacağı gibi reaktif güç akışını(Q) da etkiler. Şekil 3.2, bir kapasitörle basit seri kompanzasyonları gösteren fazör diyagram ve tek hattın oluşmuş bir yapıyı göstermektedir.



Şekil 3.2. Seri kapasitör kompanzasyonu ve fazör diyagramı.

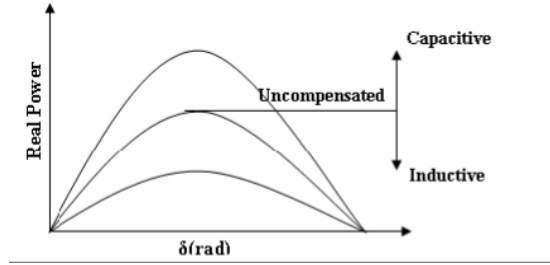
Şekil 3.2'yi referans alırsak, reel güç P ve reaktif güç Q, X_q reaktans değerini değiştirerek kolaylıkla kontrol edilebilir.

$$\text{Efektif hat empedansı:} \quad X_{eff} = X_L - X_q \quad (30)$$

$$\text{Reel güç,} \quad P = \frac{V_R * V_S}{X_{eff}} * \sin \delta \quad (31)$$

$$\text{Reaktif güç,} \quad Q = \frac{V_R * V_S}{X_{eff}} * [1 - \cos \delta] \quad (32)$$

Şekil 3.3'te güç-akış eğrisi, Denklem 31'den elde edilebilir. Reel güç sonucu, X_{eff} efektif hat empedansına ve δ gönderme ve alma sonu voltajları arasındaki faz farkına bağlıdır.

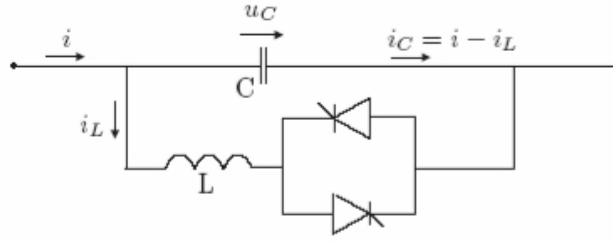


Şekil 3.3. Güç akışında seri kompanzasyonun etkisi[50].

Yukarıdaki diyagram, Denklem 31'deki karakteristikleri göstermektedir. X_q indüktif kompanzasyonu sağladığında, X_{eff} efektif hat empedansı artar ve hattaki reel güç azalır. Kapasitif modda, X_{eff} efektif hat empedansı artar ki bu da güç akışında reel güç artışında sonuçlanmıştır.

Geleneksel seri kompanzasyonundan farklı olarak, statik seri kompanzatörler, tristör anahtarlama/kontrollü kapasitörler veya tristör kontrollü reaktörlerin kullanımıyla çalışır. Değişken sanal reaktif admitans yaratma konjüktüründe iletim hattına seri yerleştirilmiş bir voltaj kaynağı gibi davranır. Genel olarak FACTS seri kompanzatörler, 2 farklı şema şeklinde sınıflandırılabilir: değişken empedans tipi seri kompanzatör ve anahtarlama/konverter tipi seri kompanzatörler. Değişken empedans tipi seri kompanzatörlerin hepsi tristör kontrollüdür, güç akış kontrolünde ve güç sisteminin kararlılığını geliştirmede çok etkindir. 3 tip seri kompanzatör vardır: Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC), Tristör Anahtarlama/konverter Tipi Seri Kapasitör (TSSC), GTO ve Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (GCSC). TCSC'nin yapısı; Tristör Kontrollü Reaktör

(TCR)'ün paralel bir kombinasyon ve değişik seri kapasitif reaktansını sağlayan fix bir kapasitörden oluşmaktadır. TCR, kapasitör voltajı ile ilgili olan 90^0 ve 180^0 arasındaki bir ateşleme açısıyla çift yönlü tristör valfine seri bir reaktör ile düzenlenmiştir. Bu şema, TCR tarafından efektif kompanzasyon kapasitansını parçalı iptal ederek devamlı değişen bir kapasitör sağlamaya yarar[51]. şekil 3.4'teki paralel LC devresi, TCSC'nin kalıcı durum empedansını tanımlar.



şekil 3.4. Tristör kontrollü seri kapasitör elemanının devresi[52].

Seri olan birkaç temel devreleri düzenleyerek, voltaj oranlarının miktarı gerektiğinde değiştirilebilir. Yapıdan, kalıcı durum temel empedansı şöyle karakterize edilebilir:

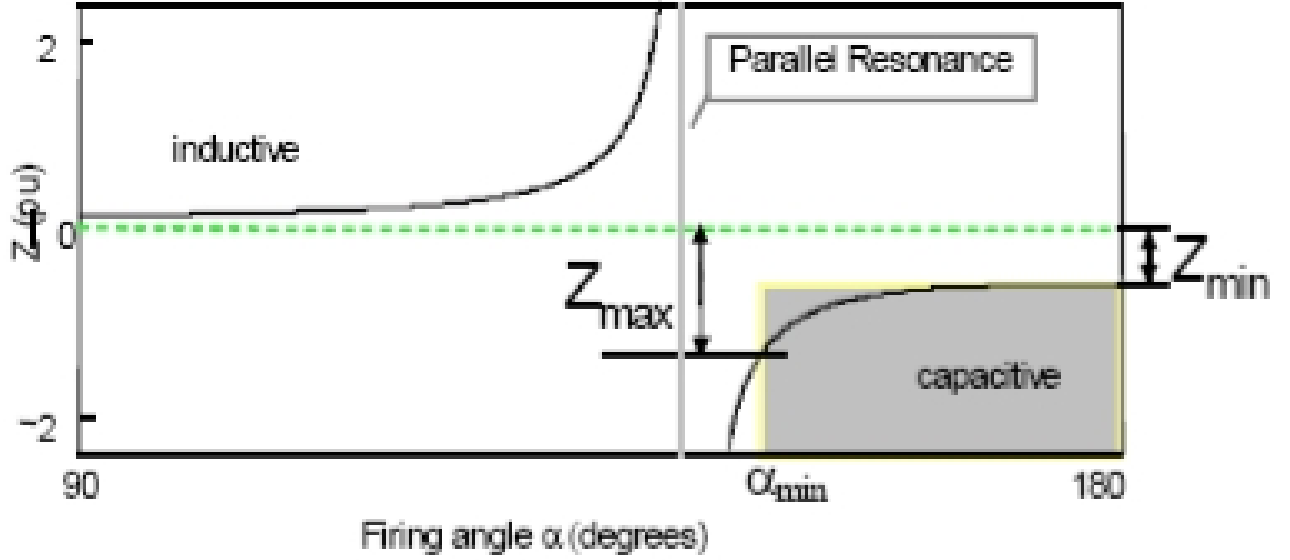
$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \quad (33)$$

X_C - Kapasitör reaktansı

$X_L(\alpha)$ - Değişken indüktif empedans

α -Ateşleme açısı

Denklem 33'ten, α ateşleme açısı şekil 3.5'teki TCSC işlem bölgesini tanımlamada değişebilir.



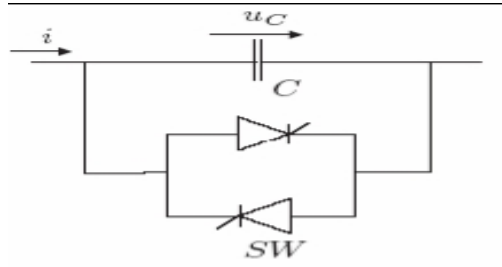
Şekil 3.5. Ateşleme açısı tarafından reaktansın değişimi[53].

TCSC , kapasitif kompanzasyonları sağlarken, Z_{min} ve Z_{max} operasyon bölgesinden önce TCSC'nin minimum ve maksimum değerleridir. Tristör çalışmadığında, kapasitif bölgede işlem gören TCSC'nin empedansı, tamamen kapasitif reaktanstır ve Z_{max} , paralel rezonans bölgenin yakınındaki potansiyel tehlike operasyonunu engellemede minimum α_{min} ateşleme açısı tarafından sınırlandırılır.

TCSC 4 modda işlem görür[52]:

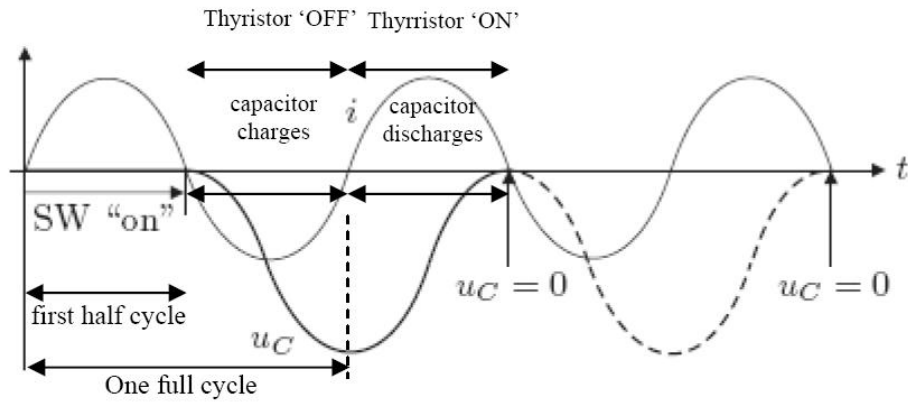
1. Bloklama modu-tristör valfı, kapasitör üzerinden geçen akımdan ve fix seri kompanzasyon gibi işlem görmesinden dolayı kapılanmamıştır.
2. Bypass modu- bu modda tristör sürekli başlatılır ve indüktör akımının full kondüsyonu için kapılanmıştır.
3. Kapasitif boost mod-sıfır voltajlı sıfır hat yanında işlem gören bir tristöre başlatılmış bir pulsi besleyerek, kapasitörün deşarj akım pulsi, kapasitör bankası boyunca hat akımına eklenerek paralel indüktör boyunca akacaktır. Daha büyük kapasitör zirvesi üreten hat akım voltajlı kapasitör voltajının toplamında sonuçlanmıştır.
4. İndüktif boost mod-bu operasyon modunda, kapasitör voltajı, talep edilen sinüsoidal dalga formundan daha eğri büğrüdür. Bunun nedeni, büyük tristör akımlarının varlığıdır. Bu yüzden bu mod, kalıcı durum işlemlerinde nadiren kullanılır.

Şekil 3.6' da tristör anahtarlamalı seri kapasitörden yapılmış temel komponent gösterilmiştir. Geçiş valfiyle kesinleşmesiyle paralel bağlı bir çift ile paralel olan bir kapasitörden oluşmaktadır.



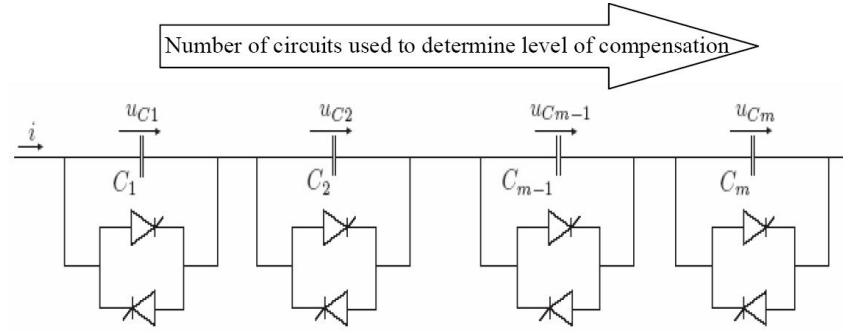
Şekil 3.6. Temel tristör anahtarlamalı seri kapasitör elemanın devresi[52].

TSSC işleminin özelliği, kompanzasyonu başlatacak kapasitörü tetikleyecek bir valf veya anahtar gibi davranması için bir tristörü kullanmaktır.



Şekil 3.7. Kapasitör voltajı ve hat akımının çizimi[52].

Şekil 3.7’de gösterildiği gibi, saykılın her ilk yarımında hat akımı dalga formunu sıfıra kesmesi gibi, tristör, kapasitör açık olunca kapanacaktır. Hat akım dalga formu sıfıra geldiğinde hat akım dalga formu bir full saykılı tamamladı, tristör açık olacak, kapasitör deşarj olmaya başlayacak ve hat akımının gelecek yarım saykılı tamamen deşarj olacak ve sonuçta kapasitör tekrar şarj olmaya başlayacak ve işlem tekrarlanacaktır. TSSC kullanımının avantajı; kullanılan devrelerin sayısı ile tanımlanan seri kapasitif reaktansın step kontrolünü sağlayabilmesidir. Diğer deyişle, kompanzasyonun seviyesi Şekil 3.6’daki temel devrelerin sayısı ile tanımlanır. Uzun anahtarlamalı gecikmeleri nedeniyle, modülasyonda etkisiz olabilmektedir. Bu nedenle TSSC, güç akış kontrolü ve güç osilasyon sönümü için kullanılır.



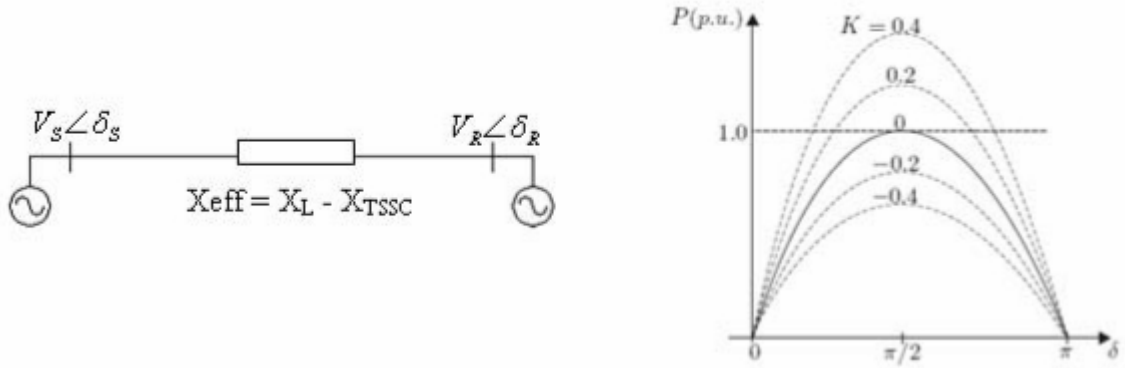
Şekil 3.8. Tristör anahtarlamalı seri kapasitör[52].

X_{TSSC} reaktansının derecesi, kullanılan TSSC devresinin sayısına bağlıdır. Hat reaktansına X_{TSSC} reaktansının oranı şöyle tanımlanabilir:

$$K = -\frac{X_{TSSC}}{X_L} \quad (34)$$

Şekil 3.9, tek bir iletim hattında TSSC'nin basitleştirilmiş bir düzenlemesidir. Güç akışında TSSC'nin anlamı aşağıdaki gibi karakterize edilebilir:

$$P = \frac{V_R * V_S}{X_L (1 - K)} * \sin \delta \quad (35)$$

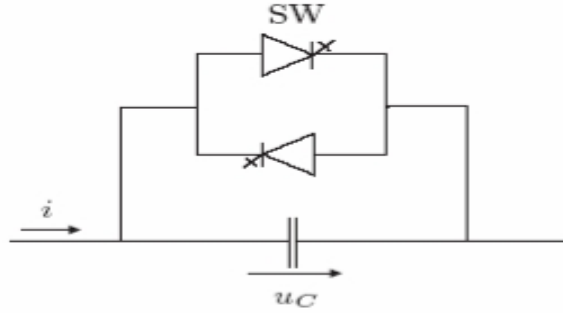


Şekil 3.9. TSSC'nin basit düzenlemesi ve güç akış diyagramı.

Mod 1: Kompanzasyon voltajının miktarı, $V_{C_{max}} = 4X_{TSSC} * I_{min}$ kompanzasyon voltajı üretmesi gibi kapasitör bankasının seçimiyle kontrol edilebilir. Bu nedenle, $I_{min} < I_{line} < I_{max}$ hat akımı arttığında, bağlanmış seri kapasitörlerin sayısı pas geçilebilir.

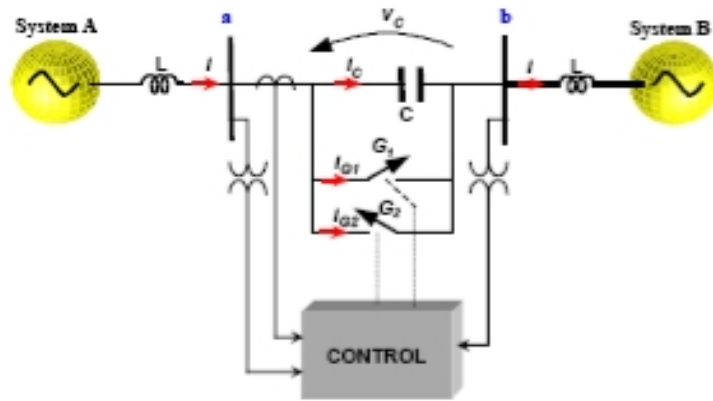
Mod 2: Kapasitif empedans her zaman maksimum seri kompanzasyon üretebilir[51].

Şekil 3.10'daki GCSC'nin yapısı, TSSC'ye benzerdir; tek farkı GTO tristör kullanmasıdır. TSSC'de kullanılan geleneksel tristörden farklı olarak, GTO tristör anahtar gibi davranır ki bu anahtar verilen her zamanda anahtarı kapama veya açma yeteneğine sahiptir. GCSC'nin temel fonksiyonu; verilen hat akımında V_c kapasitör karşısında AC voltajı kontrol eder, ki bu şekilde V_c kapasitör karşısındaki voltajı, GTO tristörü kapatıldığında sıfırlanır veya tam tersi GTO tristörü açılınca voltaj maksimum değerine ulaşır[51,52].



Şekil 3.10. Temel GTO tristör kontrollü seri kapasitör elemanın devresi[52].

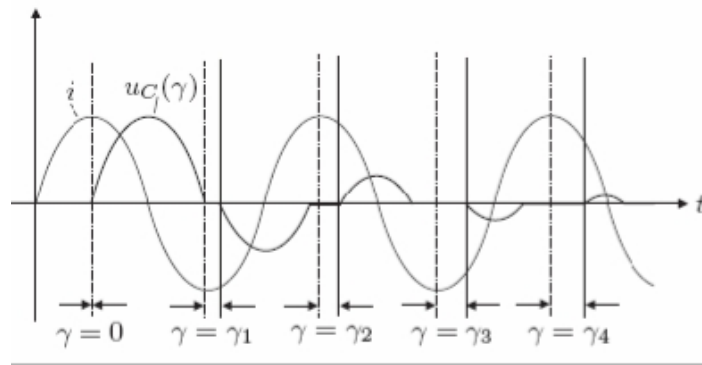
GCSC işlemi; her yarım saykılta oluşan valfin açma ve kapama durumuyla ac frekansı senkronize olarak başlar. GCSC hat frekansı ile seri olduğunda, GCSC elemanı; her hat akımında kapasitör karşısındaki ac voltajı kontrol edebilir. GCSC, değişken empedans tipi seri kompanzator gibi düşünülebilir. GCSC'nin nasıl işlediğini daha iyi anlamak için Şekil 3.11, basit bir güç iletim sisteminde işlevini göstermektedir.



Şekil 3.11. GCSC'nin yapısı[53].

Şekil 3.11'i örnek alarak, kendiliğinden komuta edilmiş anahtarların açıldığı gibi, kapasitör otomatik olarak devreye eklenecek ve kompanzasyon hat indüktansına sağlanabilir. Anahtar kapatıldığında bile, iletim hattına kompanzasyon durduğundan

dolayı kapasitör pas geçilir. Şekil 3.12'deki dalga formu anahtar açılıp kapanmasının daha iyi anlatır.

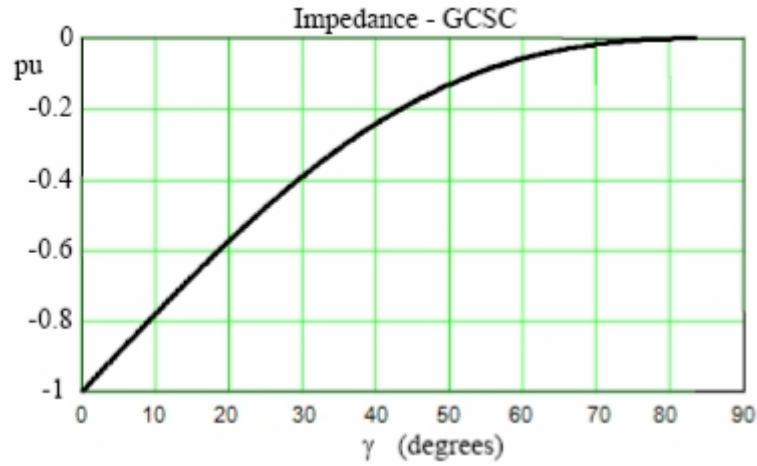


Şekil 3.12. GCSC operasyon dalga formu[52].

GTO'nun açma ve kapanması, ac sistem frekansıyla senkron olan hat akımının her yarım saykılında oluştu. γ gecikme açısıyla birlikte valf açıldığında, kapasitör karşısındaki voltaj şöyle türetilebilir:

$$V_c(t) = \frac{1}{C} * \int_{\gamma}^{\omega t} i(t) dt = \frac{1}{\omega C} * \sin(\omega t - \sin \gamma) \quad (36)$$

$$I(t) = I * \cos(\omega t) \quad (37)$$



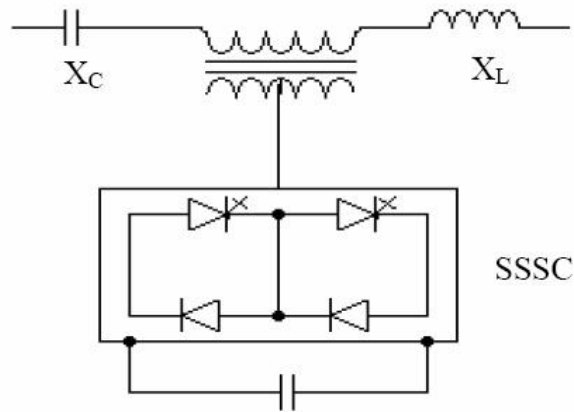
Şekil 3.13. GCSC kompanzasyonlarının derecesi[53].

Şekil 3.12'deki dalga formlarını referans alarak, V_c kompanzasyon seviyeleri, Iline tepe değeri ile ilgili olarak γ tarafından tanımlanmıştır. Şekil 3.13'te, kompanzasyon seviyesi, γ gecikme açısına orantılıdır. Pratik uygulamalarda, GCSC, reaktans kompanzasyonları veya voltaj sağlamak için kullanılır.

Anahtarlamaalı konverter tipi seri kompanzator, senkron bir voltaj kaynagi(SVS)'ndan olusmaktadır. Bu senkron voltaj kaynagi, 3 fazli degisebilen sinusoidal voltajlar uretebilmektedir. Senkron voltaj kaynagi reaktif gucu hem emebilir hem de uretebilir ve aynı zamanda, ac iletim sistemi ile reel gucu degis tokusu yapabilir. Seri kapasitörün frekans karakteristiklerine karşın empedans olgusundan keşfedilmiş seri kompanzasyon için SVS kullanım konsepti, hat için gerekli kompanzasyonları sağlamada bir rol oynamaz. Bu nedenle, seri kapasitörün rolü, temel frekans ve hat akımındaki quadratürde uygun voltajı sağlar. Seri kapasitör tarafından uretilen bu voltaj, iletim hattına seri olarak enjekte edilecektir.

3.1. Statik Senkron Seri Kompanzator (SSSC)

Statik senkron seri kompanzator, anahtarlamaalı konverter tipi seri bir kompanzatordür. Degisken empedans tipi kompanzatorlerden farklı olarak, SSSC , şekil 3.14'teki GTO tristörün kullanımıyla çalışır ve harici voltaj kaynagina ihtiyaç duymaz.



şekil 3.14. Bir iletim hattında SSSC'nin temel yapısı[52].

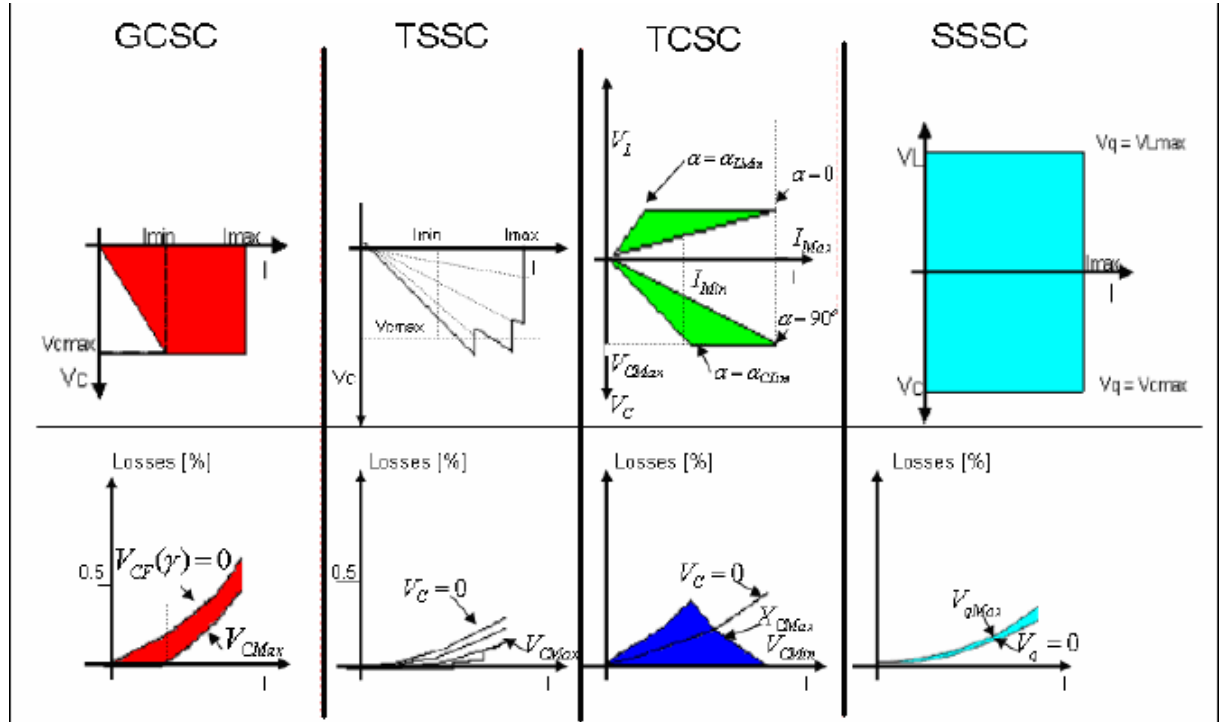
SSSC'nin temel işlevi, geleneksel seri kompanzasyona çok benzerdir, farkı, senkron bir voltaj gibi anahtarlamaalı gucu konverteri kullanmasıdır. SSSC, seri hattın içinde kompanze edilmiş voltaj enjekte ederek hatta çift yönlü kompanzasyon sağlar. Bu nedenle, SSSC gucu sisteminin dinamik davranışını artırmada kullanılır.

İletim hattında statik bir seri kompanzatorün ana fonksiyonu, geleneksel kompanzatorden alınan ölçümleri geliştirmektir. Degisken empedans tipi seri kompanzatorler, kontrollü tristör kullanarak gucu iletim sisteminde reaktif kompanzasyonu sağlamaktadır. Gucu sistem frekansı ile birlikte tristör anahtarlamaasının

senkronizmi boyunca, değişken bir admitans oluşturur. Anahtarlamalı konverter tipi seri kompanzatorlar gibi, senkron jeneratöre benzerdir.

3.2. Statik Seri Kompanzatorların Karşılaştırılması

Statik seri kompanzatorların farklı yapılarını inceledikten sonra, bunları karşılaştırmak uygun olur.



Şekil 3.15. Statik Seri Kompanzatorların Karşılaştırılması[51].

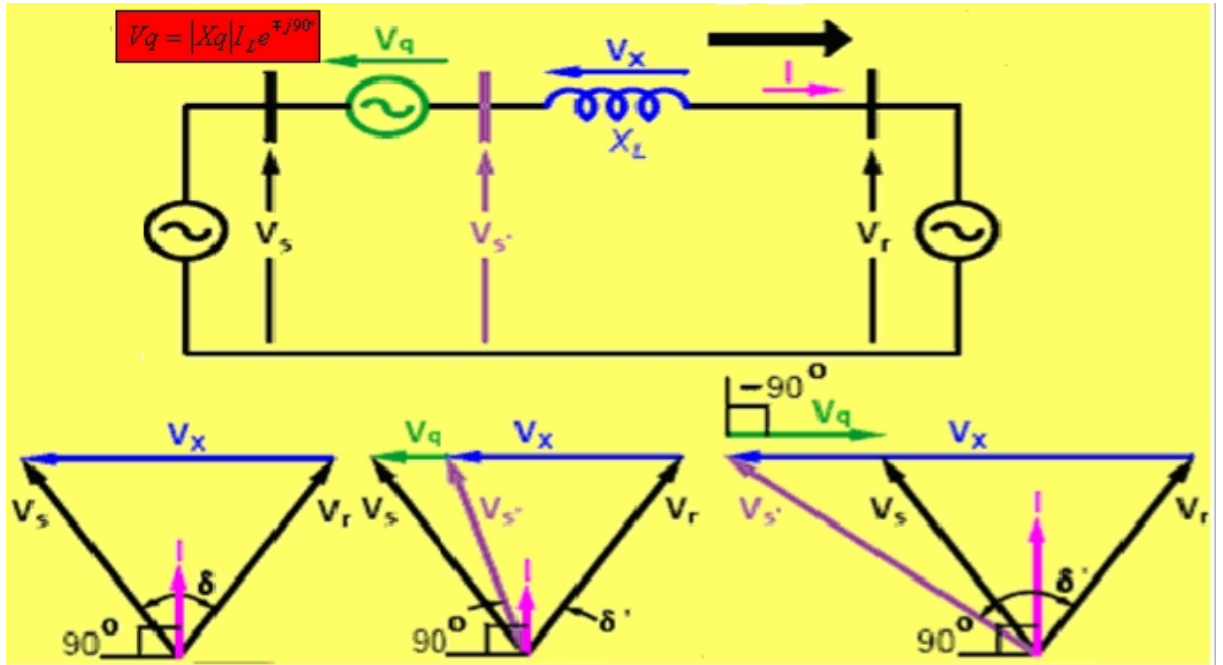
- SSSC, hat akımının genliğinin bağımsızca bir kapasitif veya indüktif reaktansı gibi emüle eden 3 fazlı kontrol edilebilir bir kompanzasyon voltajı üretebilir. GCSC ve TSSC için, sadece, hat akımıyla orantılı bir kontrol aralığı içinde kompanze edilmiş voltaj sağlayabilmektedir. TCSC buna rağmen, tristör kontrollü reaktörün akım boost yeteneği boyunca, maksimum kompanze edilmiş voltajı sağlayabilmektedir.
- Senkron voltaj kaynağı çalışırken, SSSC, seri hat empedansının rezistif ve reaktif komponentlerinin her ikisi için de eşzamanlı kompanzasyon sağlayabilmektedir, bundan dolayı hatta aktif ve reaktif güç kompanzasyonunu sağlayabilmektedir. Değişken empedans tipinde olduğunda, onlar sadece reaktif

kompanzasyon sağlayabilmekte çünkü işlemsel karakteristikleri aktif güç kompanzasyonuna uygun değildir.

- Bir enerji deposuyla SSSC, bir empedans kompanzasyon kontrolör gibi davranır ki bu kontrolör iletim hattı rezistansını kompanze edebilmektedir. Güç osilasyon sönümünde etkililik, enjekte edilmiş seri reaktif kompanzasyonların uygun regülasyonu ile artırılabilir, ki seri reaktif kompanzasyon arttığında iletilen güç azalır veya tam tersidir.

Statik seri kompanzator (SSSC), genel olarak, hat akımının kapasitif veya indüktif aralıkları boyunca kontrol edilebilir kompanzasyon voltajının sağlayabildiği GTO-tabanlı voltaj kaynağı inverter kullanılarak düzenlenir. Diğer seri kompanzatorlardan farklı olarak, ideal bir SSSC, sistem temel frekansıyla sinüsoidal ac voltaj kaynağıdır, ki bu şekilde diğer frekanslarda çıkış empedansı sıfırdır. Ek olarak, uygun kontrollerle, SSSC ataletsiz bir jeneratör gibi davranır, bu nedenle güç sistemine cevabı pratikte anidir. SSSC ye kuplajlanmış uygun enerji kaynağıyla, ac sistemden gücü emer veya üretir.

Şekil 3.16 güç sisteminin basit bir hat diyagramını göstermektedir ve iletim hattına seri olan bir reaktansı SSSC nasıl emüle eder onu göstermektedir.



Şekil 3.16. SSSC'nin tek hat diyagramı ve fazörü[55].

SSSC , iki işlem modunda çalışır:indüktif ve kapasitif mod.Bu modlar, Şekil 3.16 referans alınarak açıklanacaktır.

İndüktif mod: SSSC, 90^0 lik hat akımını ilerleten V_q alternatif voltajını enjekte ettiğinde, iletim hattına seri olan indüktif reaktansı emüle eder, bundan dolayı seri hat reaktansı karşısında V_x voltajı azalır. Aynı zamanda, δ iletim açısı azalır.

Kapasitif mod: SSSC, 90^0 lik hat akımını geriletken V_q alternatif voltajını enjekte ettiğinde, iletim hattına seri olan kapasitif reaktansı emüle eder, bu seri hat reaktansının karşısındaki V_x artırmaya zorlar, aynı zamanda δ iletim açısını artırır. Sonuçta, güç akışı ve hat akımı, genlikte enjekte edilmiş voltaj artışının miktarı kadar artırır.

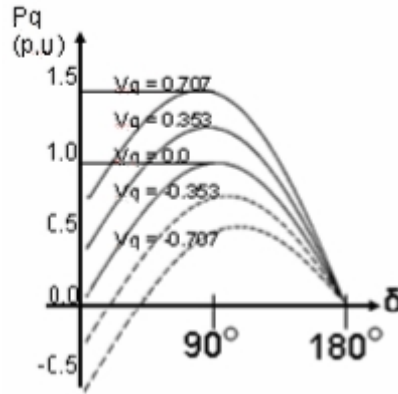
Enjekte edilmiş voltaj için genel denklem:

$$V_q = |X_q| I e^{\mp 90^0} \quad (38)$$

Ve iletilmiş güç denklemi:

$$P = \frac{V_r V_s}{X_L} \sin \delta + \frac{V}{X_L} V_q \cos \frac{\delta}{2} \quad (39)$$

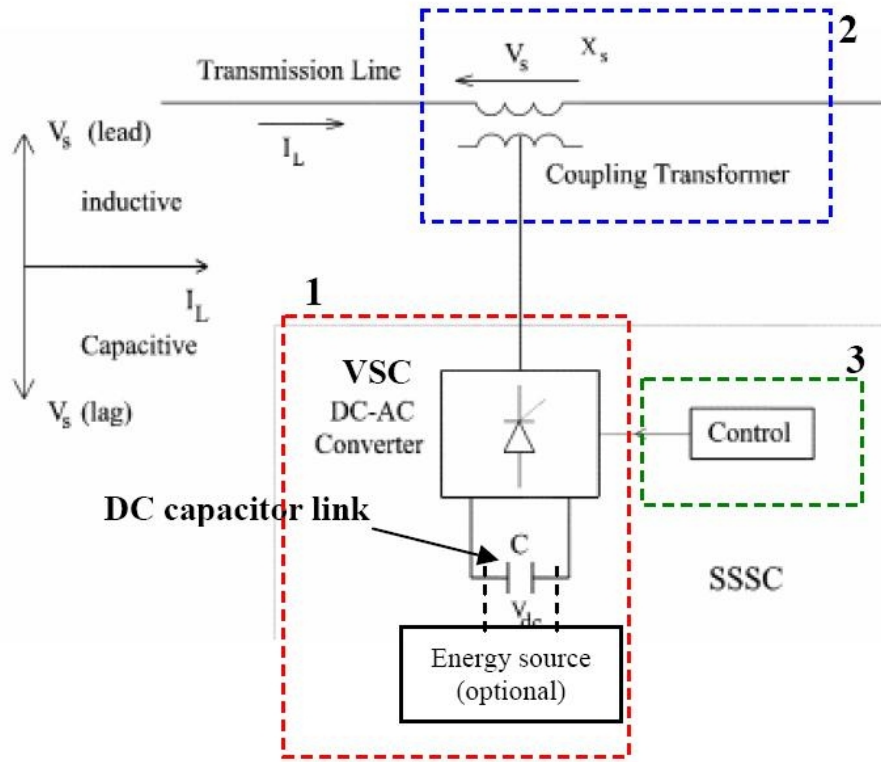
Şekil 3.17 seri kompanzasyon voltajın parametrik bir fonksiyonu gibi olan SSSC tarafından sağlanmış iletim açısına karşılık iletim gücünün çizimi gösterilmiştir.



Şekil 3.17. SSSC'nin iletim açısı,iletilmiş gücü[51].

Şekil 3.18'de statik senkron seri kompanzatorünün yapısı gösterilmiştir. Burada SSSC, daha iyi anlaşılması için 3 ana parçada ele alınacaktır.

1. Voltaj kaynaklı konverter
2. Kuplaj transformatörü
3. Kontrol



Şekil 3.18. SSSC'nin temel yapısı[56].

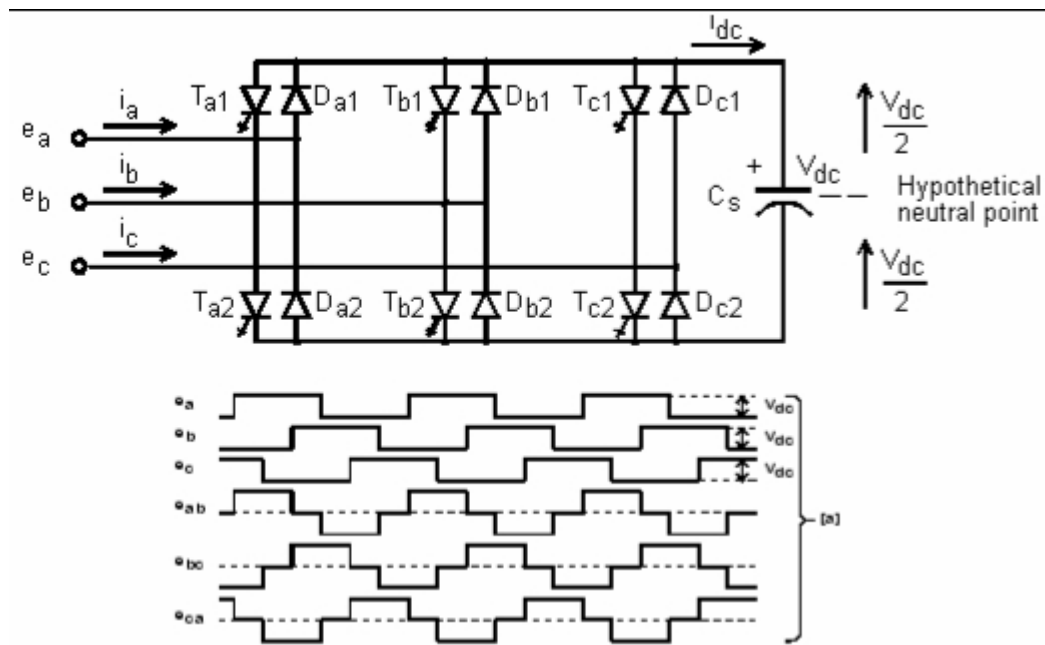
Voltaj kaynaklı konverterin (VSC) görevi, dc link kapasitörden 3 fazlı bir voltaj üretmektir, şöyle ki, SSSC, kompanzasyon amaçları için güç sistemine seri 3 fazlı voltajları enjekte eden bir voltaj kaynağı gibi davranır. Şekil 3.18'de görüleceği gibi, VSC, seri kuplajlama transformatörüne seri ve dc kapasitör linkine paralel olan bir iletim sistemine seri bağlanmıştır. Uygun kontrolle, enjekte edilmiş voltajın faz ve genliği değişebilir ve SSSC operasyon moduna bağlı olan gereksinimlere göre sentezlenebilir. Temelde VSC ekipmanları SSSC ile 2 tip kompanzasyona imkan verebilmektedirler[57]:

- **Reaktif güç kompanzasyonu:** Hat akımına dikey veya quadratür olan VSC tarafından enjekte edilmiş voltajın vektörü üretildiğinde, VSC, iletim sistemine reaktif gücü sağlayabilmektedir. Bu operasyon modunda, SSSC, kontrol edilebilir seri kapasitör ve reaktöre benzer davranış gösterir. Buna ek olarak, güç sisteminde reel güç akışında küçük bir artış gösterir; bu artış enjekte edilmiş kompanzasyon voltajının bir sonucudur. Bu kompanzasyonun avantajı, hiçbir enerji depolama aygıtına gerek yoktur.

- **Reel ve reaktif güç kompanzasyonu:** VSC tarafından enjekte edilmiş voltaj, 4 quadrant yolunda (360°) kontrol edilir, VSC, iletim sistemine reel ve reaktif güç sağlayabilmektedir. Buna rağmen bu kompanzasyon modu, enerji depolama aygıtına gerek duyar.

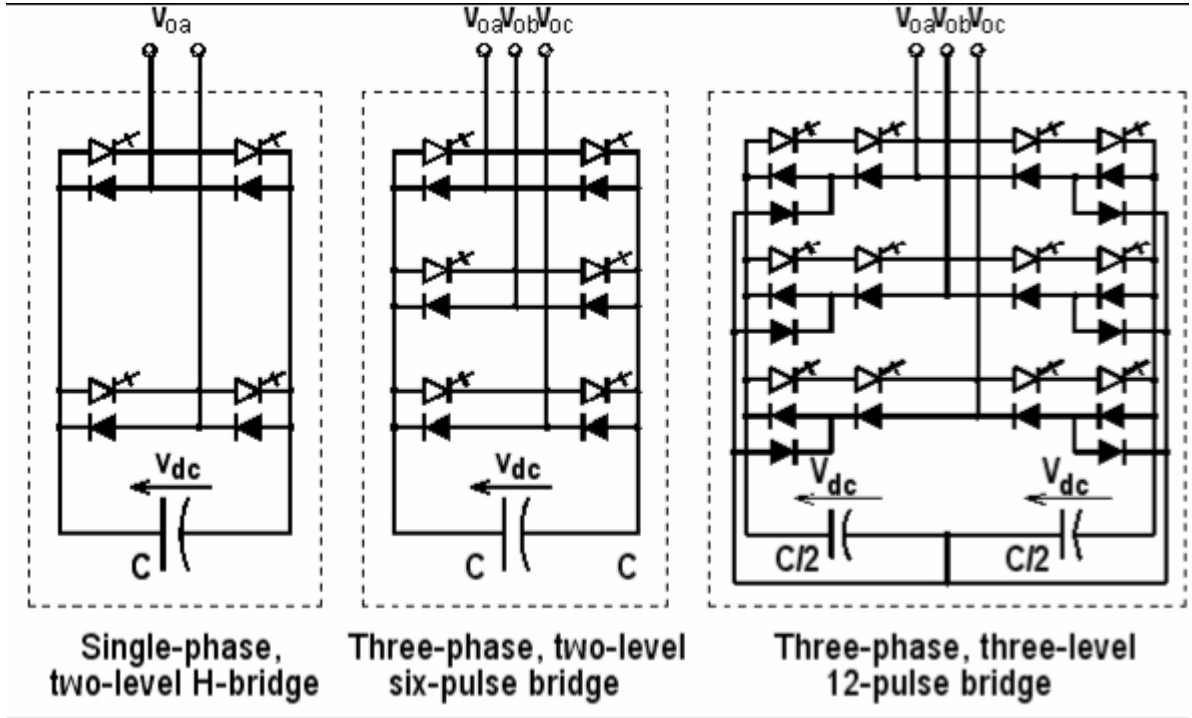
VSC, hat akımına bakmaksızın kompanzasyon voltajını üretebilme yeteneğine sahiptir, bu durum, SSSC'nin güç sistemindeki yüklerin düzenlenmesinde etkin bir şekilde işlem görmesine izin verir.

Şekil 3.19'da gösterilen 6 palsli konverterin temel yapısı, 6 adet güç yarıiletken anahtarlama elemanından ve dc kapasitör linkle paralel bağlantılı anti paralel diyotlardan oluşmaktadır. DC kapasitör linki gereklidir şöyle ki Şekil 3.19'da gösterilen 3 fazlı dalgaformu üretebilen bir inverterdir. VSC tarafından üretilmiş palslerin sayısı, paralel veya seri olarak bağlanan yarıiletkenlerin artmasıyla artırılabilir(Şekil 3.20).



Şekil 3.19. 6 palsli VSC'nin basit konfigürasyonu[58].

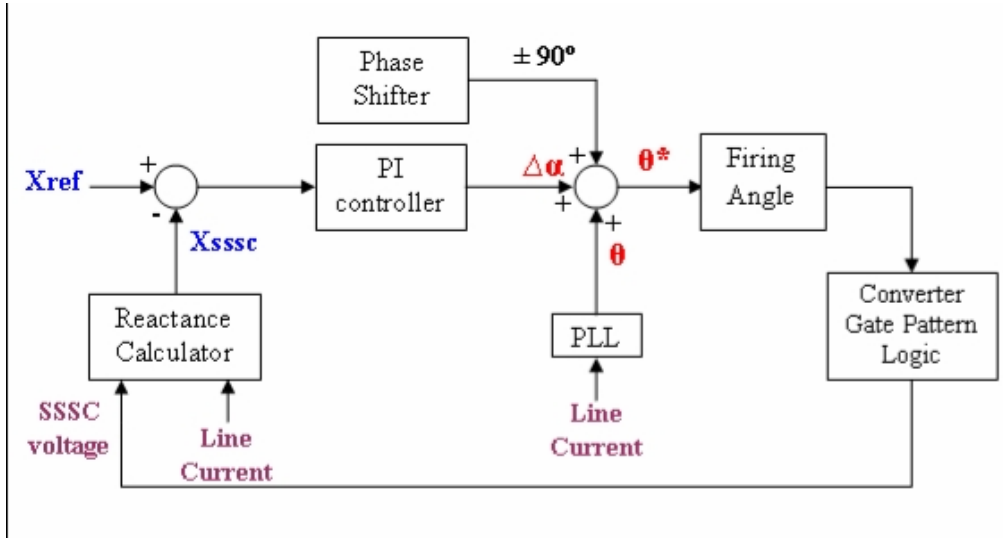
Kullanılan palslerin sayısının artırılmasıyla, çıkış voltajı, iletim sisteminin güç kalitesini geliştiren harmonik bozulmalardan daha az etkilenecek voltaj kaynaklı konverter yardımıyla üretilir.



Şekil 3.20. VSC'nin farklı konfigürasyonları[58].

SSSC'deki kuplaj transformatörünün ana fonksiyonu, sistem hataları anında güç sisteminden konverteri izole etmede voltaj kaynaklı konverter için elektriksel izolasyonu sağlamaktır, aynı zamanda, güç sistemine voltaj kaynaklı konverter tarafından üretilmiş 3 fazlı enjekte edilmiş voltajın direkt veya seri kuplajlanmasını sağlamaktır. İletim sisteminin içinde üretilmiş enjekte edilmiş 3 fazlı voltaj işlemi boyunca, kuplaj transformatörü, VSC tarafından üretilen voltajı artıracak ve sonuçta güç sistemine voltajı enjekte edilir. Transformatörlerin tüm tiplerinde, indüktans sızıntısı ve internal rezistans nedeniyle kayıplar olabilmektedir.

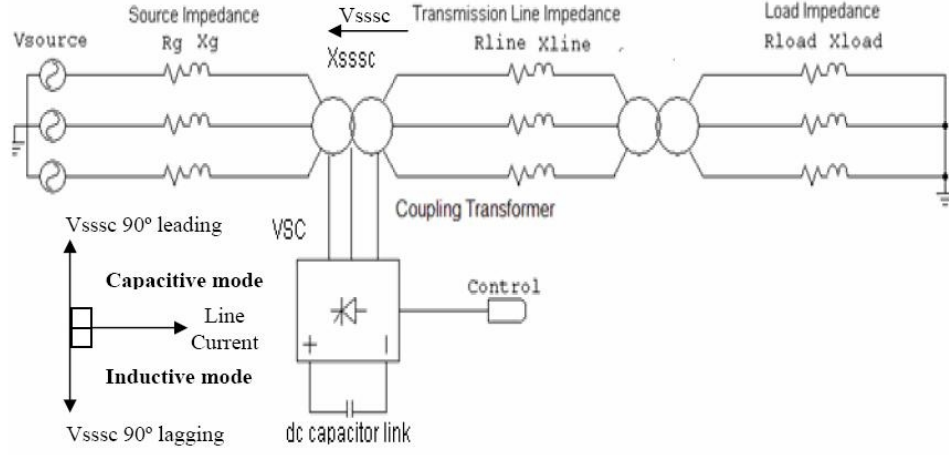
Kontrolör SSSC'nin beyni gibi davranır ve güç sisteminin gereksinimlerine referans olan işlemleri tanımlamada önemli bir rol oynar. Temelde SSSC'nin kontrol stratejileri iki sınıfta kategorize edilebilir: direkt ve indirekt kontrol. Direkt kontrol için, VSC tarafından üretilen voltajların faz ve genliği kontrol edilebilir. İndirekt kontrol için, direkt kontrole benzerdir, VSC tarafından üretilmiş voltajın miktarı dc kapasitör terminal voltajına orantılı olması hariçtir. İndirekt kontrol, enjekte edilmiş voltaj tarafından emüle edilen kompanse edilmiş reaktansın kontrolünde de uygulanabilir.



Şekil 3.21. SSSC kontrol blok diyagramı[56].

Şekil 3.21'deki blok diyagram, seçilmiş kontrol stratejisiyle bağlantılı gerekli komponentlerin planı gösterilmiştir. Kontrolöre 3 giriş vardır: I_L hat akımı, V_{SSSC} voltaj kaynaklı konverterden enjekte edilmiş voltaj ve X_{ref} referans reaktansı. Reaktans hesaplayıcı, VSC tarafından üretilen enjekte edilmiş kompanzasyon voltajı tarafından emüle edilen iletim hattında görülen sanal reaktansın hesabını yapar. Hesaplanmış X_{SSSC} değeri, basit bir döngü geribesleme sistemi tarafından kontrol edilebilir, ki bu şekilde X_{SSSC} ölçülmüş genliği, X_{ref} referans değeri ile karşılaştırmalı hazırlanmıştır. SSSC operasyon modları, hat akımını 90^0 ilerleten veya geriletten enjekte edilmiş kompanzasyon voltajını gerektirir. Hat akımına kontrolörü senkronize eden, faz kilitlemeli döngü hat akımının fazını kontrol etmede kullanılır. Faz kaydırıcı, V_{SSSC} kompanzasyon voltajını kaydırmada kullanılan bir araçtır. Bu faz kaydırıcı, şayet SSSC kapasitif modda ise $+90^0$ ye ayarlanır veya tersi için indüktif moddadır.

Şekil 3.22 basit bir güç sisteminde SSSC'nin yapısını göstermektedir. SSSC, bir kuplaj transformatörü yoluyla iletim hattına seri olarak bağlanmıştır. SSSC'nin yeri iletim hattından öncedir şöyle ki SSSC, SSSC'nin işlem moduna bağlı olan indüktif veya kapasitif reaktansı emüle edebilen 3 fazlı kompanzasyon voltajlarını enjekte edebilir.



Şekil 3.22. Tek hatlı diyagramda SSSC.

SSSC işlemi aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir. Şekil 3.22'yi referans alarak, kayıplar ihmal edilirse, hattın toplam reaktansı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$X_T = X_g + X_{line} + X_{load} \quad (40)$$

Kompanzasyon derinliği:

$$D_{SSSC} = \frac{X_{ref}}{X_T} = \frac{X_{SSSC}}{X_T} \quad (41)$$

Denklem 38' e bağlı olarak enjekte edilmiş voltaj miktarı:

$$V_{SSSC} = jX_{SSSC} \times I_{line} \quad (42)$$

Şekil 3.21'i referans alarak, iletim hattında görülen sanal reaktans:

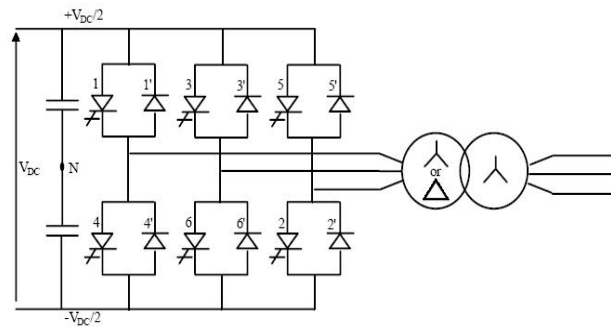
$$X_{SSSC} = \left| \frac{V_{SSSC}}{I_{line}} \right| \quad (43)$$

X_{SSSC} 'nin hesaplanmış değeri kontrole girdiğinde, uygun bir kapı konverter sürücü sinyali kontrolör tarafından üretilecek, VSC bu kapı sinyaline ayarlanacak, iletim sistemine gerekli miktarda V_{SSSC} kompanzasyon voltajı enjekte edilecektir. Bu işlem, istenilen X_{SSSC} miktarına ulaşıncaya kadar devam edecektir. Gerekli kompanzasyona erişildiğinde, yerdeğişim açısı sıfıra yakın olacaktır.

4. UPFC MODELLEMAYA GİRİŞ

Bağlı olduğu baradaki voltajı düzenlemekte de iyi olan ve bir iletim hattındaki reel ve reaktif güç akışını etkili bir biçimde kontrol etme kabiliyetiyle UPFC, aynı zamanda güç sistemi kararlılığı konusunda da etkin rol oynamaktadır. Güç sistemi; üretim birimlerinin, yüksek voltajlı elektrik hatları boyunca , yük merkezleriyle kesişimidir ve genellikle mekanik olarak kontrol edilir. Bir güç sistemi 3 alt sisteme bölünebilir: üretim, iletim, dağıtım. Gün geçtikçe elektrik güç talebi artmakta ve bunun yanısıra yeni üretim birimleri ve iletim devreleri oluşturmak, ekonomik ve çevresel nedenlerden dolayı gitgide zorlaşmaktadır. 1980’lerde “Electric Power Research Institute(EPRI)”, FACTS adında yeni bir teknoloji programını oluşturdu[28]. Bu programın ana hedefi: kontrol edilebilirliği artırmak ve bunu yapmak için de mekanik kontrolörlerin yerine yüksek hızlı güç elektroniği elemanlarını kullanmaktır. FACTS kontrolörlerinin en yeni üretilen elemanı “katı hal senkron voltaj kaynakları (SVSs)”dır ve bu yeni nesil üretim 1980’lerin sonunda L.Gyugyi tarafından üretilmiştir[29]. SVSs, aynı bir ideal senkron makine gibi davranır ve hem indüktif hem de kapasitif reaktif gücü üretebilir. SVSs , voltaj kaynaklı konverterler (VSC) ile yeniden düzenlenebilir. SVS, paralel veya seri kompanzator gibi kullanılabilir. Şayet reaktif bir paralel kompanzator olarak kullanılırsa bu durumda “statik kondenser(STATCON)” diye adlandırılır; şayet reaktif bir seri kompanzator olarak kullanılırsa bu durumda “statik senkron seri kompanzator (SSSC)” olarak adlandırılır. Her iki SVSs, biri ac sisteme seri bağlı ve diğeri de paralel bağlı bir de ortak dc terminal olacak şekilde yeniden düzenlenirse bu sistem “birleştirilmiş güç akış kontrolörü (UPFC)” olarak adlandırılır.

4.1. UPFC Temel İşlemler ve Karakteristikler



Şekil 4.1. Üç fazlı Voltaj Kaynaklı Konverter.

Tipik bir 3 fazlı VSC şekil 4.1[30]'de gösterilmektedir. VSC, 6 tane supaptan yapılmıştır ki her biri;bir reverse diyotla paralel bağlı ve bir dc kapasitorle bağlantılı bir “gate turn off elemanı (GTO)” nı içermektedir. AC voltaj, GTO'ların dizisel anahtarlama boyunca bir DC voltajdan üretilmiştir. DC voltaj tek kutupludur ve DC akım her yönde akabilir. AC sistem voltajı ile ilgili olarak konverter çıkış voltajının açısını kontrol ederken, konverter ve AC sistem arasındaki reel güç değişimi kontrol edilir. Şayet konverter çıkış voltajı, AC sistem voltajını ilerletmek için kontrol edilirse, reel güç DC taraftan AC tarafa doğru (inverter operasyonu) akar. Şayet konverter çıkış voltajı, AC sistem voltajını geciktirmek için kontrol edilirse, reel güç AC taraftan DC tarafa doğru (rectifier operasyonu) akacaktır. Inverter işlemi GTO'lar tarafından yapılırken, rectifier işlemi dc diyotlar yardımıyla yapılır. İki anahtarlamanın zamanı hiçbir zaman aynı ana denk gelmez. Konverter çıkış voltajının genliği kontrol edilirken, AC sistem ve konverter arasındaki reaktif güç değişimi kontrol edilir. Şayet konverter çıkış voltajının genliği AC sistem voltajının genliğinden daha büyük olursa, konverter AC sistem için reaktif güç üretir. Şayet konverter çıkış voltajının genliği AC sistemden daha küçükse, konverter reaktif gücü emer.

Konverter çıkış voltajı çeşitli kontrol teknikleriyle kontrol edilebilir. Güç elektroniğindeki son gelişmeler, PWM tekniğinin yüksek voltaj uygulamaları için pratik kullanımı olacağını işaret etmektedir. Bu tezde de PWM teknikleri kullanılacaktır [31-34].

Sinusoidal PWM tekniği GTO'lar için turn on ve turn off sinyalleri uygulandığında Şekil 4.2.b [35]'de gösterilen A_c genliğinin v_c taşıyıcı dalga formuyla birlikte; A_r genliğinin v_r sinusoidal referans sinyali karşılaştırılarak üretilmiştir.

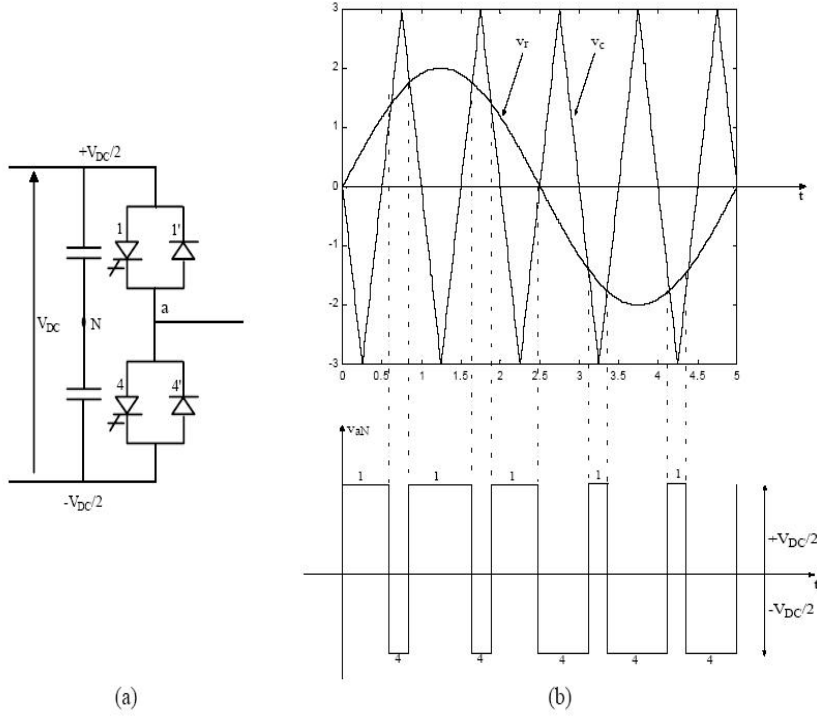
Şekil 4.2.a' yı ele alırsak;

$v_r > v_c$ 1 elemanı için turn on

4 elemanı için gate turn off

$v_r < v_c$ 1 elemanı için turn off

4 elemanı için gate turn on durumundadır.



Şekil 4.2. PWM konverter a) bir fazlı bağlantı b)dalga biçimleri.

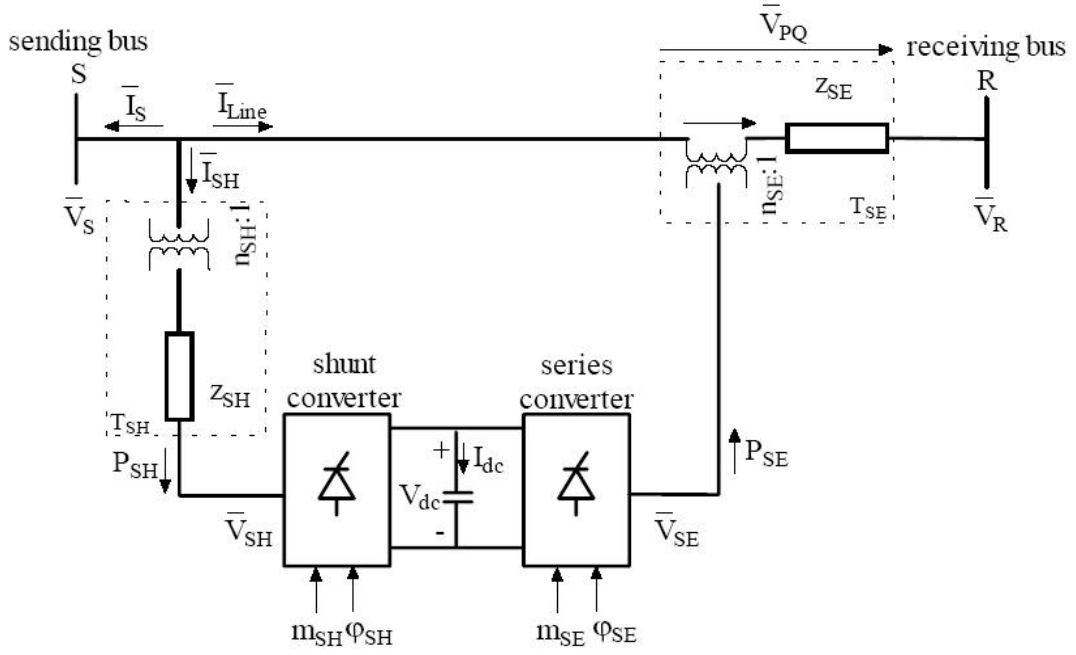
Konverter çıkış voltajının temel frekansı, referans sinyalinin frekansı ile belirlenir. Referans sinyalinin genliğinin kontrol edilmesiyle darbelerin genişliği kontrol edilir. Genlik modülasyon indeksi A_r nin A_c ye oranı ile tanımlanabilir;

$$m = \frac{A_r}{A_c} \quad (44)$$

$m \leq 1$ için konverter çıkış voltajının temel frekans komponentinin tepe genliği şöyle ifade edilir;

$$V = m \frac{V_{DC}}{2} \quad (45)$$

UPFC iki bara arasında yerleşmiş bir araçtır; UPFC gönderme barası, UPFC alma barası. UPFC iki VSC ve bir ortak DC link içerir. Temel frekans modeli için, VSC, Şekil 4.3[34]'te gösterildiği gibi iki adet kontrol edilebilir voltaj kaynağı ile yer değiştirilmişlerdir. Gönderme barasındaki voltaj kaynağı paralel bağlanmıştır ve bu, "paralel voltaj kaynağı" olarak adlandırılmıştır. İkinci kaynak, seri voltaj kaynağı, gönderme ve alma baralarının arasına yerleştirilmiştir. UPFC, yüksek voltaj iletim hatları üzerinde bulunmaktadır.



Şekil 4.3. UPFC'nin temel frekans modeli.

PWM tekniği her iki VSC'ye uygulandığında paralel ve seri enjekte voltajının genlikleri için aşağıdaki denklemler çıkarılabilir:

$$V_{SH} = m_{SH} \frac{V_{DC}}{2\sqrt{2}n_{SH}V_B} \quad (46)$$

$$V_{SE} = m_{SE} \frac{V_{DC}}{2\sqrt{2}n_{SE}V_B}$$

Bu eşitliklerde:

- m_{SH} - paralel VSC kontrol sinyalinin genlik modülasyon indeksi,
- m_{SE} - seri VSC kontrol sinyalinin genlik modülasyon indeksi,
- n_{SH} - paralel transformatör devir oranı,
- n_{SE} - seri transformatör devir oranı,
- V_B - kV cinsinden sistem bara voltajı,
- V_{DC} -kV cinsinden DC link voltajıdır.

\bar{V}_{SH} ve \bar{V}_{SE} nin faz açıları;

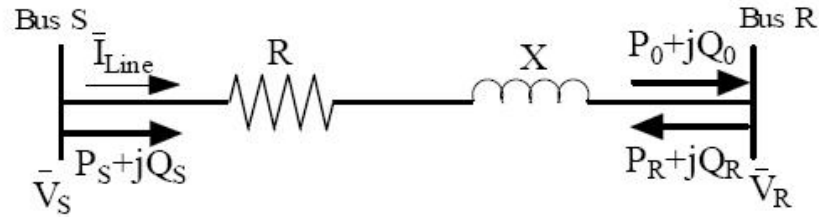
$$\begin{aligned} \delta_{SH} &= \angle(\delta_s - \phi_{SH}) \\ \delta_{SE} &= \angle(\delta_s - \phi_{SE}) \end{aligned} \quad (47)$$

Bu eşitliklerde:

- φ_{SH} - gönderme bara voltajının faz açısına bakılmaksızın paralel VSC'nin ateşleme açısı
- φ_{SE} - gönderme bara voltajının faz açısına bakılmaksızın seri VSC'nin ateşleme açısı

Seri konverter, iletim hattıyla seri olarak AC voltajı $\bar{V}_{SE} = V_{SE} \angle (\delta_S - \varphi_{SE})$ enjekte eder. Seri voltaj genliği V_{SE} ve onun faz açısı φ_{SE} gönderme barasına bakılmaksızın $0 \leq V_{SE} \leq V_{SEmax}$ ve $0 \leq \varphi_{SE} \leq 360^\circ$ aralığında kontrol edilebilir. Reel güç AC terminaller arasında her yönde serbestçe akabilir. Fakat buna karşılık reaktif güç, DC link üzerinden akamaz ve her bir konverter lokal olarak reaktif gücü emer veya üretir.

Şekil 4.4'te gösterilen sistem için gönderme ve alma baralarının RMS fazör voltajları $\bar{V}_S = V_S \angle \delta_S$ ve $\bar{V}_R = V_R \angle \delta_R$, hattaki fazör akımı \bar{I}_{Line} , R ve X hattın direnç ve reaktanstır.



Şekil 4.4. Bir iletim hattı.

Gönderme barasına enjekte edilmiş kompleks güç şöyledir;

$$S_S = P_S + jQ_S = \bar{V}_S \bar{I}_{Line}^* \quad (48)$$

ki burada P_S ve Q_S gönderme barasına enjekte edilmiş reel ve reaktif güçlerdir, * kompleks konjugate değerini belirtir.

Ohm kuralı kullanılarak, hat akımı şöyle yazılabilir:

$$\bar{I}_{Line} = \frac{\bar{V}_S - \bar{V}_R}{R + jX} = (\bar{V}_S - \bar{V}_R)(G + jB) \quad (49)$$

ki burada $G = \frac{R}{R^2 + X^2}$ hat kondüktansdır ve $B = -\frac{X}{R^2 + X^2}$ hat süseptansdır.

(48) ve (49) un kompleks konjugate değeri alınarak aşağıdaki tanımlama yapılabilir;

$$S^*_s = P_s - jQ_s = (V_s^2 - \bar{V}_s^* \bar{V}_R)(G + jB) \quad (50)$$

Euler identity kullanılarak ki $V\angle -\delta = V(\cos\delta - j\sin\delta)$ te yer almaktadır ve yeniden yazılırsa;

$$\bar{V}_s^* \bar{V}_R = V_s\angle -\delta_s V_R\angle \delta_R = V_s V_R \angle(-(\delta_s - \delta_R)) = V_s V_R (\cos(\delta_s - \delta_R) - j\sin(\delta_s - \delta_R)) \quad (51)$$

(51) ve (50) nin reel ve imajiner kısımları ayrılacak olursa aşağıdaki tanımlamalar elde edilir;

$$\begin{aligned} P_s &= V_s^2 G - V_s V_R G \cos(\delta_s - \delta_R) - V_s V_R B \sin(\delta_s - \delta_R) \\ Q_s &= -V_s^2 B - V_s V_R G \sin(\delta_s - \delta_R) + V_s V_R B \cos(\delta_s - \delta_R) \end{aligned} \quad (52)$$

Benzer olarak, alma barasındaki reel ve reaktif güçler;

$$\begin{aligned} P_0 = -P_R &= -V_R^2 G + V_s V_R G \cos(\delta_s - \delta_R) - V_s V_R B \sin(\delta_s - \delta_R) \\ Q_0 = -Q_R &= V_R^2 B - V_s V_R G \sin(\delta_s - \delta_R) - V_s V_R B \cos(\delta_s - \delta_R) \end{aligned} \quad (53)$$

Yukarıdaki denklemlerde P_R ve Q_R alma barasına enjekte edilmiş reel ve reaktif güçlerdir.

Hattaki güç kayıpları şöyle verilebilir;

$$\begin{aligned} P_L &= P_s - (-P_R) = (V_s^2 + V_R^2)G - 2V_s V_R G \cos(\delta_s - \delta_R) \\ Q_L &= Q_s - (-Q_R) = -(V_s^2 + V_R^2)B + 2V_s V_R B \cos(\delta_s - \delta_R) \end{aligned} \quad (54)$$

Tipik iletim hattı için $X \gg R$. G kondüktansı ihmal edilir ve B süseptansı $B = \frac{1}{X}$ ile yer değiştirir. Bu yaklaşımları kullanarak gönderme barasından alma barasına kadar hat boyunca iletilen reel güç ifadesi şöyledir;

$$P_s = -P_R = -V_s V_R B \sin(\delta_s - \delta_R) = \frac{V_s V_R}{X} B \sin(\delta_s - \delta_R) = \frac{V_s V_R}{X} B \sin \delta = P_0(\delta) \quad (55)$$

Reaktif güç ise;

$$\begin{aligned} Q_s &= -V_s^2 B + V_s V_R B \cos(\delta_s - \delta_R) = \frac{V_s^2 - V_s V_R \cos(\delta_s - \delta_R)}{X} \\ -Q_R &= V_R^2 B - V_s V_R B \cos(\delta_s - \delta_R) = \frac{-V_R^2 + V_s V_R \cos(\delta_s - \delta_R)}{X} = Q_0(\delta) \end{aligned} \quad (56)$$

Denklemler 55'ten görüldüğü üzere, hat boyunca iletilen reel güç şu yöntemlerle artırılabilir;

- Her iki sondaki voltajların genliklerini artırmak

- Hat reaktansını azaltmak
- Güç açısını artırmak

Güç akışı, güç açısının işareti değiştirilerek ters çevrilebilir: pozitif güç açısı gönderme barasından alma barasına güç akışı oluştururken negatif güç açısı da alma barasından gönderme barasına güç akışı oluşturur.

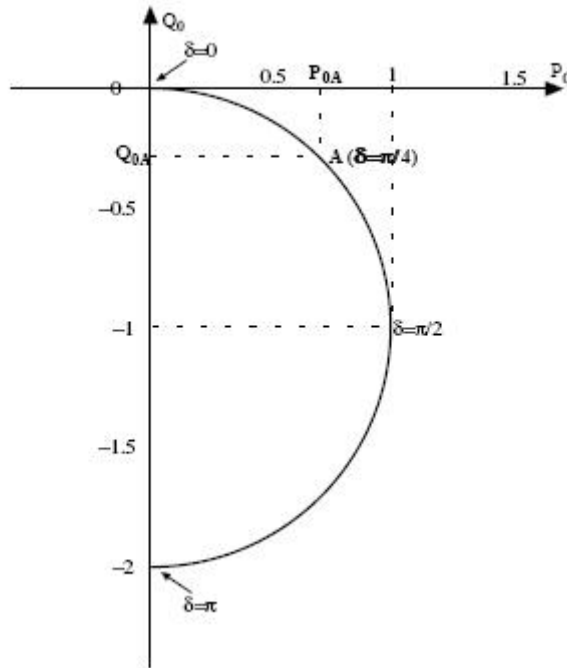
Reel ve reaktif güç akışını 4 parametre etkiler: V_S , V_R , X ve δ . Bu ilişkiyi anlamak için denklemler şöyledir:

$$(P_0(\delta))^2 + (Q_0(\delta) + \frac{V_R^2}{X})^2 = (\frac{V_S V_R}{X})^2 \quad (57)$$

Bu denklem, merkezi $(0, -\frac{V_R^2}{X})$ olan ve $\frac{V_S V_R}{X}$ açısına sahip olan bir çember oluşturur.

Güç açısının (δ), P_0 ve Q_0 ı nasıl etkilediğini bir örnekle göreceğiz: farzedelim ki $V_S = V_R = V$ ve $\frac{V^2}{X} = 1$. Şekil 4.5[30]'te P-Q lokusu bu amaçla çizilmiştir. Spesifik

bir güç açısı (δ) için P_0 ve Q_0 değerleri bulunabilir, şayet $\delta = \frac{\pi}{4}$ ise bu durumda $P_{0A} = 0.707$ ve $Q_{0A} = -0.293$. Güç açısının (δ) kararlılık sınırlarını aşmadığına dikkat ediniz.



Şekil 4.5. Kompanze edilmemiş sistemin P-Q lokusu.

Benzer olarak, gönderme barasından hatta gönderilmiş reel ve reaktif güçler arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

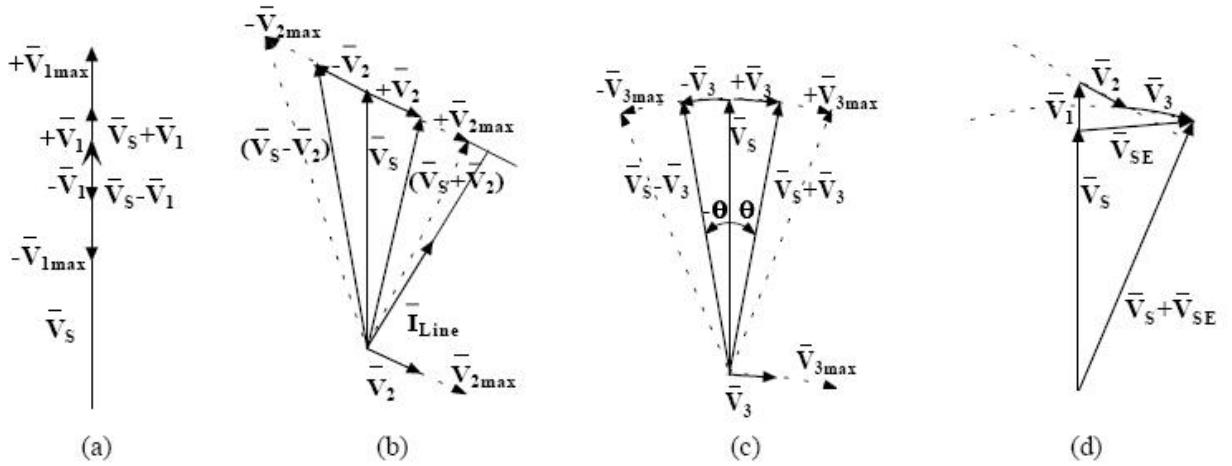
$$(P_S(\delta))^2 + (Q_S(\delta) - \frac{V_S^2}{X})^2 = (\frac{V_S V_R}{X})^2 \quad (58)$$

Ortalama reaktif güç akışı şöyledir:

$$Q_{SR} = \frac{Q_S - Q_R}{2} = -\frac{V_S^2 - V_R^2}{2} B = \frac{V_S^2 - V_R^2}{2X} \quad (59)$$

Denklem (59) dan da görüleceği üzere, voltaj genlikleri ve hat reaktansının her ikisi de reaktif güç akışını etkiliyor. Şayet voltaj genliklerinin her ikisi de aynı ise, her bara o hat boyunca emilen reaktif gücün yarısını gönderecektir. Şayet $V_S > V_R$ ise gönderme barasından alma barasına güç akışıdır.

UPFC önceden de bahsedildiği gibi, bağımsız olarak, iletim hattındaki güç akışını etkileyen tüm parametreleri kontrol edebilir (Şekil 4.6[30]).

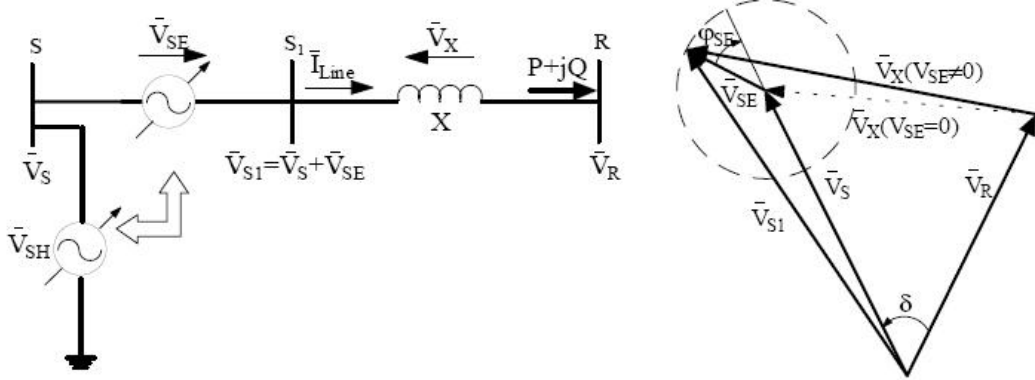


Şekil 4.6. Fazör diyagramlar.

UPFC seri konverter 4 modda çalışabilir:

- Direct voltaj injeksiyon modu
- Hat empedansı kompanzasyon modu
- Faz açısı regülasyon modu
- Otomatik güç akışı kontrol modu

Otomatik güç akış kontrol modu, geleneksel kompanzatorlarla gerçekleştirilemez. Bunun nasıl yapıldığı ise Şekil 4.7[30]'de gösterildiği gibi S ve R baralarını bağlayan iletim hattının başlangıcına yerleştirilerek yapılmıştır. Hat kondüktansı ihmal edilmiştir. UPFC, kontrol edilebilir genlik ve faza sahip iki ideal voltaj kaynağıyla gösterilmiştir.



Şekil 4.7. UPFC ile iletim hattı.

Bu durumda hattın alma barası sonunda alınan kompleks güç şöyledir:

$$S = \bar{V}_R \bar{I}_{Line}^* = \bar{V}_R \left(\frac{\bar{V}_S + \bar{V}_{SE} - \bar{V}_R}{jX} \right)^* \quad (60)$$

burada:

$$\bar{V}_{SE} = V_{SE} \angle (\delta_S - \varphi_{SE})$$

Bu kompleks gücün kompleks konjugate i;

$$S^* = P - jQ = \bar{V}_R^* \left(\frac{\bar{V}_S + \bar{V}_{SE} - \bar{V}_R}{jX} \right) \quad (61)$$

Basit matematiksel işlemler sonucunda reel ve reaktif güçler:

$$P = \frac{V_S V_R}{X} \sin \delta + \frac{V_R V_{SE}}{X} \sin(\delta - \varphi_{SE}) = P_0(\delta) + P_{SE}(\delta, \varphi_{SE})$$

$$Q = -\frac{V_R^2}{X} + \frac{V_S V_R}{X} \cos \delta + \frac{V_R V_{SE}}{X} \cos(\delta - \varphi_{SE}) = Q_0(\delta) + Q_{SE}(\delta, \varphi_{SE}) \quad (62)$$

UPFC seri voltaj genliği 0 ve V_{SEmax} , faz açısı da 0 ve 360 derece arasında kontrol edilebilir.

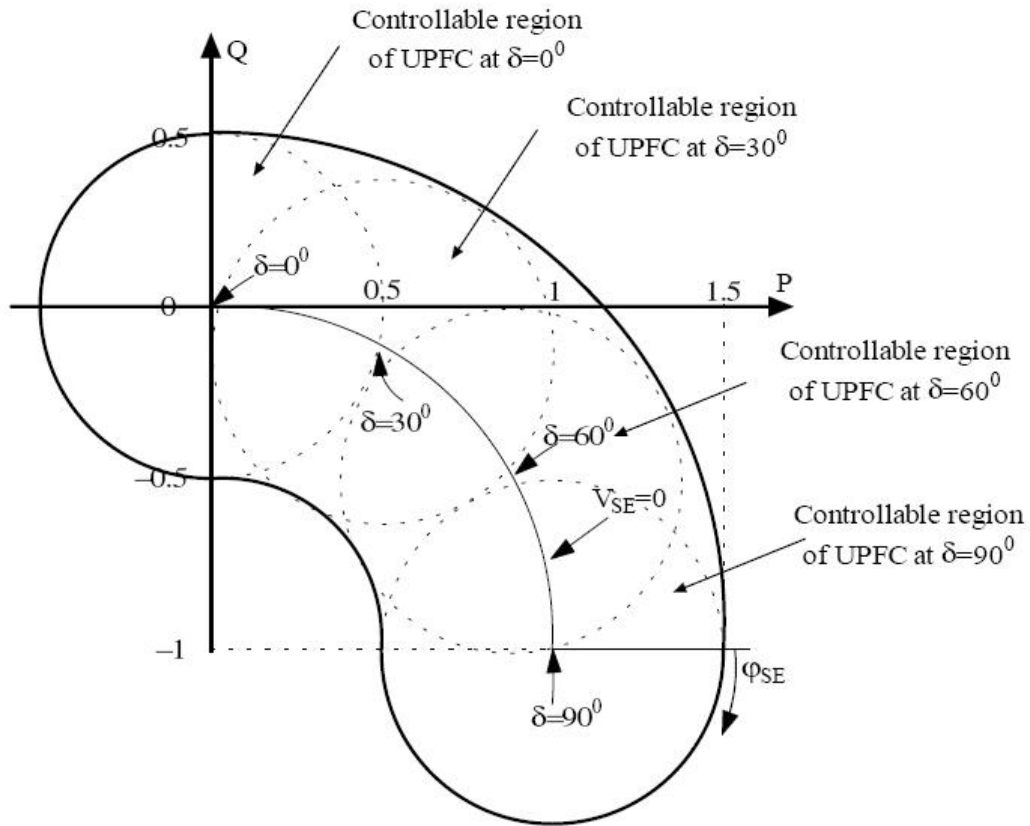
$$P_{\min}(\delta) = P_0(\delta) - \frac{V_R V_{SEmax}}{X} \quad P_{\max}(\delta) = P_0(\delta) + \frac{V_R V_{SEmax}}{X}$$

$$Q_{\min}(\delta) = Q_0(\delta) - \frac{V_R V_{SEmax}}{X} \quad Q_{\max}(\delta) = Q_0(\delta) + \frac{V_R V_{SEmax}}{X} \quad (63)$$

Bu aralık değerleri kullanılarak merkezi $(P_0(\delta), Q_0(\delta))$ ve açısı $\frac{V_R V_{SE \max}}{X}$ olan bir çember elde edilir. Bu çember aşağıdaki denklemle tanımlanmıştır:

$$(P(\delta, \varphi_{SE}) - P_0(\delta))^2 + (Q(\delta, \varphi_{SE}) - Q_0(\delta))^2 = \left(\frac{V_R V_{SE \max}}{X}\right)^2 \quad (64)$$

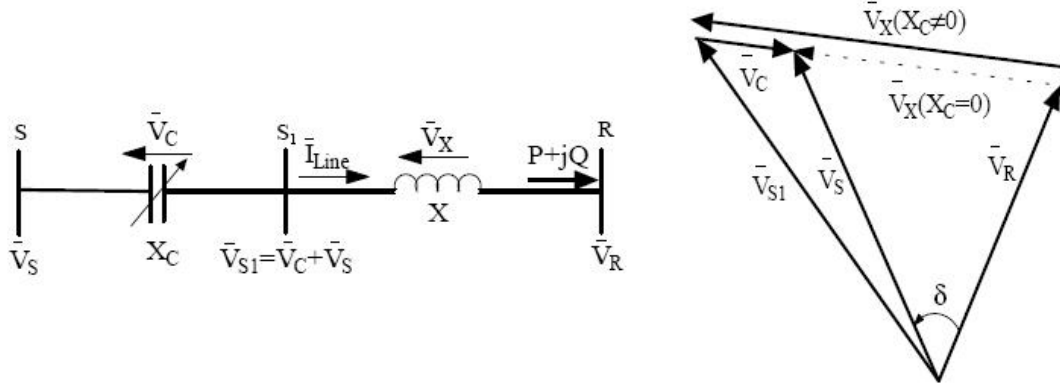
UPFC nin her iletim açısında reel ve reaktif gücü nasıl kontrol ettiğini Şekil 4.8’de görebiliriz:



Şekil 4.8. Çeşitli açılarda UPFC li basit iki baralı sistem için P-Q ilişkisi.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da gösterilen sistemler kullanılarak kontrollü seri kompanzatorların ve faz açısı regülatörlerin güç akışı karakteristikleri analiz edilmiştir. Kontrollü seri kompanzatorlar: Tristör Anahtarlamalı Seri Kapasitör (TSSC), Gate Kontrollü Seri Kapasitör(GCSC), Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) ve Statik Senkron Seri Kompanzator (SSSC) hat akımına dikey bir seri kompanzasyon voltajını enjekte eder. TSSC ve GCSC $0 < X < X_{C \max}$ aralığında kontrol edilebilir seri kapasitif empedans sağlar. Bu nedenle onlar, hat akımına bakmaksızın 90 derece geri (kapasitif)

ilişki ile voltajı enjekte eder. TCSC ve SSSC, kapasitif veya indüktif kompanzasyon sağlayan hat akımına bakmaksızın 90 derece geri(kapasitif) veya 90 derece ileri (indüktif) her iki bağıntıya sahip olabilen $V_{q\max}$ maksimum genliğin V_q voltajını enjekte eder.



Şekil 4.9. Kontrollü seri kapasitif kompanzasyonlu iletim hattı.

Kontrollü seri kompanzatorler içeren sistem için hattın alma sonunda reel ve reaktif güçlerin alınması şöyle ifade edilir:

$$P = \frac{V_S V_R}{X - X_q} \sin \delta$$

$$Q = \frac{V_S V_R}{X - X_q} \cos \delta - \frac{V_R^2}{X - X_q} \quad (65)$$

Burada TSSC ve GCSC için $0 < X_q < X_{C\max}$ ve TCSC ve SSSC için

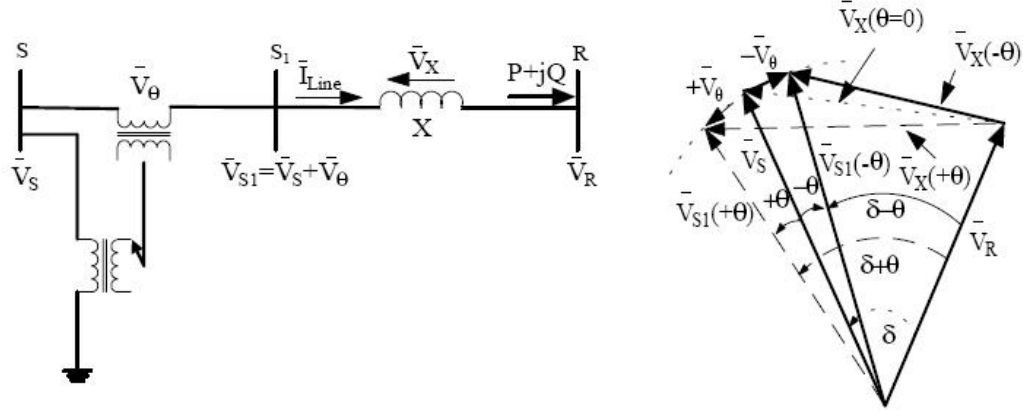
$$-\frac{V_{q\max}}{I_{Line}} < X_q < \frac{V_{q\max}}{I_{Line}} \text{ eşitliği verilebilir.}$$

Denklem (65) $P_0(\delta)$ ve $Q_0(\delta)$ denklemleriyle aynı yapıdadır ve kompanze edilmemiş sistemi tanımlar. Bu nedenle, X_q nun verilen değeri için, reel ve reaktif güçler arasındaki ilişki Şekil 4.5' tekine benzer bir çemberdir. O çemberdeki her nokta δ spesifik güç açısı için P ve Q değerlerini tanımlar. $X_q = 0$ la elde edilen P-Q lokusu, daha düşük sınır eğrisini sunar ve $X_q = X_{C\max}$ la elde edilen P-Q lokusu TSSC ve GCSC için daha yüksek sınır eğrisini sunar. Şekil 4.11'de bu iki eğri, sırasıyla $(P-Q)X_q = 0$ ve $(P-Q)X_{c\max}$ gibi gösterilmiştir. Benzer olarak, SSSC ve TCSC için

daha düşük ve daha yüksek sınırlar eğrileri, $X_q = -\frac{V_{q \max}}{I}$ ve $X_q = \frac{V_{q \max}}{I}$ ile elde edilir.

Onlar $(P-Q) - V_{q \max}$ ve $(P-Q)V_{q \max}$ karakteristikleri gibi tanımlanır.

İdeal Faz Açısı Regülatörü (PAR) , Şekil 4.10'da gösterildiği gibi değişmemiş faz kaymalı voltajının genliğini saklı tutarak $-\theta_{\max} < \theta < \theta_{\max}$ aralığında ek transformatör bağlandığı yere baraların arasında faz açısını değiştirebilir.



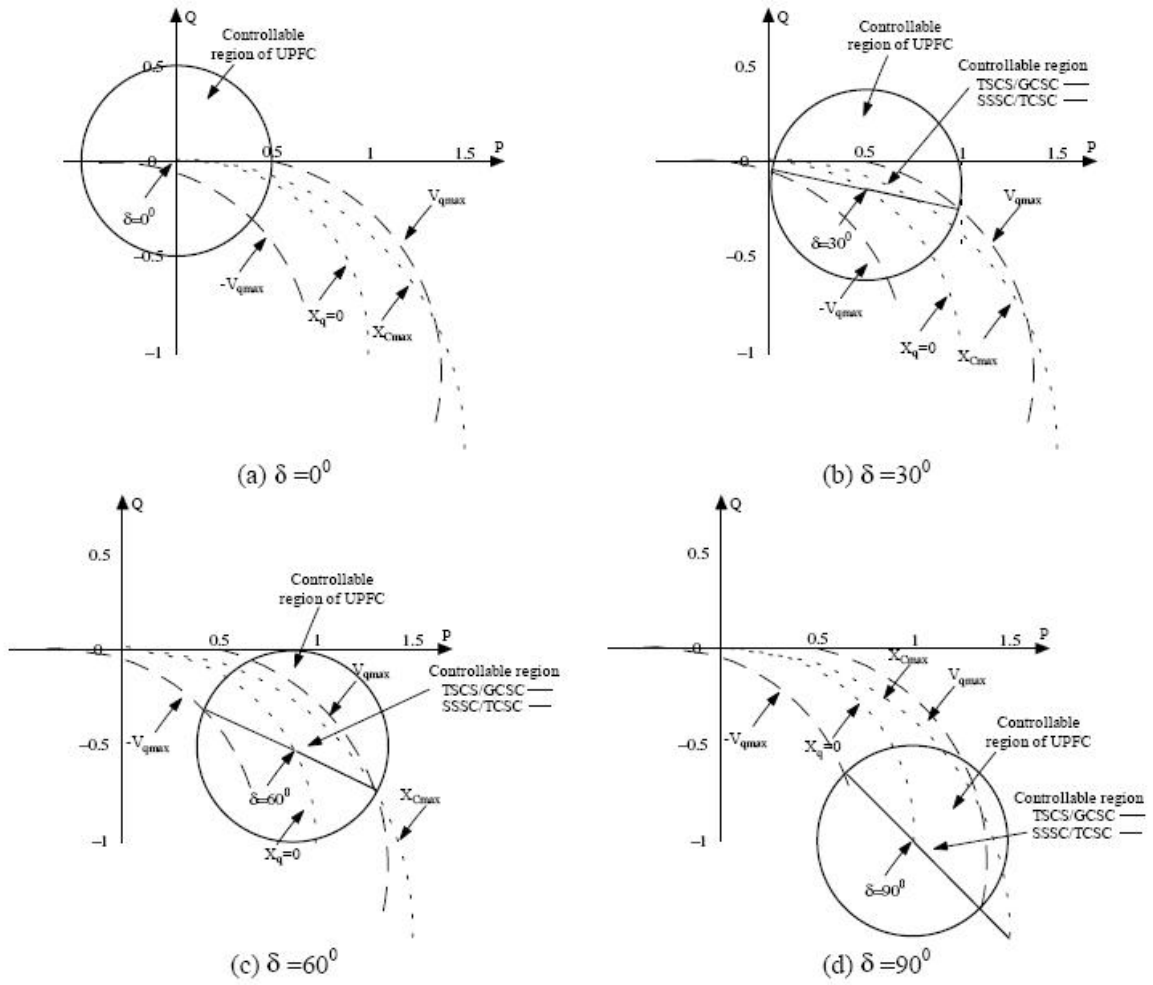
Şekil 4.10. Faz açısı regülatör kontrollü iletim hattı.

PAR ile elde edilen reel ve reaktif güç şöyle verilir:

$$P = \frac{V_S V_R}{X} \sin(\delta \pm \theta)$$

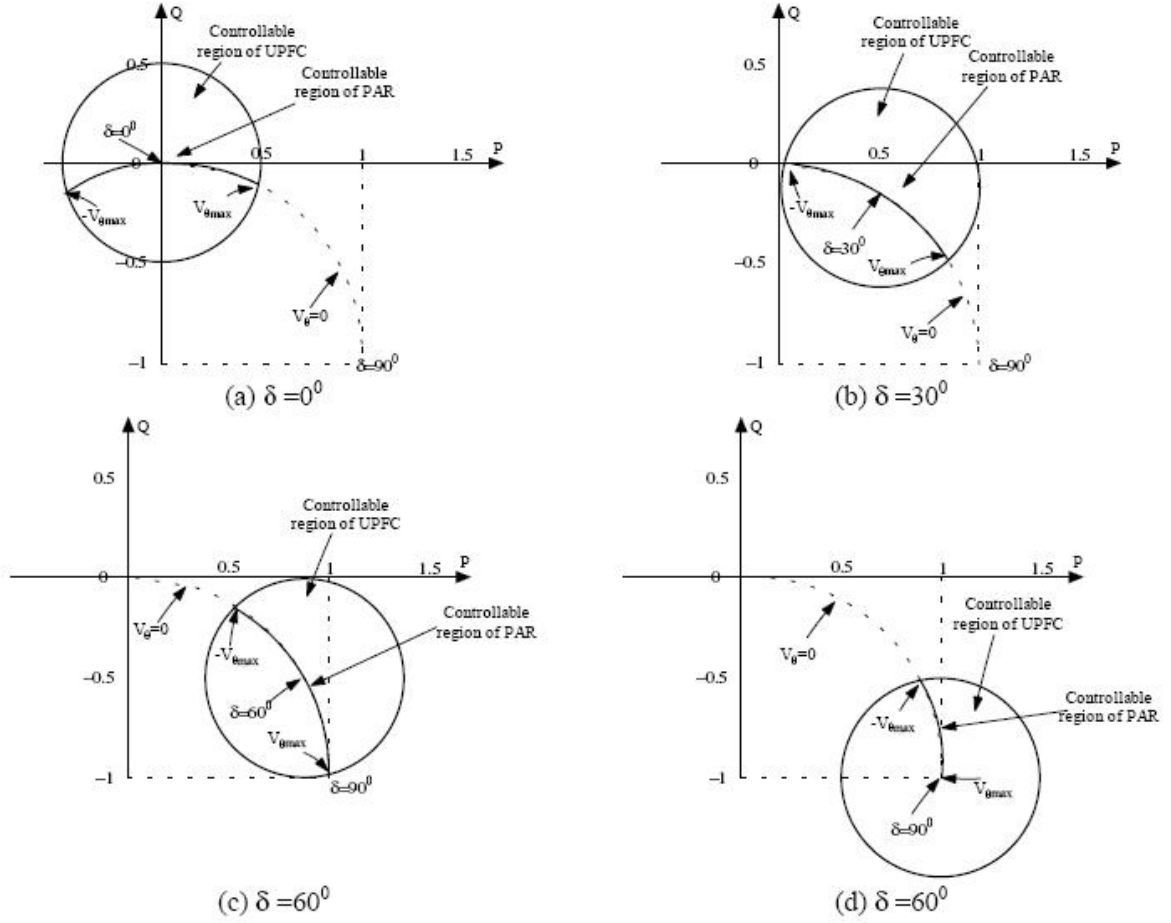
$$Q = \frac{V_S V_R}{X} \cos(\delta \pm \theta) - \frac{V_R^2}{X} \quad (66)$$

Şekil 4.11'deki kalın çizgiler TSSC/GCSC nin kontrol edilebilir bölgesini sunar ve noktalı çizgiler, SSSC/TCSC nin $\delta = 0^0, 30^0, 60^0, 90^0$ deki kontrol edilebilir bölgeyi sunar. Şekil 4.12 [30], $-30^0 < \theta < 30^0$ aralığında değişen θ ile $\delta = 0^0, 30^0, 60^0, 90^0$ de PAR ile birlikte elde edilmiş P ve Q değerlerini gösterir. Her iki şekil de $V_S = V_R = V$ ve $\frac{V^2}{X} = 1$ için çizilmiştir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'nin her ikisi için de 0.5 açısıyla UPFC çevresel kontrol bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Çeşitli açılarda UPFC ve seri kompanzator kontrollü iletim hattında P-Q ilişkisi.

Kontrol edilebilir seri kompanzatorlarla elde edilebilen iletilmiş reel güçteki maksimum artış δ güç açısına bağlıdır. Faz açısı ne kadar büyük olursa iletilen reel güçteki maksimum artış da o kadar büyük olacaktır. Kontrol edilebilir seri kompanzatorlar, alma sonunda talep edilen reaktif gücün bağımsız kontrolüne izin vermezler. Reaktif güç, iletilmiş reel güçle tanımlanabilir. PAR, θ faz kayma açısını ayarlayarak reel gücü değiştirebilir. Maksimum iletilen gücü artıramaz. Bunun yanı sıra reaktif gücün bağımsız kontrolüne de izin vermez. UPFC, hem reel hem de reaktif gücü bağımsızca kontrol edebilir. Bağımsız δ güç açısının güç kontrolü için daha geniş aralıkta izin verir.



Şekil 4.12. Çeşitli açılarda UPFC ve PAR kontrollü iletim hattında P-Q ilişkisi.

4.2. UPFC Modelleme ve Arayüz

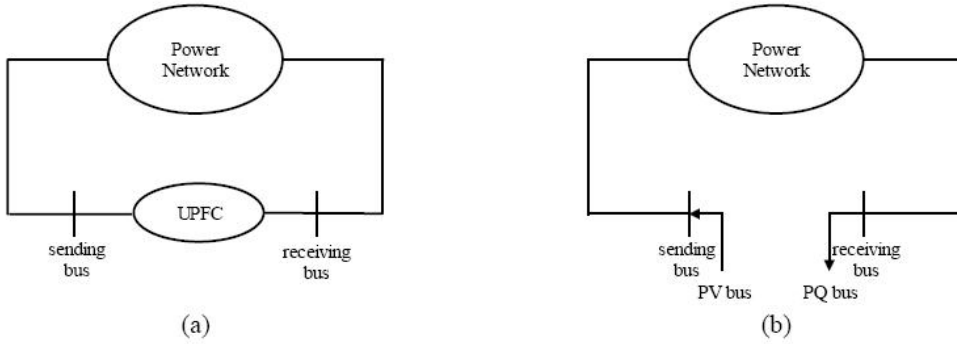
UPFC içeren bir güç sistemi simüle edilirken, UPFC, kalıcı durum ve dinamik operasyonlar için modellenmesi gerekir. UPFC modeli, güç sistem modeliyle arayüze ihtiyaç duyar.

Kalıcı durum işlemi için, DC link voltajı sabit bir değerdedir. DC link voltajı kaybı durumunda, shunt konvertere $P_{SH} = \text{Re}(\bar{V}_{SH} \bar{I}_{SH}^*)$ desteklenen reel güç, seri konverter $P_{SH} = \text{Re}(\bar{V}_{SE} \bar{I}_{Line}^*)$ tarafından talep edilen reel güce uyum sağlar.

$$P_{SH} = P_{SE} \quad (67)$$

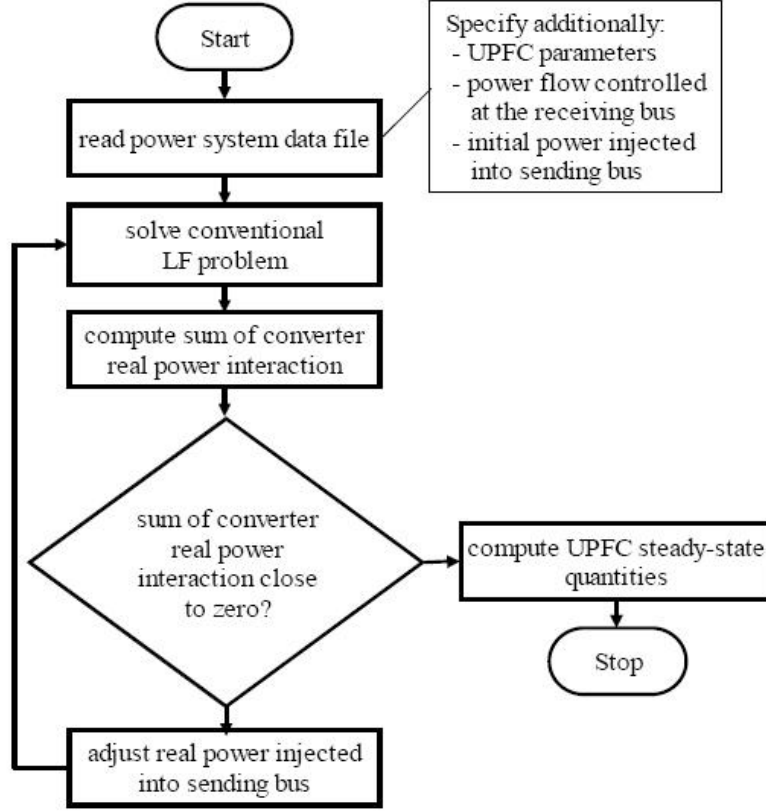
Burada bahsedilen LF modeli şudur: UPFC şunları saklayarak işlev görür (i) alma barasındaki reel ve reaktif güç akışları ve (ii) spesifik değerlerde gönderme bara voltaj

genliği. Bu durumda, UPFC, Şekil 4.13'te de gösterildiği gibi gönderme barasında (PV tipli bara-yük akış terminolojisi) bir eşdeğer jeneratör ve alma barasında (PQ tip bara) bir yük ile yerdeđiŐebilir. UPFC ile göç ağı için LF zm elde etmede, iteratif bir prosedür gereklidir. Alma barasında talep edilen güç, aynı barada beklenen reel ve reaktif glere de hazırdır. Geleneksel LF algoritması için bir PV barasına enjekte edilmiş reel g sabit tutulur ve önceden tahmin edilen voltaj genliğine ulaŐmak için reaktif güç ayarlanır. UPFC ile, gönderme barasına enjekte edilmiş reel g tam olarak bilinemez. Bu reel g enjeksiyonu, alma barasındaki önceden tahmin edilen reel güç akıŐına eşit bir değerde başlatılır. Reel g düzenlemesinin iteratif prosedürü boyunca, shunt ve seri empedansların kayıpları göz ardı edilir ve konverterlerin keŐiŐiminin toplamı sıfıra eŐitlenir.



Şekil 4.13. UPFC'li g ağı a)Şematik b) Güç Akış Modeli.

Şekil 4.14'te algoritmanın grafiksel formu verilmiştir:



Şekil 4.14. Güç Akış Algoritması.

Gerekli hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

Gönderme barasına enjekte edilmiş kompleks güç:

$$\bar{S}_S = \bar{V}_S \bar{I}_S^* \quad (68)$$

Şekil 4.3'teki voltaj ve akımlar kullanılarak;

$$\bar{V}_S = \bar{V}_{SH} + \bar{V}_{ZSH}$$

$$\bar{V}_{ZSH} = \bar{I}_{SH} Z_{SH}$$

$$\bar{I}_S = -\bar{I}_{SH} - \bar{I}_{Line} \quad (69)$$

Buradan

$$\begin{aligned} S_S &= (\bar{V}_{SH} + \bar{V}_{ZSH})(-\bar{I}_{SH} - \bar{I}_{Line})^* \\ &= -\bar{V}_{SH} \bar{I}_{SH}^* - \bar{V}_{ZSH} \bar{I}_{SH}^* - \bar{V}_{SH} \bar{I}_{Line}^* - \bar{V}_{ZSH} \bar{I}_{Line}^* \\ &= -\bar{V}_{SH} \bar{I}_{SH}^* - Z_{SH} \bar{I}_{SH}^* - \bar{V}_{SH} \bar{I}_{Line}^* - Z_{SH} \bar{I}_{SH} \bar{I}_{Line}^* \end{aligned} \quad (70)$$

Bara voltajlarını kullanarak hat akımı hesabı ve yük akış çözümünde verildiği gibi alma barasındaki güç akışı:

$$\bar{I}_{Line} = -\frac{S_R^*}{\bar{V}_R} \quad (71)$$

Seri enjekte voltajı ve güç sistemiyle seri konverterin kesişimi

$$\begin{aligned} \bar{V}_{SE} &= \bar{I}_{Line} Z_{SE} + \bar{V}_R - \bar{V}_S \\ P_{SE} &= \text{Re}(\bar{V}_{SE} \bar{I}_{Line}^*) \end{aligned} \quad (72)$$

(70) in reel kısmını alarak ve (67) yi kullanarak, gönderme barasındaki yeni enjekte edilmiş reel güç şöyle olur:

$$P_S = -P_{SE} + \text{Re}(-Z_{SH} I_{SH}^2 - \bar{V}_{SH} \bar{I}_{Line}^* - Z_{SH} \bar{I}_{SH} \bar{I}_{Line}^*) \quad (73)$$

Şekil 4.14'ten görüleceği üzere, (61) uyan geleneksel LF çözümünden sonra direk olarak UPFC kontrol parametreleri hesaplanmış olur. Transformator kayıpları ihmal edilip, beklenen LF algoritmasının yakınsaması, reel güç akışı kontrol edilmiş hatta gönderme barasından reel güç enjekte edilmesi başlatıcıları, bir adımda elde edilir.

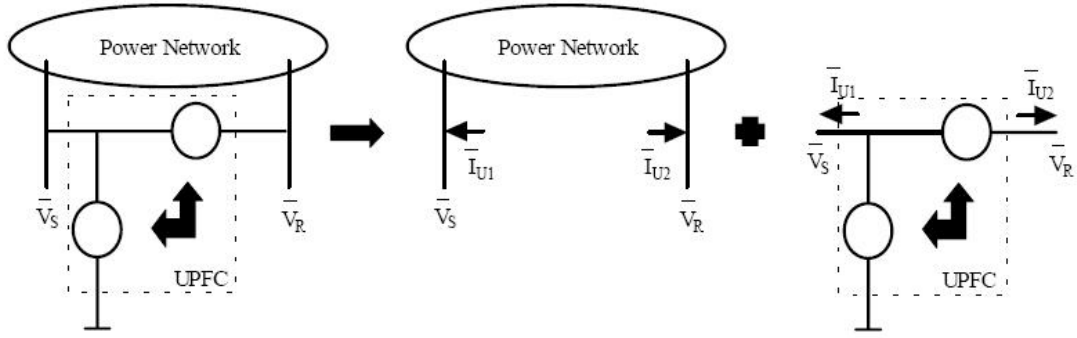
4.3. UPFC Dinamik Model

Geçici rejim çalışmaları için, DC link dinamikleri dikkate alınabilir. DC link kapasitörü sistemle birlikte enerji değiş tokuşu yapacak ve voltajı değişecektir. Güç frekans dinamik modeli aşağıdaki denklemlerle tanımlanabilir[33,34]:

$$CV_{DC} \frac{dV_{DC}}{dt} = (P_{SH} - P_{SE}) S_B \quad (74)$$

Yukarıdaki denklemde şuna dikkat edilmelidir: ac sistem değişkenleri per ünit miktarlarla açıklandığında DC değişkenler MKSA birimlerinde açıklanmıştır. S_B sistem beyz gücüdür.

Şekil 4.15 [34]'te UPFC'nin arayüzü gösterilmiştir. Ağ çözümünü (bara voltajları ve akımlar) yapmak için iteratif bir yaklaşım kullanılır. UPFC \bar{V}_S ve \bar{V}_R gönderme ve alma bara voltajları, denklem 81'deki \bar{V}_{SH} ve \bar{V}_{SE} UPFC enjeksiyon voltajları ve \bar{E}_G internal jeneratör voltajlarının bir fonksiyonu gibi tanımlanabilir. Çıkış kontrolü ve UPFC enjeksiyon voltaj genlikleri V_{SH} ve V_{SE} yi tanımlar. Buna rağmen, enjekte edilmiş voltajların faz açıları δ_{SH} ve δ_{SE} , ağ çözümünün bir sonucu olan gönderme bara voltajının faz açısına δ_S bağlı olduğundan dolayı bilinemez. Şekil 4.16'da güç ağıyla UPFC arayüzü için algoritmanın grafik arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 4.15. UPFC arayüzü.

Gerekli hesaplamalar aşağıda belirtilmiştir.

Jeneratör internal baralarına ve UPFC terminal baralarına bara admitans matrisi azaltılarak denklem şöyle yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GU} \\ Y_{UG} & Y_{UU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_G \\ \bar{V}_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_G \\ \bar{I}_U \end{bmatrix} \quad (75)$$

burada:

Y_{GG} - jeneratör akım enjeksiyonunu internal jeneratör voltajlarına bağlayan azaltılmış admitans matrisi

Y_{GU} - jeneratör akımlarını UPFC baralarındaki voltajlara göre veren admitans matris komponenti

Y_{UG} - UPFC akımlarını jeneratör internal voltajlarının terimleriyle veren admitans matris komponenti

Y_{UU} - UPFC baralarındaki voltajlara UPFC akımlarını bağlayan admitans matrisi

\bar{E}_G - jeneratör internal bara voltajlarının vektörü

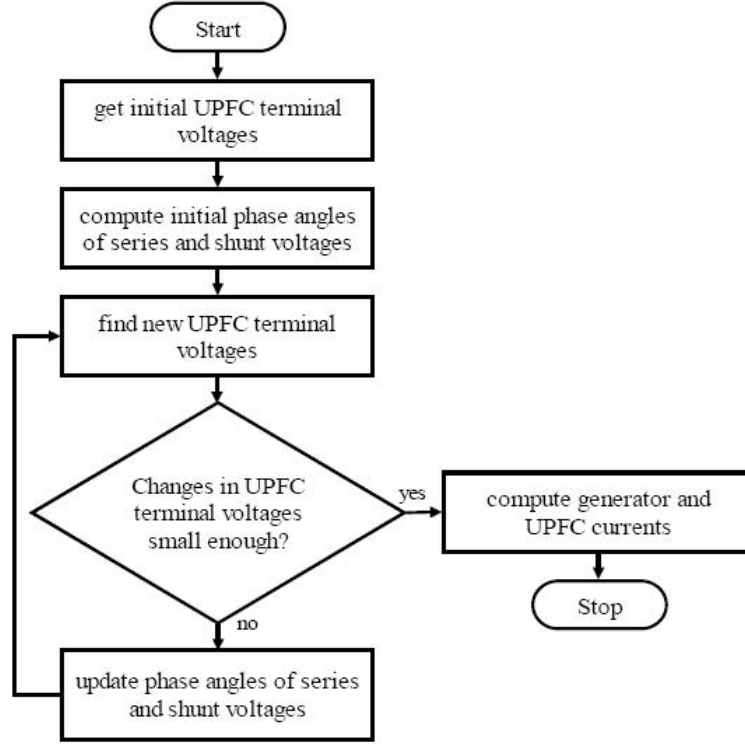
\bar{V}_U - UPFC ac bara voltajları vektörü

\bar{I}_G - jeneratör akım enjeksiyonları vektörü

\bar{I}_U - güç ağına enjekte edilmiş UPFC akımlarının vektörü

İkinci denklem şöyledir:

$$\bar{I}_U = Y_{UG} \bar{E}_G + Y_{UU} \bar{V}_U \quad (76)$$



Şekil 4.16. UPFC ‘yi güç ağıyla bağdaştıran algoritma.

Seri ve shunt transformatör rezistanslarını ihmel ederek, güç ağına enjekte edilmiş UPFC akımları için aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{U1} &= -\bar{I}_{SH} - \bar{I}_{Line} \\ \bar{I}_{U2} &= \bar{I}_{Line}\end{aligned}\quad (77)$$

$$\bar{I}_{SH} = \frac{\bar{V}_S - \bar{V}_{SH}}{jx_{SH}} \quad (78)$$

$$\bar{I}_{Line} = \frac{\bar{V}_{SE} + \bar{V}_S - \bar{V}_R}{jx_{SE}} \quad (79)$$

Yukarıdaki denklemleri birleştirerek aşağıdaki denklem ortaya çıkar:

$$\bar{I}_U = W_U \bar{V}_U + W_C \bar{V}_C \quad (80)$$

burada:

$$W_C = \begin{bmatrix} \frac{1}{jx_{SH}} & -\frac{1}{jx_{SE}} \\ jx_{SH} & \frac{1}{jx_{SE}} \\ 0 & \frac{1}{jx_{SE}} \end{bmatrix} \quad W_U = \begin{bmatrix} -\frac{1}{jx_{SE}} & -\frac{1}{jx_{SH}} & \frac{1}{jx_{SE}} \\ \frac{1}{jx_{SE}} & & -\frac{1}{jx_{SE}} \end{bmatrix}$$

$$\bar{I}_U = \begin{bmatrix} \bar{I}_{U1} \\ \bar{I}_{U2} \end{bmatrix} \quad \bar{V}_U = \begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{V}_R \end{bmatrix} \quad \bar{V}_C = \begin{bmatrix} \bar{V}_{SH} \\ \bar{V}_{SE} \end{bmatrix}$$

Denklem (76) ve (80) ile aşağıdaki denklem yazılabilir

$$\bar{V}_U = (W_U - Y_{UU})^{-1} Y_{UG} \bar{E}_G - (W_U - Y_{UU})^{-1} W_C V_C = L_G \bar{E}_G + L_C \bar{V}_C \quad (81)$$

(81) den (75) çıkarıldığında:

$$\begin{aligned} \bar{I}_G &= M_G \bar{E}_G + M_C \bar{V}_C \\ \bar{I}_U &= M_{G1} \bar{E}_G + M_{C1} \bar{V}_C \end{aligned} \quad (82)$$

burada:

$$\begin{aligned} L_G &= (W_U - Y_{UU})^{-1} Y_{UG} & M_G &= Y_{GG} + Y_{GU} L_G & M_C &= Y_{GU} L_C \\ L_C &= -(W_U - Y_{UU})^{-1} W_C & M_{G1} &= Y_{UG} + Y_{UU} L_G & M_{C1} &= Y_{UU} L_C \end{aligned}$$

Tanımlayarak:

$$\bar{I} = \begin{bmatrix} \bar{I}_G \\ \bar{I}_U \end{bmatrix} \quad \bar{V} = \begin{bmatrix} \bar{E}_G \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} M_G & M_C \\ M_{G1} & M_{C1} \end{bmatrix}$$

(82) şöyle olur:

$$\bar{I} = M \bar{V} \quad (83)$$

dq transformasyonunu uygulayarak:

$$T = \begin{bmatrix} e^{j(90-\delta_1)} & & \\ & \cdot & \\ & & e^{j(90-\delta_n)} \\ & & & e^{j90} \end{bmatrix} \quad (84)$$

Aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\bar{I}_{dq} = M_{dq} \bar{V}_{dq} \quad (85)$$

UPFC DC link denklemini tekrar şöyle yazılabilir:

$$CV_{DC} \frac{dV_{DC}}{dt} = S_B (V_{SHd} I_{SHd} + V_{SHq} I_{SHq} - V_{SEd} I_{lined} - V_{SEq} I_{lineq})$$

veya

$$(86)$$

$$CV_{DC} \frac{dV_{DC}}{dt} = S_B (-V_{SHd} I_{U1d} - (V_{SHd} + V_{SEd}) I_{U2d} - V_{SHq} I_{U1q} - (V_{SHq} + V_{SEq}) I_{U2q})$$

burada:

$$V_{SHd} = -\frac{m_{SH} V_{DC}}{2\sqrt{2} n_{SH} V_B} \sin \delta_{SH} \quad V_{SHq} = \frac{m_{SH} V_{DC}}{2\sqrt{2} n_{SH} V_B} \cos \delta_{SH}$$

$$V_{SEd} = -\frac{m_{SE} V_{DC}}{2\sqrt{2} n_{SE} V_B} \sin \delta_{SE} \quad V_{SEq} = \frac{m_{SE} V_{DC}}{2\sqrt{2} n_{SE} V_B} \cos \delta_{SE}$$

şeklinde bulunur.

5. KONTROLÖRLER

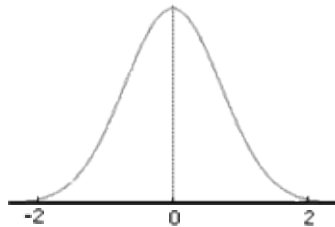
Bu tezde RBFNN, POD ve PSS kontrolörler kullanılmıştır. Bu bölümde bu kontrolörlere kısaca değinilecektir.

5.1. RBFNN (RADIAL BASIS FUNCTION NEURAL NETWORK)

Katmanlı YSA' nın tasarımında eğitici geriye yayılım öğrenme algoritması bir en iyileme uygulamasıdır. Radyal tabanlı fonksiyon ağı tasarımı(RBFNN) ise çok boyutlu uzayda eğri uydurma yaklaşımıdır ve bu nedenle RBFNN' nin eğitimi, çok boyutlu uzayda eğitim verilerine en uygun bir yüzeyi bulma problemine dönüşür. RBFNN' nin genellemesi ise test verilerini interpolate etmek amacıyla, eğitim sırasında bulunan çok boyutlu yüzeyin kullanılmasına eşdeğerdir. Radyal tabanlı fonksiyonlar, sayısal analizde çok değişkenli interpolasyon problemlerinin çözümünde kullanılmış ve YSA' nın gelişmesi ile birlikte bu fonksiyonlardan YSA tasarımında yararlanılmıştır. RBFNN, ileri beslemeli YSA yapılarına benzer şekilde giriş, orta ve çıkış katmanından oluşur ancak, giriş katmanından orta katmana dönüşüm, radyal tabanlı aktivasyon fonksiyonları ile doğrusal olmayan sabit bir dönüşümdür. Orta katmandan çıkış katmanına ise uyarlamalı ve doğrusal bir dönüşüm gerçekleştirilir. Radial basis functions (RBF) bir kısım fonksiyonlardan oluşmaktadır. RBF' nin temel özelliği şudur: merkezden uzaklık arttığında veya azaldığında fonksiyonun cevabı azalır veya artar. RBF için verilebilecek en tipik örnek Gauss fonksiyonudur ve şöyle tanımlanır:

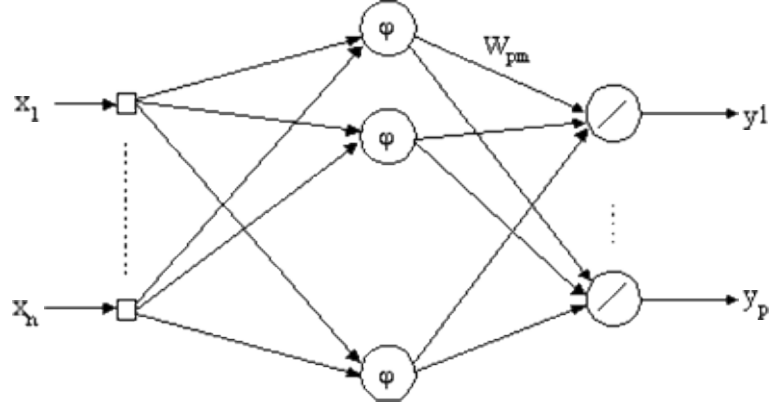
$$h(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{r^2}\right) \quad (87)$$

$c=0$ ve $r=1$ olduğu zaman grafik Şekil 5.1'deki gibidir:



Şekil 5.1. Gauss function.

Radyal tabanlı fonksiyonlar en basit fonksiyonlar sınıfındadır. Teorik olarak RBF farklı modellerde (lineer ve nonlinear) ve farklı ağlarda (çok katmanlı ve tek katmanlı) kullanılabilir. Genelde RBFNN tek katmanlı yapılarla tanımlanır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. RBFNN'nin yapısı.

Eğri uydurma teorisi, herhangi bir çok değişkenli ve sürekli $f(x)$ fonksiyonunu yaklaştırma ya da interpolate etme problemi ile ilgilidir. İnterpolasyon problemi, $k=1,2,\dots,N$ için x_k – veri noktası ve d_k -gerçek değerler olmak üzere $F(x_k)=d_k$ interpolasyon koşulunu sağlayan $F(\cdot)$ fonksiyonunun bulunması olarak tanımlanır. Radyal tabanlı fonksiyonlarla doğrusal $F(\cdot)$; denklem 88'teki gibi tanımlanır.

$$F(x) = \sum_{k=1}^N w_k h_k (\|x - x_k\|) \quad (88)$$

$\varphi(\cdot)$ - doğrusal olmayan radyal tabanlı fonksiyonu, $\| \cdot \|$ - genellikle standart öklit uzaklığıdır. Bilinen veri noktaları, radyal tabanlı fonksiyonların merkezleri olarak söylenir. RBFNN'nin genel yapısında veri örneği kadar orta katman hücresine ve ağırlığa gerek duyulduğundan genel çözümü yakınsayan en iyi çözüm aranır. $M < N$ olmak üzere RBFNN çıkışı,

$$F^*(x) = \sum_{i=1}^M W_i \varphi_i (\|x - c_i\|) \quad (89)$$

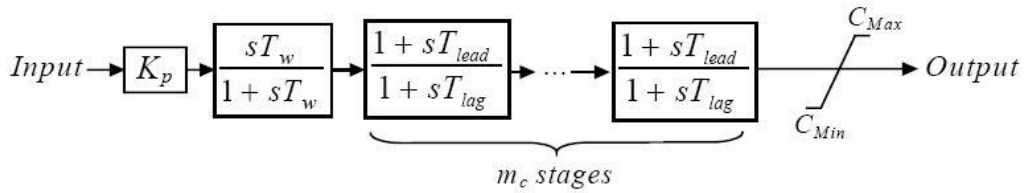
Burada c_i – veri noktalarından belirlenecek olan radyal tabanlı fonksiyonların merkez vektörleridir.

RBFNN’de uyarlanabilecek serbest parametreler; merkez vektörleri, radyal fonksiyonların genişliği ve çıkış katman ağırlıklarıdır. Çıkış katmanı doğrusal olduğundan ağırlıklar, eğim düşme yada doğrusal en iyileme yöntemleri ile kolayca bulunabilir. Merkezler, girişler arasından rastgele ve sabit olarak seçilebilmekle birlikte RBFNN’nin performansını iyileştirmek amacıyla merkez vektörlerinin ve genişliğin uyarlanması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Merkez vektörleri, eğim düşme yöntemine göre eğitici öğrenme algoritması ile uyarlanarak, dik en küçük kareler yöntemi ile, yada kendiliğinden düzenlemeli yöntemle giriş örneklerinden öbekleme yapılarak belirlenebilir.

Tez uygulamasında RBFNN için, UPFC’nin gönderme barasından hattaki toplam güç akışından türetilen giriş sinyalleri kullanılmıştır. Bu giriş sinyalleri tie-line daki güç akışındaki sapmalardan etkilenir. Çıkış sinyali ise sönüm sinyalidir.

5.2. POD (Power Oscillation Damping) ve PSS (Power System Stabilizer)

İki tür güç osilasyon sönüm kontrolörü vardır: PSS ve POD. PSS, hız değişikliğine orantılı olarak elektriksel tork üreterek elektromekanik osilasyonların sönümünü artırmada jeneratörün uyarım sistemi gibi çalışır. Genellikle PSS, lokal elektromekanik osilasyonları sönümlmek için dizayn edilir. POD kontrolörler, güç sistemi osilasyon sönümünü sağlar.



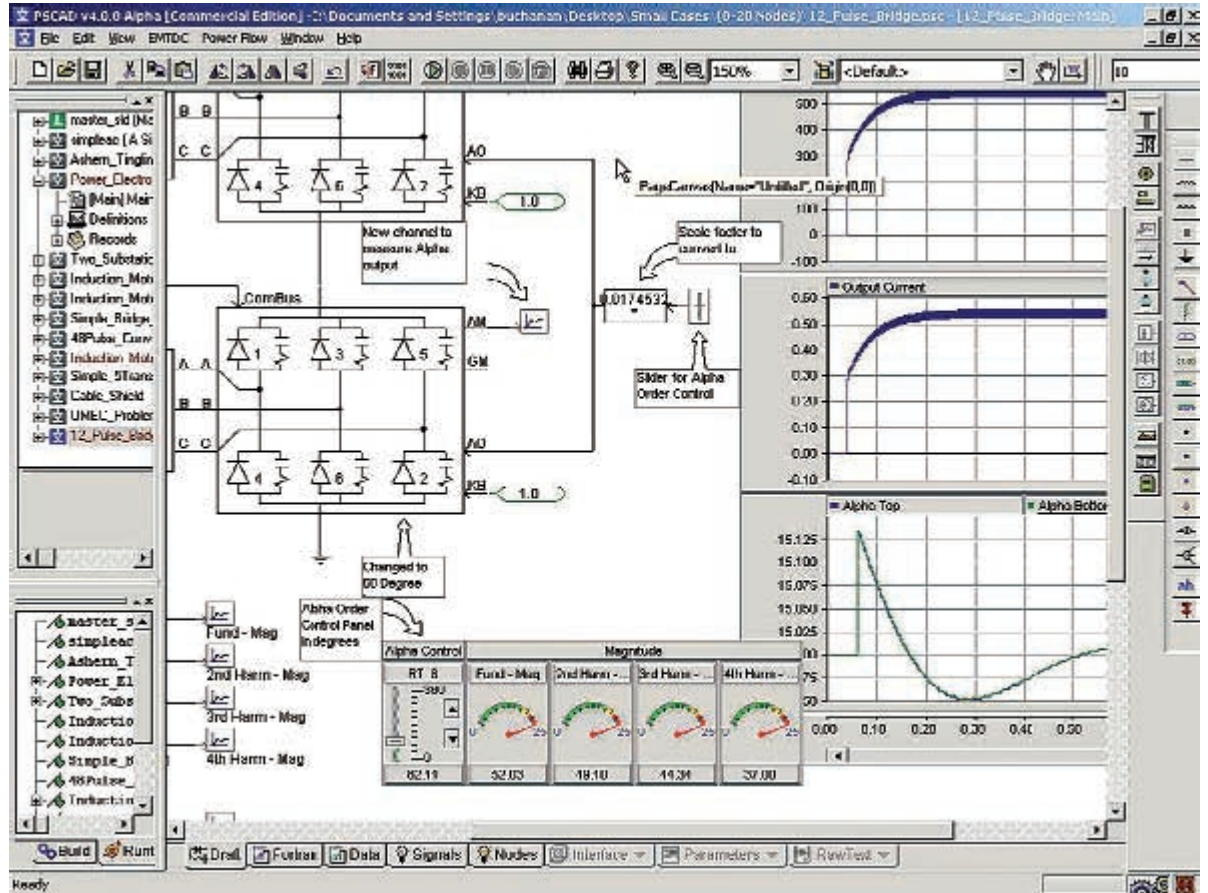
Şekil 5.3. FACTS POD kontrolör.

POD kontrolör, FACTS terminal voltajları veya FACTS elemanının üzerinden geçen aktif güç akışını giriş sinyali olarak kullanır, çıkış sinyali olarak da FACTS POD kontrolör tarafından sağlanan sönüm kontrol sinyalini kullanılır. Diğer kontrolör parametreleri kontrol sistemleri konularında yer alan lead-lag yapılarının parametreleridir. Örneğin: K_p pozitif sabit kazanç, T_w zaman sabiti, T_{lead} ve T_{lag} lead ve lag zaman sabitleridir. Bu değerler, uygulamada kullanılan bloklarda yer almaktadır.

6. KULLANILAN PROGRAMLAR

UPFC'nin PSS, POD ve RBFNN ile kontrolünde bir MATLAB toolboxı olan PSAT (Power System Analysis Toolbox) kullanıldı. Bunun yanısıra PSCAD (Power System CAD) programı da güç sistem analizinde kullanışlı bir programdır.

6.1. PSCAD (Power System CAD)



Şekil 6.1. PSCAD arayüzü.

PSCAD, kompleks kontrollerde olduğu gibi Esnek AC İletim Sistemleri (FACTS), Yüksek Voltaj DC İletim (HVDC) ve düşük voltajlı güç elektroniği sistemlerinin elektrik devreleri için hazırlanmış bir simülatördür.

PSCAD ile aşağıdaki işlemler gerçekleştirilebilmektedir:

- Güç elektroniği sistemlerinin dizaynı
- MATLAB/Simulink özelliklerinin PSCAD'e aktarılması
- Subsenkron osilasyonlar ve bu osilasyonların sönümü
- Dağıtım sistemleri dizaynı

- Güç kalitesi analizi ve geliştirilmesi

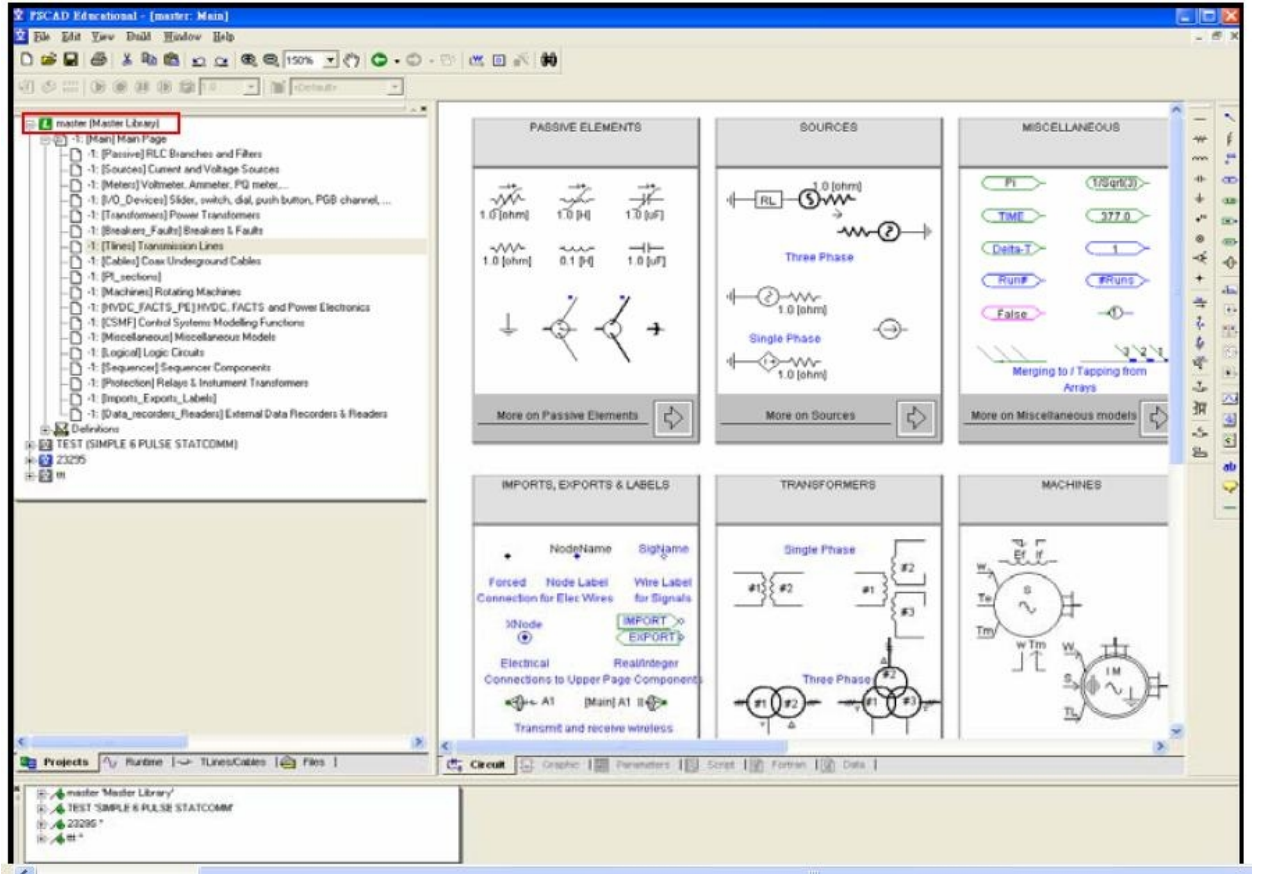
6.1.1.Yeni Bir Model Oluşturma

Yeni bir dosya oluşturmak için aşağıdaki adımlar izlenir:

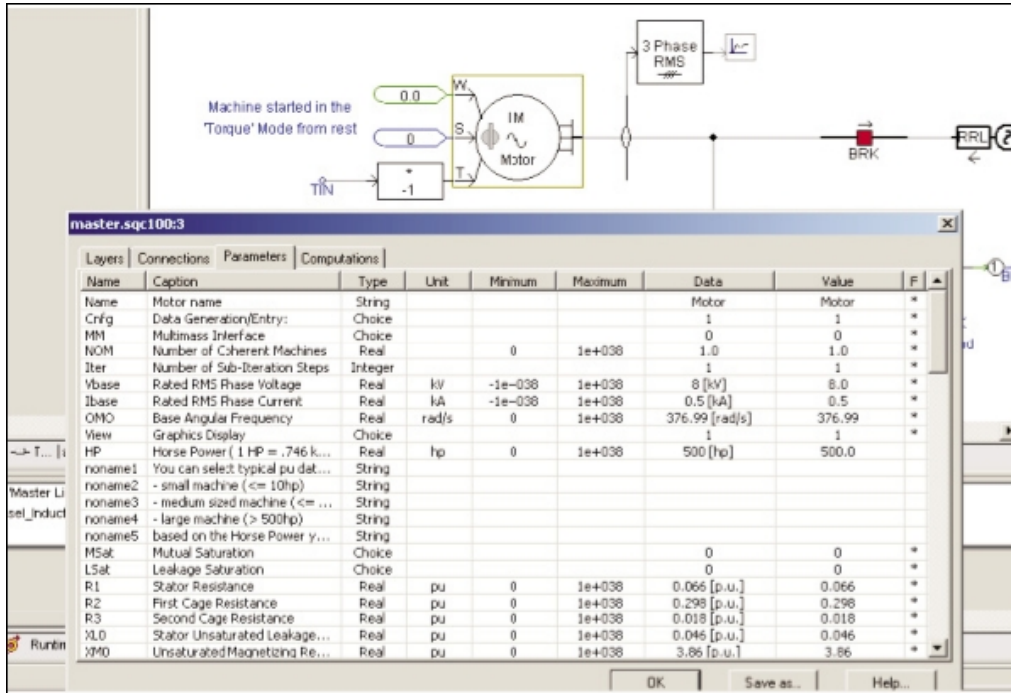
1. PSCAD kütüphanesi (Library) kullanılarak devre tasarlanır.
2. Gerekli sabitler ve zaman ayarlamaları yapılır.
3. Çizdirilecek çıkış fonksiyonları belirlenir.
4. Dosya çalıştırılır, hata olup olmadığı kontrol edilir.
5. Sonucun çıktısı alınır.

6.1.2. Master Library

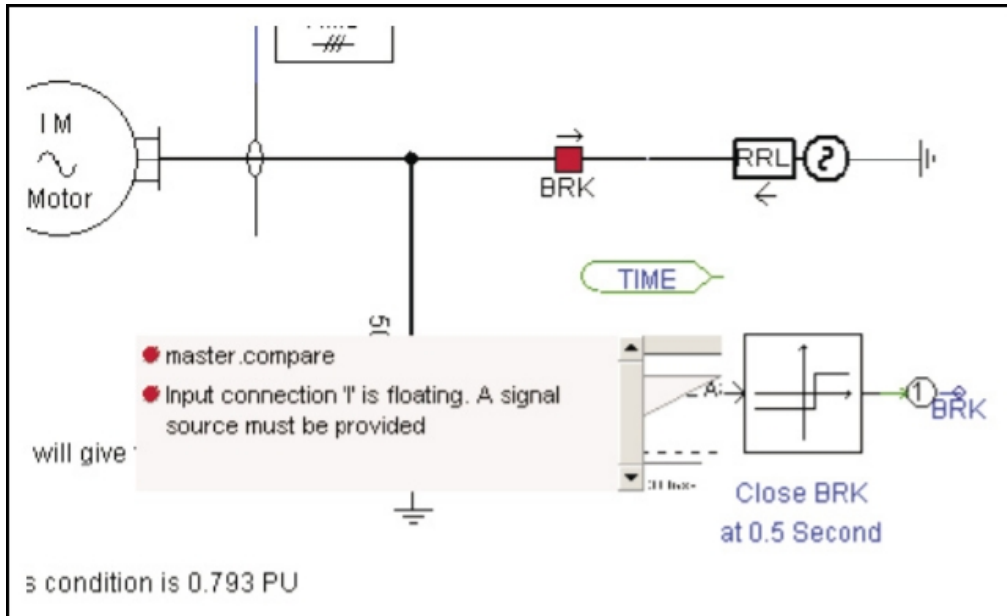
Master Library, PSCAD yüklendiğinde her zaman ekranda yer alır. Burası PSCAD'ın kütüphanesidir ve her komponente buradan ulaşılabilir.



Şekil 6.1.2. PSCAD Master Library.



Şekil 6.1.3. Komponentlerin özelliklerini görme özelliği.

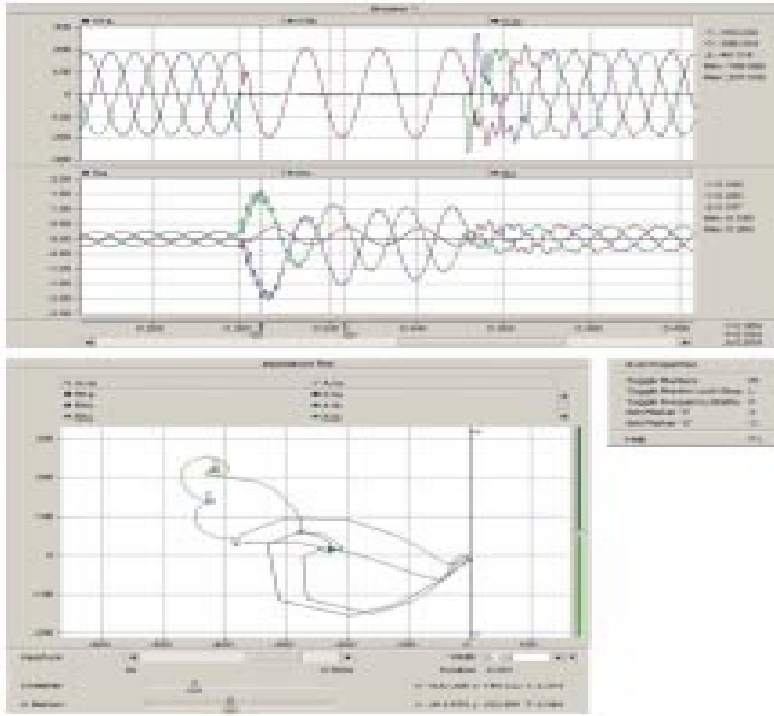


Şekil 6.1.4. Yardımcı mesaj balonları.

6.1.3. Çalışma Prensibi

Master Library; rezistörler, indüktörler, kapasitörler, anahtarlar,vb. komponentleri içerir. Örnek bir model dizaynı yapmak için öncelikle gerekli komponentler ana sayfaya taşınır ve parametreleri düzenlenir. Bunun için fareyle kompenetin üzerine gelip sağ tıklamak

yeterlidir. Tasarım bittikten sonra model çalıştırılır ve grafik simülatörlerden sonuçlar alınır.



Şekil 6.1.5. Grafik ortam.

6.2. PSAT (Power System Analysis Toolbox)

PSAT; güç akışı, devamlı güç akışı, optimal güç akışı, küçük sinyal kararlılık analizi ve zaman domaini simülasyonunu, geleneksel olmayan yükleri, senkron ve asenkron makineleri, regülatörleri ve FACTS ı içeren birkaç statik ve dinamik modellerle birlikte içermektedir. Bunun yanısıra PSAT, grafik arayüzleri ve tek hatlı ağ diyagramlarının Simulink tabanlı editörünü de içermektedir.

Güç sistem analizi için yazılım paketleri iki sınıfa ayrılabilir: ticari yazılımlar ve eğitim/ araştırma amaçlı yazılımlar. Ticari yazılım paketleri piyasadan elde edilebilir (örneğin PSS/E, EuroStag, Simpow, vb.). Ticari yazılımlar kapalıdır yani kaynak kodunu değiştirmeye ve yeni algoritmalar elde etmeye izin vermezler. Araştırma amaçlılar için, kullanım kolaylığı ve esnekliği hesaplamadaki yeteneğinden daha önemlidir. Diğer yandan, güç sistem analizinde kullanılan açık kaynaklı araştırma araçlarında da çeşitlilik vardır. Örneğin UWPFLOW [59] ile devamlı güç akış analizi için robust algoritma oluşturulabilir. Buna rağmen, bu tür bilimsel araçları modifiye etmek, geniş bir programlama yeteneği gerektirmektedir.

Son yüzyılda, araştırma ve eğitim amaçlı bazı yüksek seviye bilimsel diller, Matlab, Mathematica ve Modelica gibi, giderek popüler olmaya başlamıştır. Bu dillerin her biri, güç sistem analizi alanında iyi sonuçlar verebilmektedir [60]; buna rağmen Matlab en iyi seçim olarak karşımıza çıkmaktadır. Matlab'ın temel özellikleri, matris tabanlı programlama olması, gelişmiş çizim yeteneği ve kontrol şema dizaynında grafik ortamı (Simulink) dır. Bu sebeplerden dolayı, bazı Matlab tabanlı ticari, araştırma ve eğitimsel güç sistem araçları ortaya kondu. Örneğin; Power System Toolbox (PST) [61], MatEMTP [62], Toolbox (VST) [63], MatEMTP [64], SimPowerSystems (SPS) [65], Power Analysis Toolbox (PAT) [66] ve Educational Simulation Tool (EST) [67]. Bunların arasında, sadece MatPower ve VST açık kaynaklıdır ve indirilebilir niteliktedir.

Package	PF	CPF	OPF	SSA	TD	EMT	GUI	GNE
EST	✓			✓	✓			✓
MatEMTP					✓	✓	✓	✓
MatPower	✓		✓					
PAT	✓			✓	✓			✓
PSAT	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
PST	✓	✓		✓	✓			
SPS	✓			✓	✓	✓	✓	✓
VST	✓	✓		✓	✓		✓	

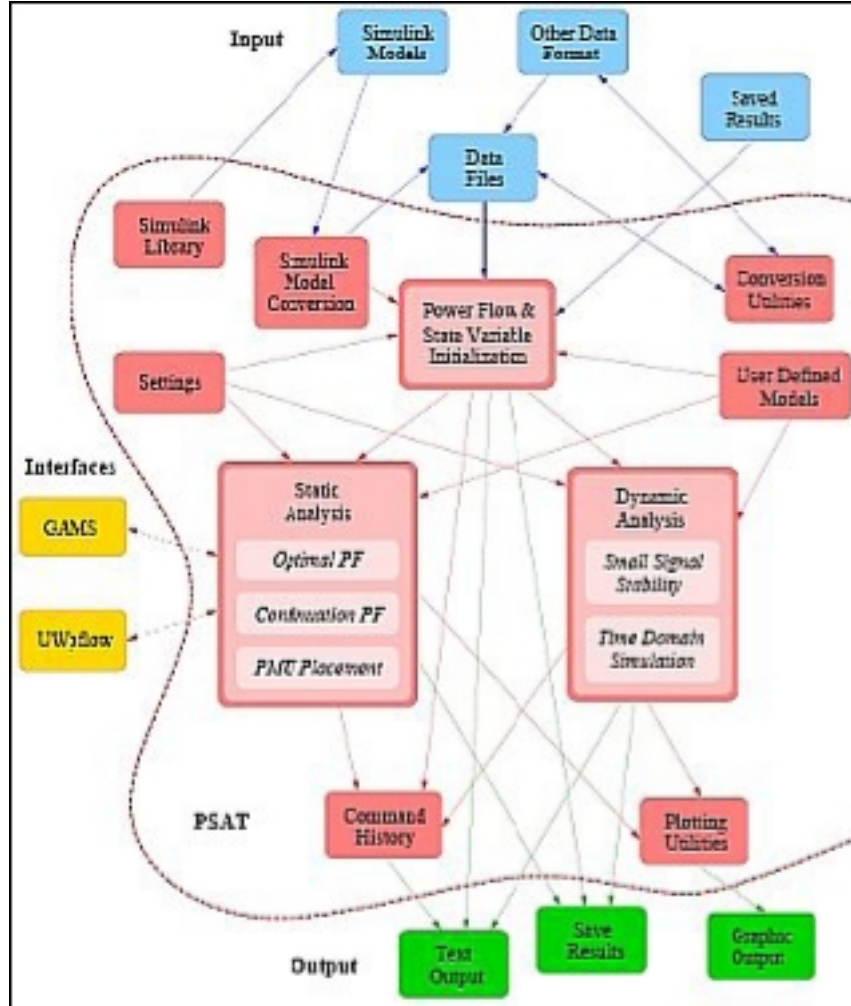
Tablo 6.1. Güç sistem analizi için Matlab tabanlı paket programlar.

Bu çalışma yeni bir Matlab tabanlı güç sistem analiz aracını (PSAT) tanımlamaktadır[68]. PSAT; güç akışı, devamlı güç akışı, optimal güç akışı, küçük sinyal kararlılık analizi ve zaman domaini simülasyonunu içermektedir. Tablo 6.1 güç sistemi analizi Matlab tabanlı araçların bir karşılaştırmasını içermektedir. Tabloda yer alan özellikler şunlardır: güç akışı (PF), devamlı güç akışı ve voltaj kararlılık analizi (CPF-VS), optimal güç akışı (OPF), küçük sinyal kararlılık analizi(SSA), zaman domaini simülasyon (TD),grafik kullanıcı arayüzü (GUI) ve grafik network editörü (GNE).

6.2.1. PSAT ÖZELLİKLERİ

A. Genel

Şekil 6.2.1’ de PSAT’ın sinoptik şeması gösterilmiştir.



Şekil 6.2.1. PSAT’ın sinoptik şeması.

Güç akışı çözüldüğünde, kullanıcı statik ve dinamik analizi çalıştırır. Bunlar :

1. Devamlı Güç Akışı (CPF)
2. Optimal Güç Akışı (OPF)
3. Küçük Sinyal Kararlılık Analizi
4. Zaman Domani simülasyonlar.

PSAT aşağıdaki statik ve dinamik model çeşitlerini destekler:

- Güç Akış Data: baralar, iletim hatları ve transformatörler, slack baralar, PV jeneratörleri, sabit güç yükleri ve shunt admitanslar.
- Market Data: güç destek limitleri, jeneratör güç rezervleri.

- Anahtarlar: iletim hattı hataları ve kesiciler.
- Ölçümler: bara frekans ölçümleri
- Yükler: voltaja bağımlı yükler, frekans bağımlı yükler, ZIP yükler, termostatik kontrollü yükler[69].
- Makineler: senkron makineler ve indüksiyon motorları.
- Kontroller: Türbin Governorlar, AVRler, PSSler.
- Regülasyon Transformatörleri: load tap changers, faz kaydırma transformatörleri.
- FACTS: SVCler, TCSCler, SSSCler, UPFClcr.

Matematiksel algoritma ve modellerin yanısıra, PSAT değişik ek araçları da içermektedir [Tablo 6.2] . Bunlar:

1. Grafikscl kullanıcı arayüzü
2. Simulink kütüphanesi
3. Diğer formattan bir diğerine data çevirimi.
4. Kullanıcı tanımlı model editörü
5. Komut satırı kullanımı.

Function	Matlab	GNU/Octave
Continuation power flow	yes	yes
Optimal power flow	yes	yes
Small signal stability analysis	yes	yes
Time domain simulation	yes	yes
GUIs and Simulink library	yes	no
Data format conversion	yes	yes
User defined models	yes	no
Command line usage	yes	yes

Tablo 6.2. MATLAB ve GNU platformlarında fonksiyon yeterliliği.

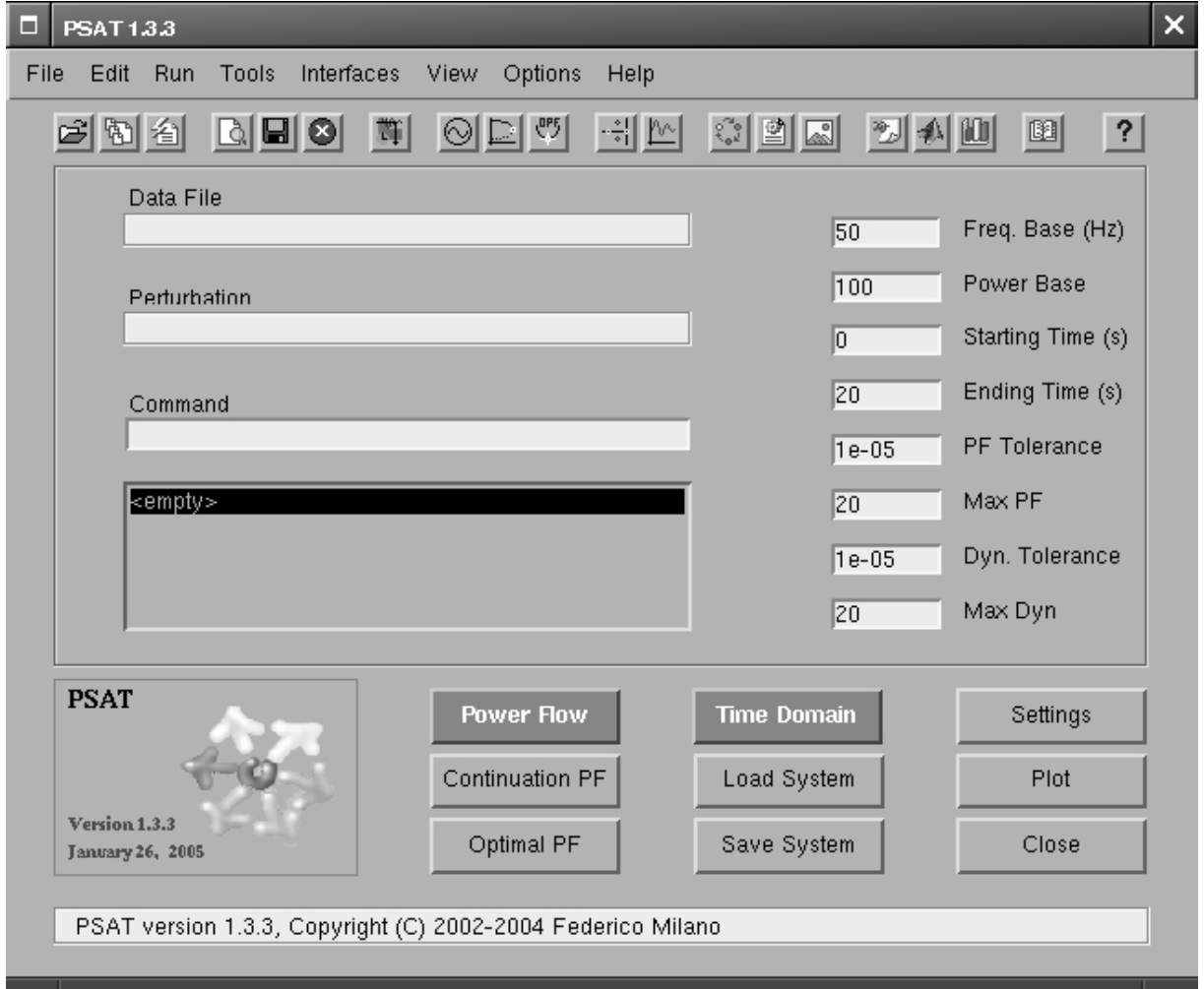
B. PSAT Başlangıç

Matlab promptunda aşağıdaki şekilde yazılarak PSAT'a erişilir:

```
>>psat
```


Böyle yaparak, toolbox için gerekli tüm yapılar oluşturulmuş olur ve ana GUI penceresi açılır (Şekil 6.2.2).PSAT'ta düzenlenmiş prosedürlerin hepsine menüler, butonlar ve kısayollarla erişilebilir.

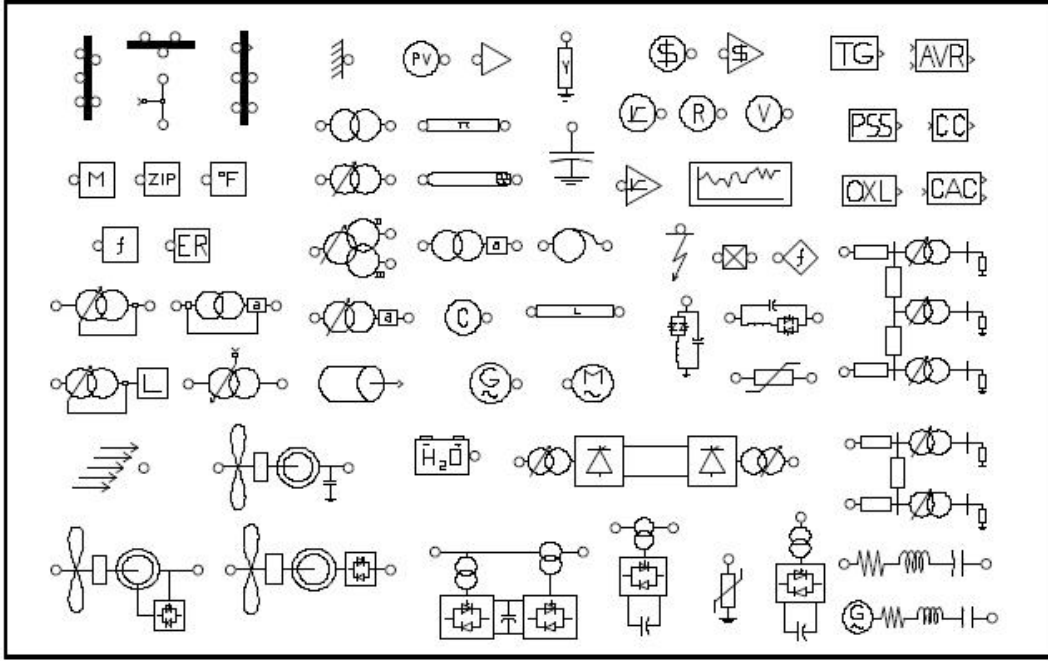
Ana ayarlar, sistem tabanı veya Newton-Raphson metotlarının maksimum iterasyon sayısı gibi ayarlar, ana pencerede görülmektedir. Diğer sistem parametreleri ve spesifik algoritma ayarları GUI lerle ilgilidir.



Şekil 6.2.2. PSAT'ın Ana Grafik Arayüzü.

C. Simulink Kütüphanesi

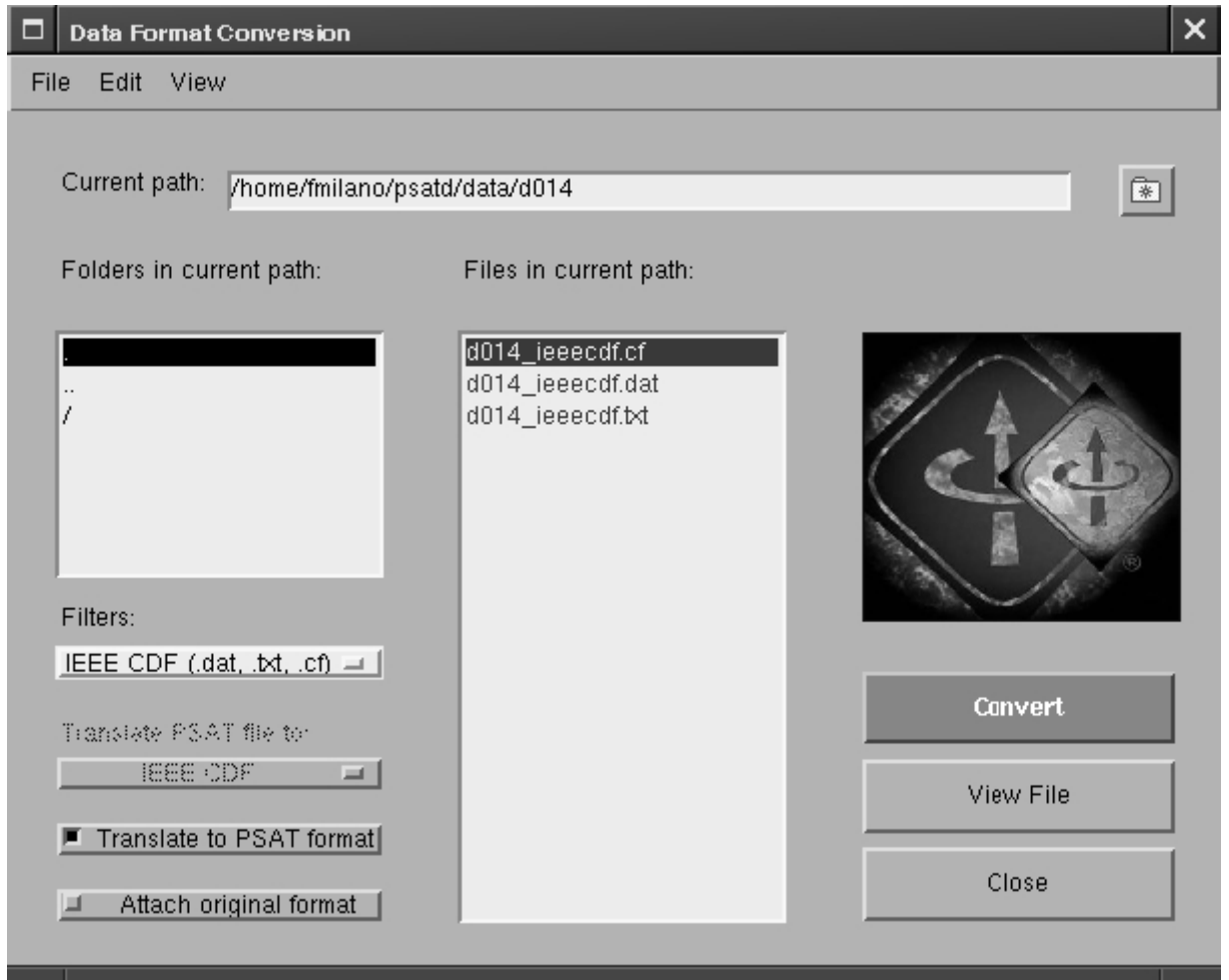
PSAT, elektriksel şemalar çizmeye izin verir. Şekil 6.2.3 tüm PSAT-Simulink kütüphanesini göstermektedir.



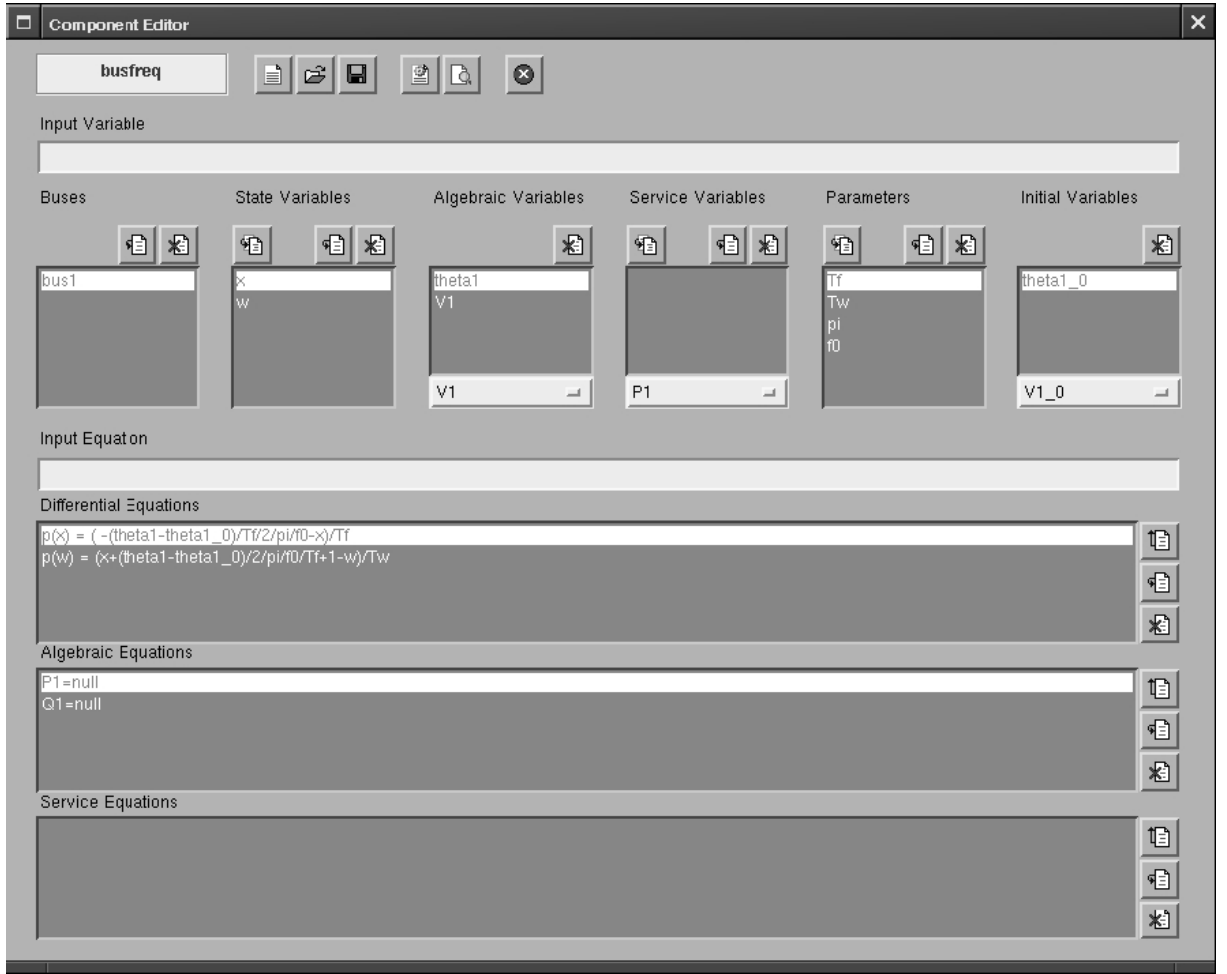
Şekil 6.2.3. PSAT Simulink Kütüphanesi

D. Data Dönüşümü ve Kullanıcı Tanımlı Modeller

PSAT şu formatlar arası dönüşüm yapmaya izin verir: IEEE, EPRI, PTI, PSAP, PSS/E, CYME, MatPower ve PST (Şekil 6.2.4).Kullanıcı tanımlı Model(UDM) aracı, kullanıcıların kendi modellerini oluşturmalarına olanak sağlar(Şekil 6.2.5).



Şekil 6.2.4. Data format dönüşümü için GUI.



Şekil 6.2.5. Kullanıcı Tanımlı Modeller için GUI.

E. Komut Satırı Kullanımı

GUI'ler eğitim amaçlı durumlar için kullanışlıdır. Bu sebeple PSAT, bir komut satırı versiyonuna sahiptir. Bu durum, aşağıdaki durumlarda PSAT'ın kullanımına izin verir:

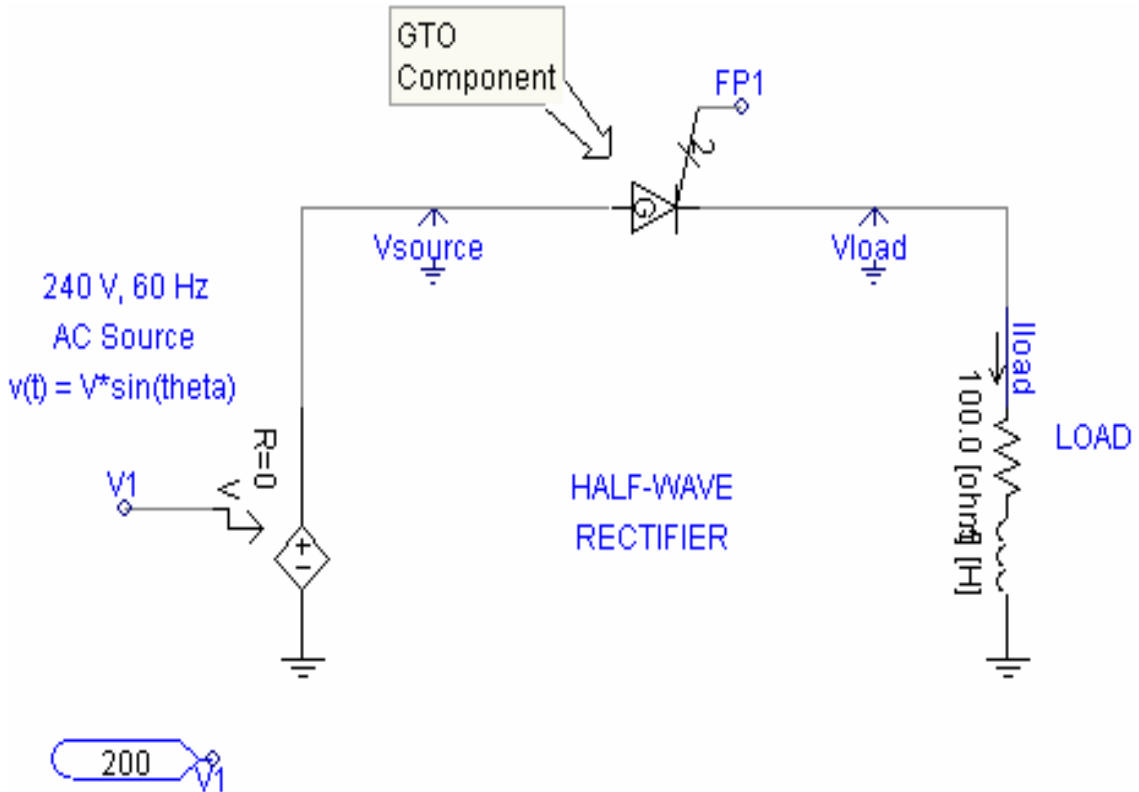
- 1) Grafik ortamı görüntülemek çok yavaş ya da imkansız olursa,
- 2) Kullanıcı tanımlı programlarda PSAT fonksiyonları yazılmak istenirse,
- 3) GUI araçları veya Simulink benzeri ortamların hiçbiri olmadığında PSAT GNU/Octave platformunda çalışırsa, vb.

7. UYGULAMALAR

7.1. PSCAD İLE ÖRNEK UYGULAMALAR

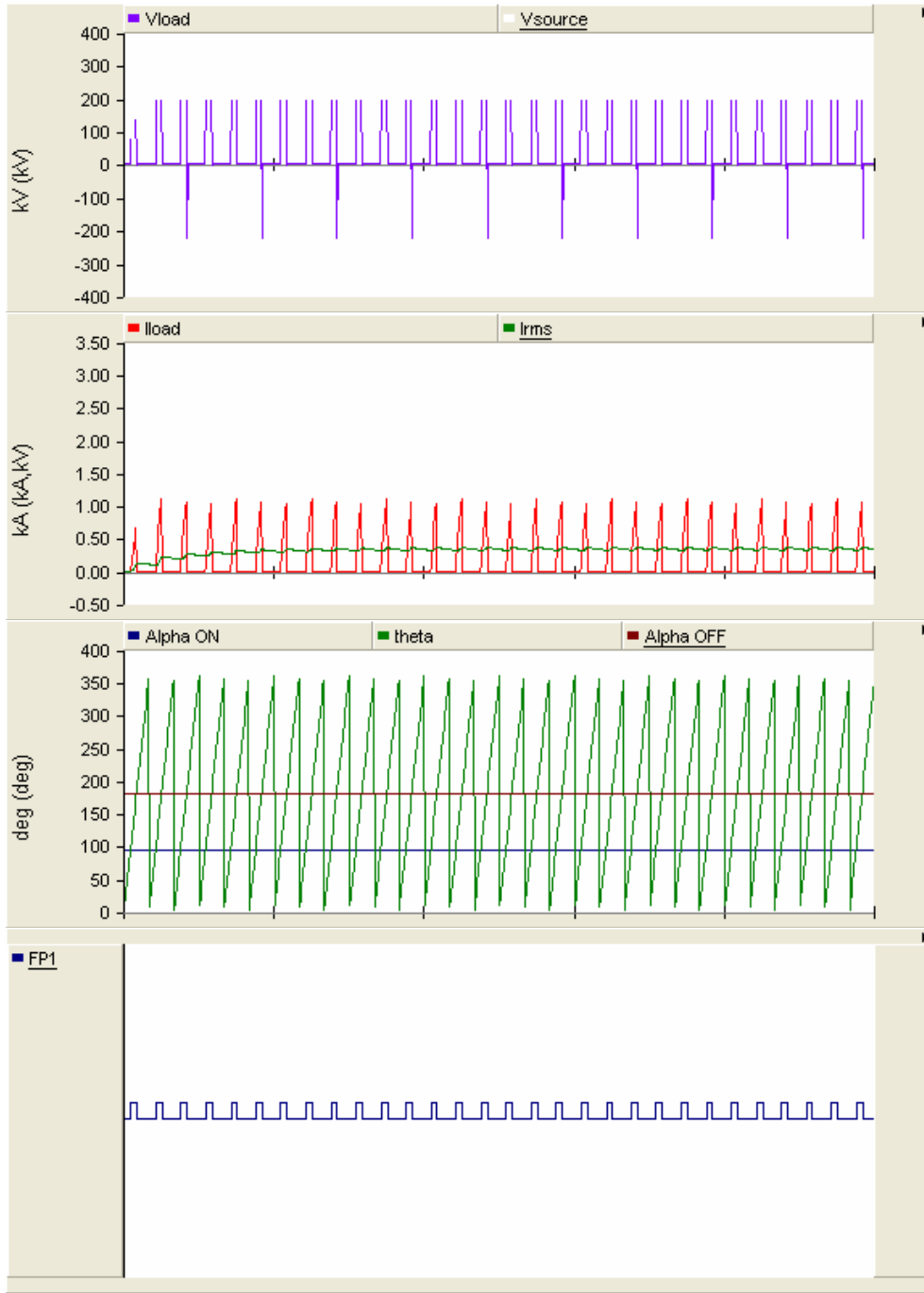
7.1.1.GTO KONTROLLÜ SINGLE-PHASE HALF-WAVE RECTIFIER

Bu örneğin amacı, bir güç elektroniği anahtarı olan GTO'nun kullanımını göstermektir. Görüldüğü üzere bir yarım dalga GTO kontrollü rektifier oluşturuldu. Voltaj kaynağı harici kontrollüdür. Ateşleme palsi kontrol devresi de gösterilmiştir. Bu devre "Interpolated Firing Pulse" komponentini içermektedir. Bu blok, High (H) ve Low (L) olmak üzere iki ayrı girişi karşılaştırmaktadır. Bu girişlerden biri ON komutu için diğeri de OFF komutu içindir. ON kısmında; H, L'den daha büyük olursa, ateşleme palsi oluşur ve çıkış (FP1) 0'dan 1'e gider ve bu durum OFF konumuna geçene kadar devam eder.



Şekil 7.1. GTO kontrollü single-phase half wave rectifier.

GTO kontrollü single-phase half wave rectifier için grafiksel sonuçlar:



Şekil 7.2. GTO kontrollü single-phase half wave rectifier için grafiksel sonuçlar.

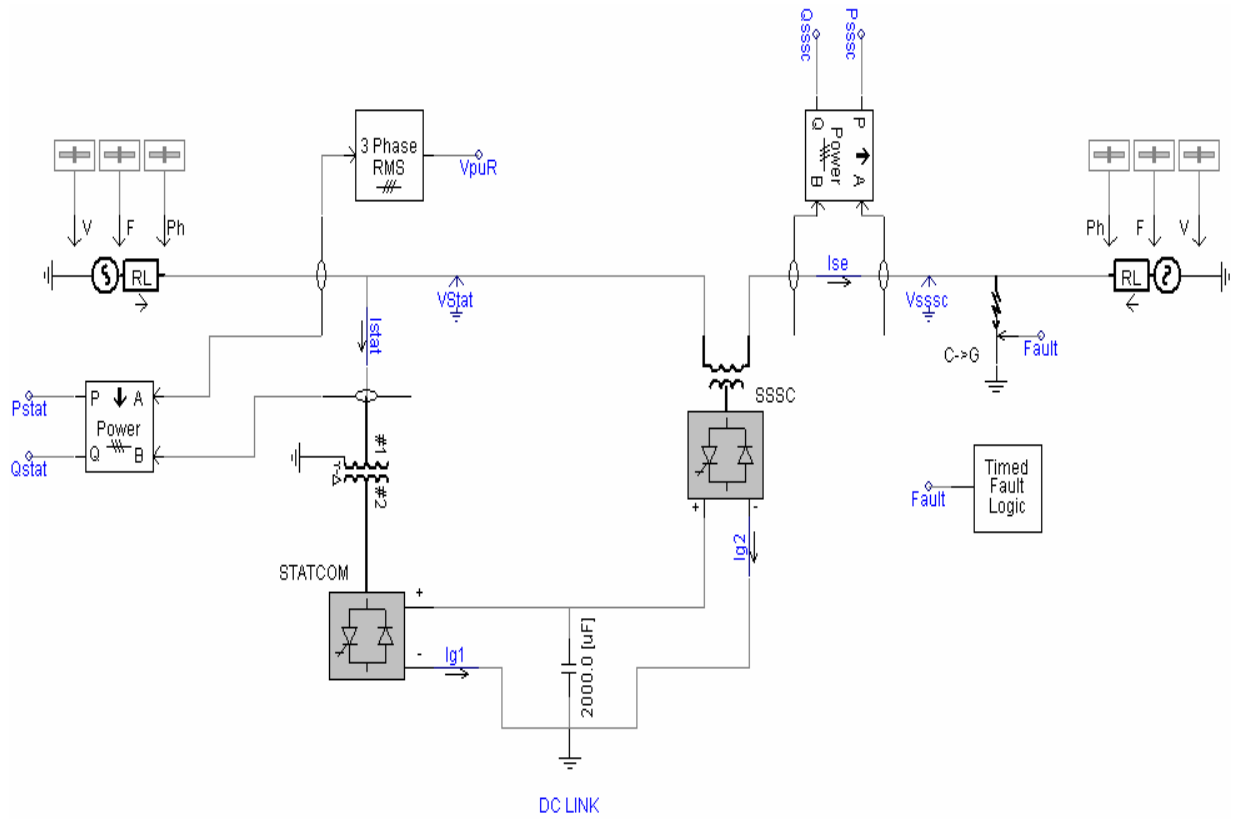
7.1.2. UPFC MODELLEME

230 kV AC 60 HZ İletim Sisteminde 100 MVA UPFC Operasyonu

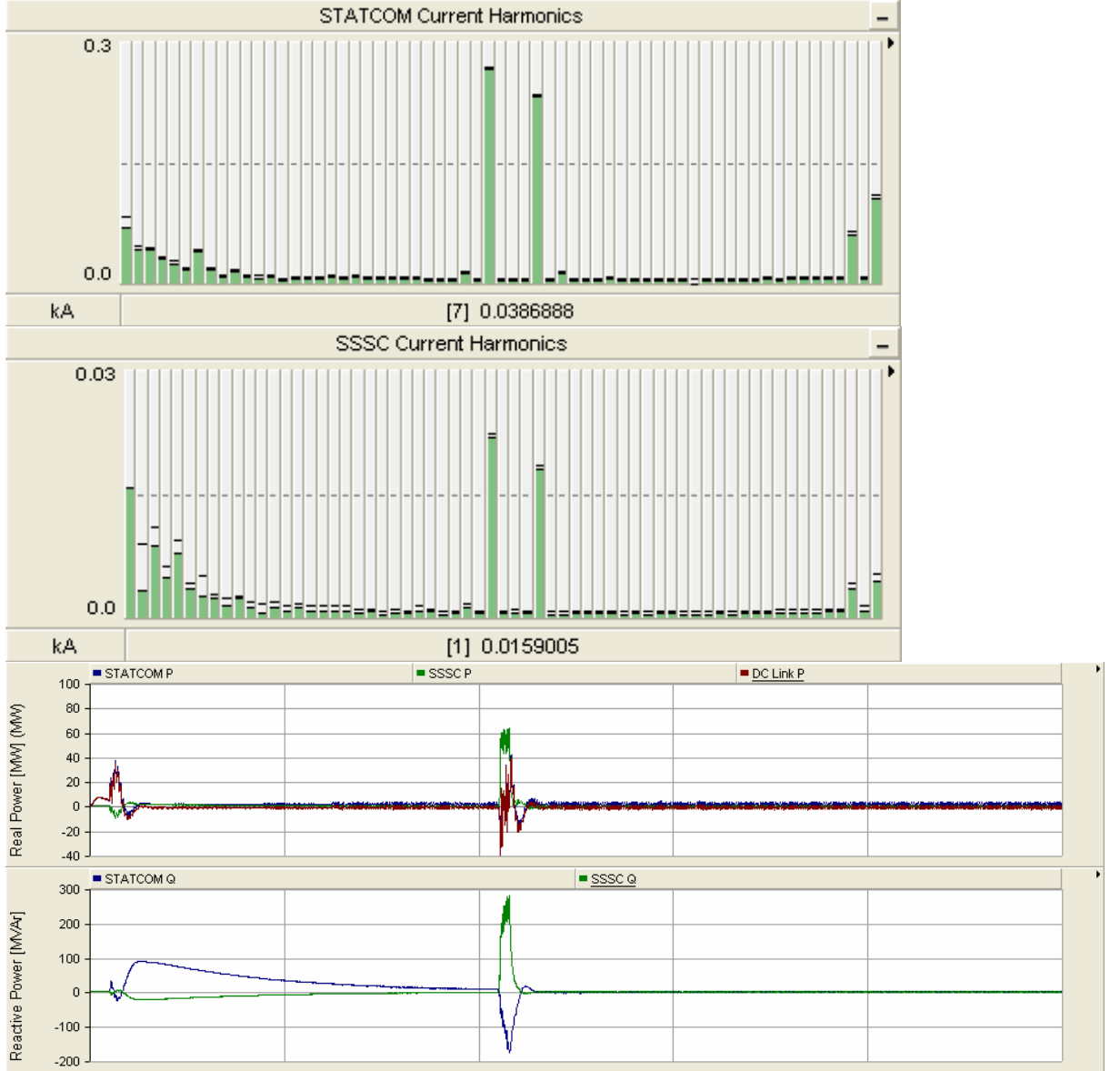
PWM kullanıldığı için, her konverterde bağımsızca uygulanmış kontrol modları vardır.

Bu modelde kullanılan kontrol modları:

1. Gönderme sonunda AC voltaj kontrolü, STATCOM'un AC tarafındaki voltajın genliği düzenlenerek sağlanır.
2. DC voltaj, STATCOM'un AC taraf voltajının faz açısı düzenlenerek kontrol edilir.
3. Kuadratür voltaj kontrolü, SSSC'nin AC voltajının faz ve genliği düzenlenerek yapılır.



Şekil 7.3. UPFC tasarımı.



Şekil 7.4. UPFC modelleme için grafiksel sonuçlar.

Akım harmonikleri baz alınarak, reel ve reaktif güç akışı herhangi bir salınım durumundan sonra STATCOM, SSSC ve DC Link değerlerinin yeniden düzenli hale geçtiği ve bu küçük harmoniklerin sistemin karşılaştığı herhangi bir ani durum (fault) karşısında STATCOM ve SSSC'nin direk tepkisi, zorlayıcı durum atlatıldıktan sonra normal sürecine döndüğü görülmüştür. STATCOM ve SSSC'nin her ikisinin de uyumlu işlevlerini yerine getirdikleri görülmüştür.

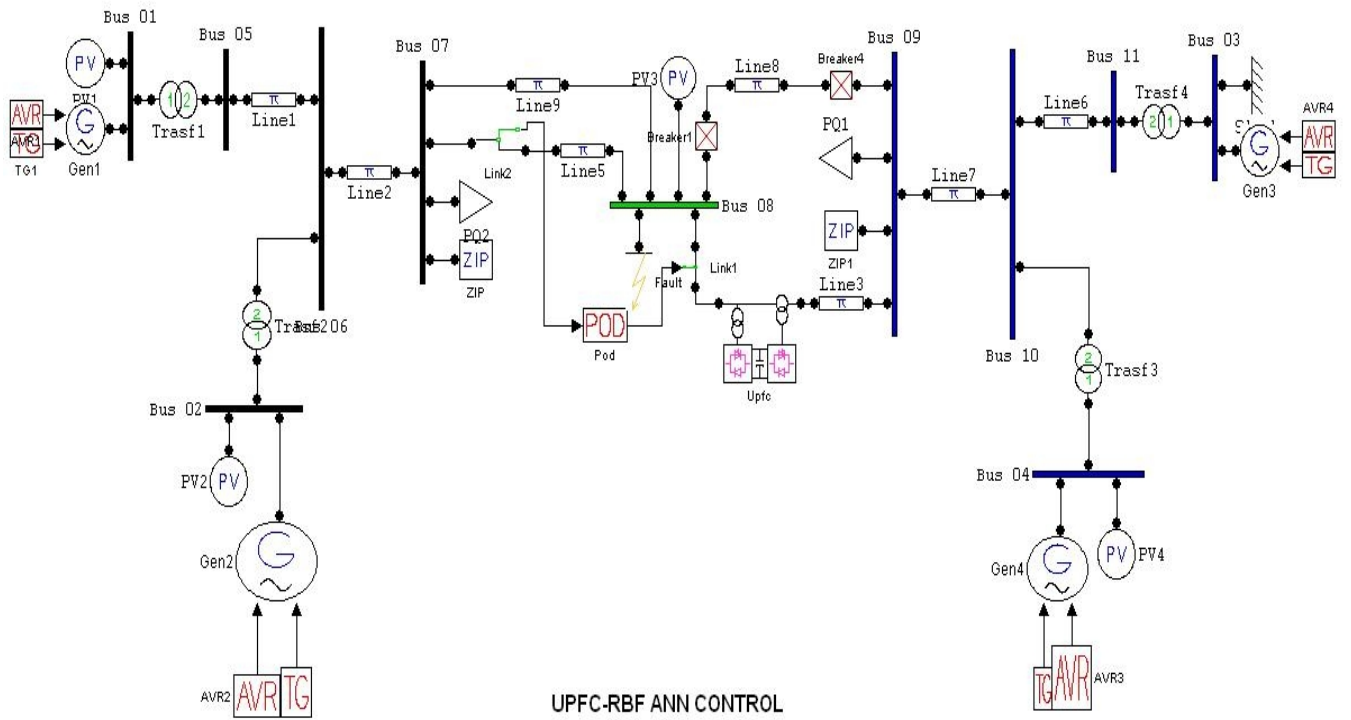
7.2. PSAT İLE ÖRNEK UYGULAMALAR

Bu bölümde UPFC' ye POD, PSS ve RBFNN yöntemleri uygulanarak geçici rejim kararlılık durumu karşılaştırılacaktır. Bunun için PSAT Toolbox kullanılmıştır. Burada PSAT (Power Systems Analysis Toolbox), ilk kez RBFNN kontrolüyle birlikte çalıştırılmıştır.

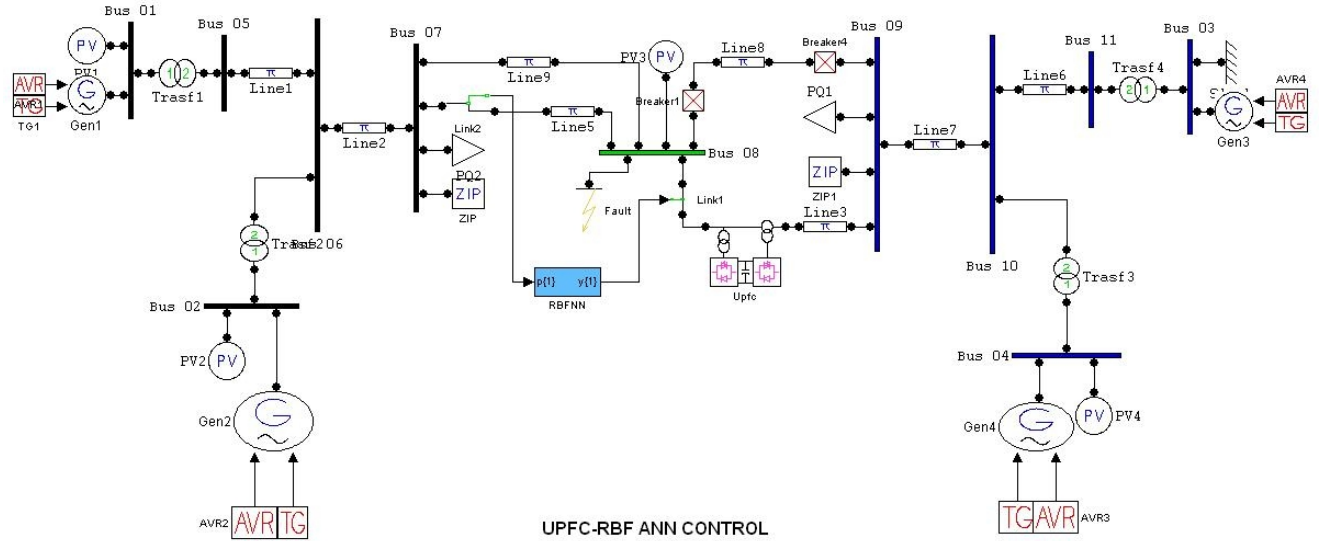
Test sistemimiz Prabha Kundur'un "Two Area System" olarak adlandırdığı sistemdir. Bu çalışmada, UPFC elemanı, daha iyi performans göstermesi açısından sistemin tam ortasına yerleştirilmiştir. PSS, POD ve RBFNN kontrolörleri sisteme sonradan dahil edilmektedir.

7.2.1.SİSTEM MODELLERİ VE ANALİZİ

A. Sistem Modelleri



Şekil 7.5. Two Area Sistemde POD kontrollü UPFC.



Şekil 7.6. Two Area Sistemde RBFNN kontrollü UPFC.

B. Komponentlerin Parametreleri

Source Block Parameters: AVR1

Exc (mask)
This block defines an Automatic Voltage Regulator.

Parameters

Automatic Voltage Regulator Type 3

Maximum Regulator Voltage [p.u.]
5.00

Minimum Regulator Voltage [p.u.]
-5.00

Regulator Gain [p.u./p.u.]
200

Regulator Pole T2 [s]
1

Regulator Zero T1 [s]
1

Second Regulator Pole T3 [s]
1.00

Second Regulator Zero T4 [s]
0.01

Time Constant of the Field Circuit Td [s]
1.00

Time Delay of the Measurement System Tr [s]
0.01

Coefficient of the Ceiling Function (A,B)
[0.0006 0.9]

Number of input signals 0

Şekil 7.7. AVR.

Otomatik Voltaj Regülatörü (AVR)'nin maksimum regülatör voltajı 5 pu, minimum regülatör voltajı da -5 pu olarak alındı.

Block Parameters: Bus 09

Bus (mask)
Bus block.

Parameters

Number of inputs:
1

Number of outputs:
4

Voltage Rating [kV]
230

Voltage initial guess [p.u. rad]
[0.9899 -0.555]

Area number
2

Region number
1

Şekil 7.8. 09 nolu bara.

Block Parameters: Bus 10

Bus (mask):
Bus block.

Parameters:

Number of inputs:
2

Number of outputs:
1

Voltage Rating [kV]
230

Voltage initial guess [p.u. rad]
[0.9938 -0.4119]

Area number
2

Region number
1

Şekil 7.9. 10 nolu bara.

9 nolu baranın 1 girişi 4 çıkışı vardır, voltaj oranlaması 230 kV, bölge numarası 2, voltaj başlangıç tahmini değerleri -0.555 rad alınmıştır. 10 nolu barada 2 giriş 1 çıkış vardır, voltaj oranlaması 230 kV, bölge numarası 1 ve 9 nolu baradan farklı olarak küçük bir değişimle voltaj başlangıç tahmini değeri -0.4119 alınmıştır. Bu da baralardaki voltaj değişimlerine az da olsa etki etmektedir. Şöyleki:

Güç Akışı Sonuçları

Bus [p.u.]	V [rad]	phase [p.u.]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load
Bus 09	0.97072	3.9961	0	0	18.55	-2.625
Bus 10	0.98211	4.1495	0	0	0	0

Küçük bir değişimin olduğu görülür.

Block Parameters: Gen1

Line (mask) (link)
This block defines a fourth order synchronous machine.

Parameters

Power, voltage and frequency ratings [MVA, kV, Hz]
[900 20 60]

Machine Dynamic Order 6

resistance r_a and leakage reactance x_l [p.u. p.u.]
[0.0025 0.2]

d-axis reactances X_d, X'_d, X''_d [p.u., p.u., p.u.]
[1.80 0.30 0.25]

d-axis open circuit time constants $T'd0$ and $T''d0$ [s, s]
[8.00 0.03]

q-axis reactances X_q, X'_q, X''_q [p.u. p.u. p.u.]
[1.70 0.55 0.25]

q-axis open circuit time constants $T'q0$ and $T''q0$ [s, s]
[0.4 0.05]

Inertia ($M = 2H$) and Damping [s, p.u.]
[13.00 0.00]

Speed and active power additional signals K_w, K_p [p.u., p.u.]
[0.00 0.00]

Percentage of active and reactive powers at bus [p.u. p.u.]
[1.00 1.00]

d-axis additional circuit leakage time constant T_{aa} [s]
[0.002]

Saturation coefficients $S(1.0)$ and $S(1.2)$
[0 0]

Number of input signals 2

Şekil 7.10. 1 nolu jeneratör.

1 nolu jeneratör (Gen1) deki tüm parametreler diğer jeneratörlerle aynıdır. Bu jeneratörde güç oranlaması 900 MVA, voltaj oranlaması 20 kV , frekans oranlaması ise 60 Hz , baradaki aktif ve reaktif güçlerin yüzdeleri ise 1 pu olarak alınmıştır.

Block Parameters: Line1

Line (mask) (link)
This block defines a pi model for a three phase line.

Parameters

Power, Voltage and Frequency Ratings [MVA, kV, Hz]
[100 230 60]

Length of line [km] [0 for p.u. parameters]
[0]

Resistance [p.u. (Ohms/km)]
[0.0001*25]

Reactance [p.u. (H/km)]
[0.001*25]

Susceptance [p.u. (F/km)]
[0.00175*25]

I_{max}, P_{max} and S_{max} [p.u., p.u., p.u.]
[1.0 0.0 0.0]

Şekil 7.11. Hat parametreleri.

Bütün hatlarda (Line) güç oranlaması 100 MVA , voltaj oranlaması 230 kV , frekans oranlaması ise 60 Hz dir. Hat rezistansı $0.0001*25$ pu [Ohms/km] , hat reaktansı $0.001*25$ pu [H/km] olarak alınmıştır.

Block Parameters: Trsf1

Line (mask) (link)
This block defines a transformer.

Parameters

Power, Voltage and Frequency Ratings [MVA, kV, Hz]
[900 20 60]

Primary and secondary voltage ratio [kV/kV]
20/230

Resistance [p.u.]
0.0

Reactance [p.u.]
0.15

Imax, Pmax and Smax [p.u., p.u., p.u.]
[1.0 0.0 0.0]

Şekil 7.12. Transformatör parametreleri.

Bütün transformatörlerde güç oranlaması 900 MVA, voltaj oranlaması 20 kV, frekans oranlaması 60 Hz, birincil ve ikincil voltaj oranı 20/230 kV , reaktansı ise 0.15 pu olarak alınmıştır.

POD kontrolörün parametreleri ise aşağıdaki şekildedir:

Function Block Parameters: Pod

Pod (mask)
This block defines a Supplementary Stabilizing Control Loop.

Parameters

Input signal: Line_I_from_bus

Operation mode: UPFC_control

Vmax_Ymin Stabilizer Output [p.u., p.u.]
[0.12 -0.12]

Gain Kw and time constant Tw [p.u./p.u., s]
[-1.37 3]

Lead-Lag time constants T1 and T2 [s, s]
[0.2172 0.2928]

Lead-Lag time constants T3 and T4 [s, s]
[0.2172 0.2928]

Low pass time constant Tr [s]
[0.001]

Şekil 7.13. POD.

UPFC bloğunun parametreleri de aşağıdaki gibidir:

Block Parameters: Upfc

Upfc (mask) (link)

This block describes a UPFC component.

Parameters:

Power, Voltage and Frequency Ratings [MVA, kV, Hz]

Operation mode:

Percentage of series compensation Cp [%]

Gain and time constant Kr and Tr [p.u./p.u. s]

Max and min Vp [p.u. p.u.]

Max and min Vq [p.u. p.u.]

Max and min Iq [p.u. p.u.]

Stabilizing Vp signal (series voltage)
 Stabilizing Vq signal (quadrature voltage)
 Stabilizing Iq signal (quadrature current)

Şekil 7.14. UPFC.

C. POD ve RBFNN Kontrol İçin Güç Akışı Raporu

11 adet bara, 8 hat, 4 transformatör, 4 jeneratör ve 2 yük içermektedir.

POD kontrolör için güç akış sonuçları

Bus [p.u.]	V [rad]	phase [p.u.]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load
Bus 09	0.97072	3.9961	0	0	18.55	-2.625
Bus 10	0.98211	4.1495	0	0	0	0

RBFNN kontrolör için güç akış sonuçları

Bus [p.u.]	V [rad]	phase [p.u.]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load
Bus 09	0.97017	4.8063	0	0	18.55	-2.625
Bus 10	0.98177	4.9595	0	0	0	0

POD kontrolör için durum vektörleri

omega_Syn_1	1.0004
omega_Syn_2	1.0004
omega_Syn_3	1.0004
omega_Syn_4	1.0004

RBFNN kontrolör için durum vektörleri

omega_Syn_1	1.0004
omega_Syn_2	1.0004
omega_Syn_3	0.99999
omega_Syn_4	1

POD kontrolör için hat akışı:

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P loss [p.u.]	Q loss [p.u.]
Bus 10	Bus 09	6	14.6462	0.76579	0.22302	2.2135
Bus 09	Bus 10	6	-14.4232	1.4477	0.22302	2.2135

RBFNN kontrolör için hat akışı:

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P loss [p.u.]	Q loss [p.u.]
Bus 10	Bus 09	6	14.6117	0.78387	0.22216	2.2049
Bus 09	Bus 10	6	-14.3896	1.421	0.22216	2.2049

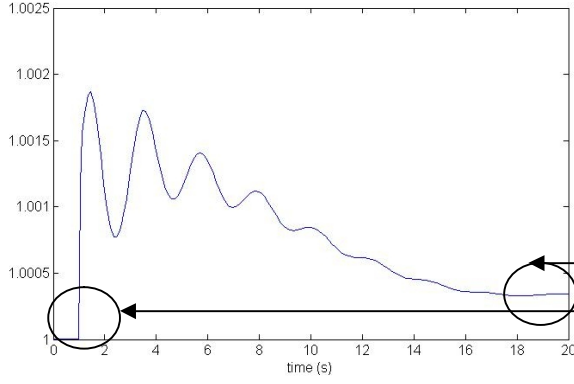
POD Kontrolör için TOPLAM KAYIP:

REAL POWER [p.u.] 0.82804
REACTIVE POWER [p.u.] 12.2954

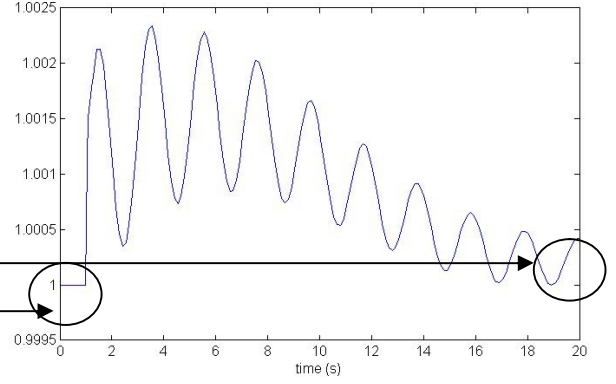
RBFNN Kontrolör için TOPLAM KAYIP

REAL POWER [p.u.] 0.82915
REACTIVE POWER [p.u.] 12.3206

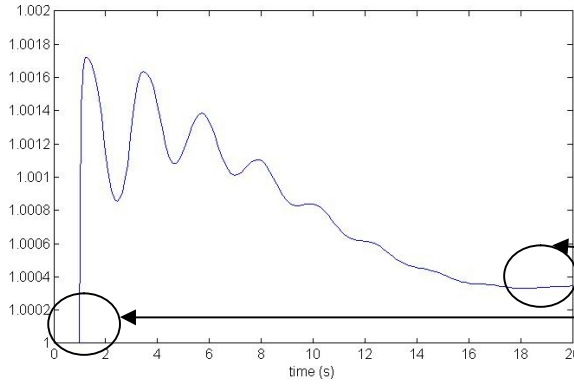
D. Grafiksel Sonuçlar



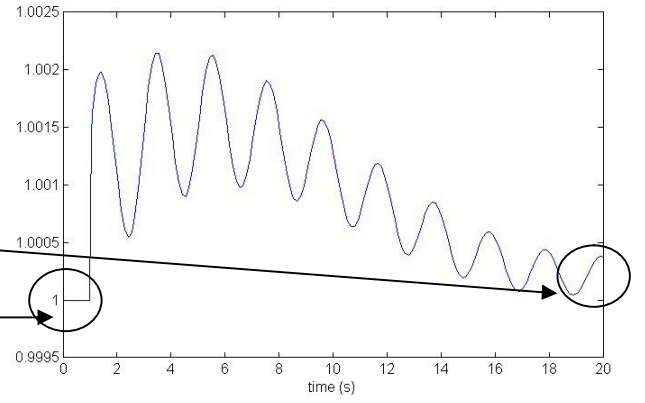
Şekil 7.15. POD sistemde birinci makinenin ω_1 (hız) değişimi.



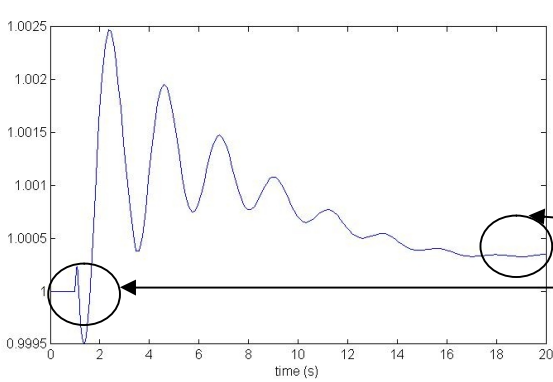
Şekil 7.18. RBFNN sistemde birinci makinenin ω_1 (hız) değişimi.



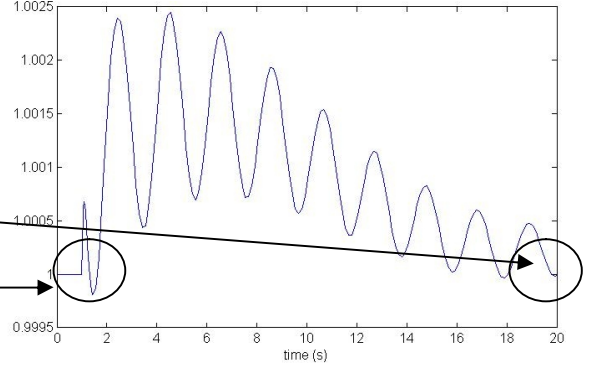
Şekil 7.16. POD sistemde ikinci makinenin ω_2 (hız) değişimi.



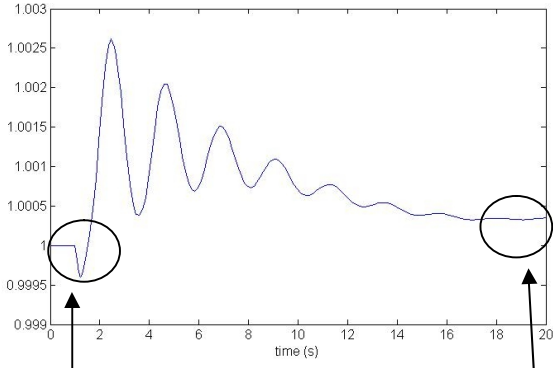
Şekil 7.19. RBFNN sistemde ikinci makinenin ω_2 (hız) değişimi.



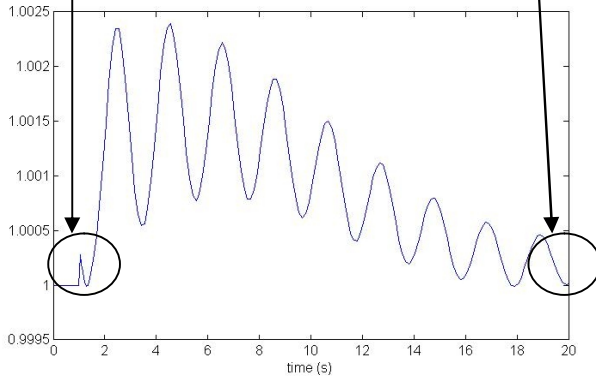
Şekil 7.17. POD sistemde üçüncü makinenin ω_3 (hız) değişimi.



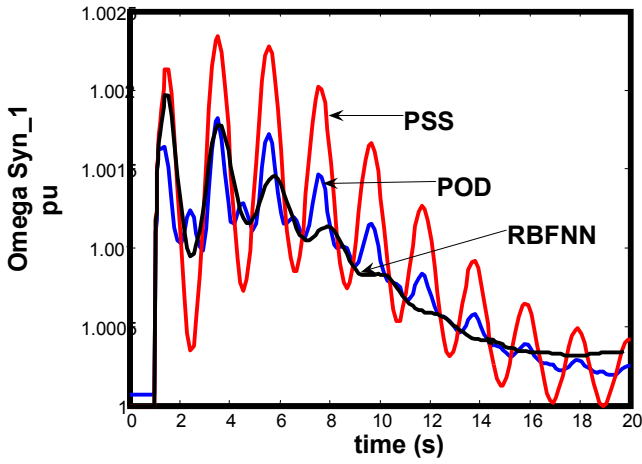
Şekil 7.20. RBFNN sistemde üçüncü makinenin ω_3 (hız) değişimi.



Şekil 7.21. POD sistemde dördüncü makinenin omega4(hız) değişimi.

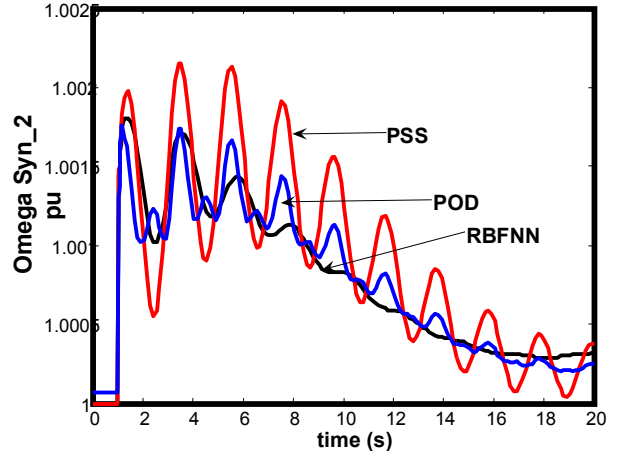


Şekil 7.22. RBFNN sistemde dördüncü makinenin omega4(hız) değişimi.

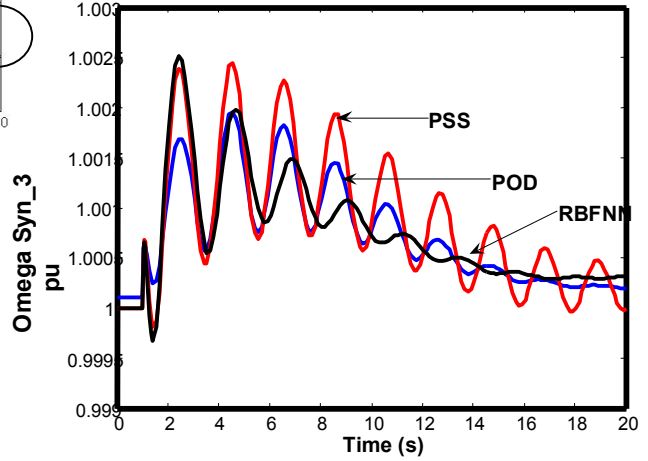


Şekil 7.23. Birinci makine için geçici rejim performanslarının karşılaştırılması.

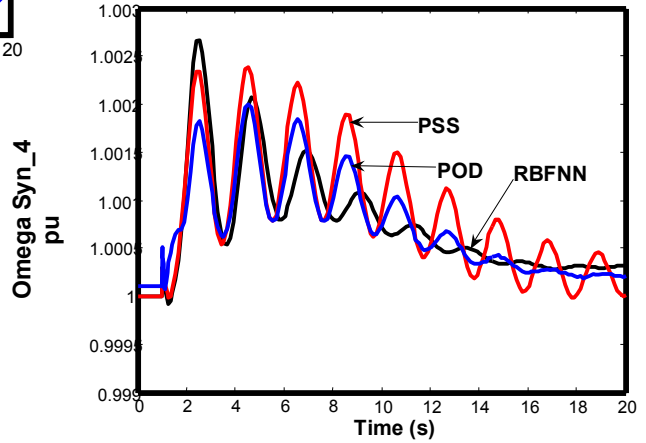
Şekil 7.23-7.26'daki tüm durumlarda dört makine için ayrı ayrı performanslarına bakıldığında, geleneksel yöntemler olan PSS ve POD kontrolörlerin salınımlarının RBFNN'den daha büyük ve düzensiz olduğu görülmektedir. UPFC çeşitli kontrolörlerle ele alındığında, dört makinenin her biri için RBFNN kontrolünün uygulanmasıyla sistemin osilasyonlarının daha az olduğu yani salınımların daha kısa zamanda normale döndüğü görülmektedir. PSS ve POD kontrole göre RBFNN kontrolör daha başarılıdır.



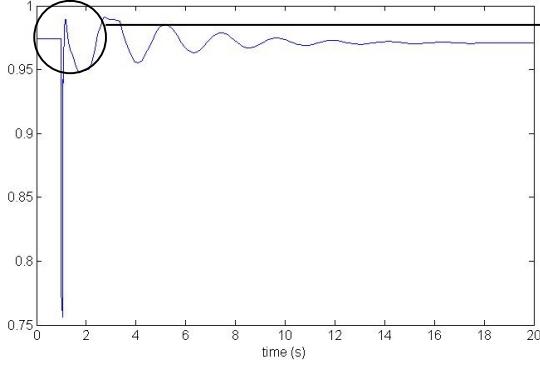
Şekil 7.24. İkinci makine için geçici rejim performanslarının karşılaştırılması.



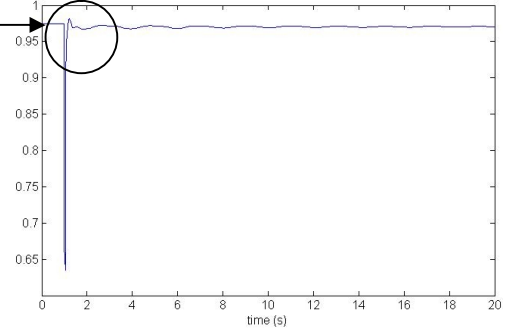
Şekil 7.25. Üçüncü makine için geçici rejim performanslarının karşılaştırılması.



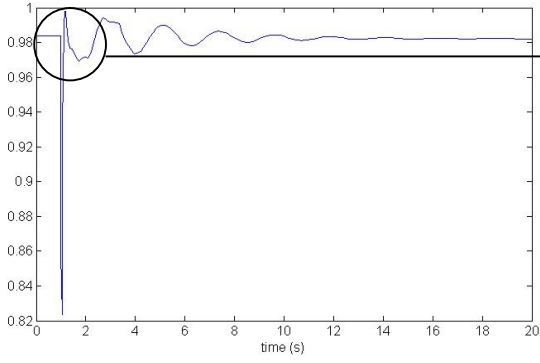
Şekil 7.26. Dördüncü makine için geçici rejim performanslarının karşılaştırılması.



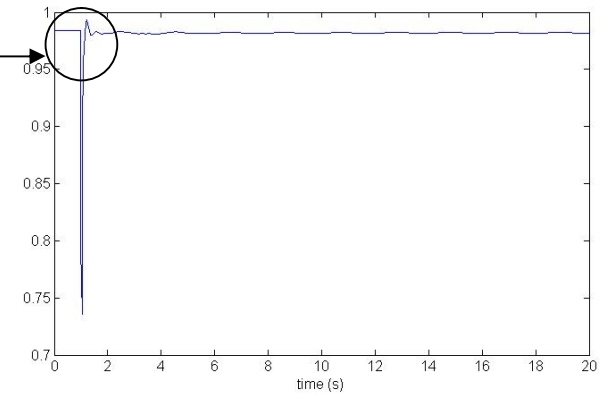
Şekil 7.27. POD sistemde 09 nolu barada voltaj değişimi.



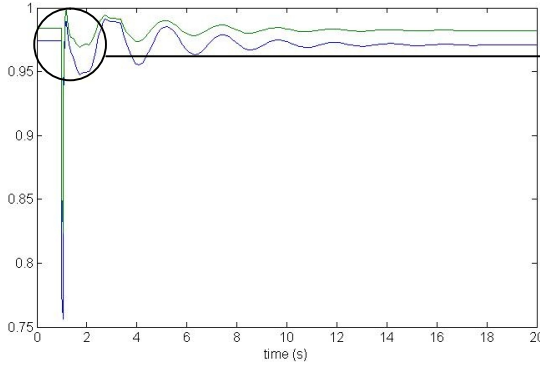
Şekil 7.30. RBFNN sistemde 9 nolu barada voltaj değişimi.



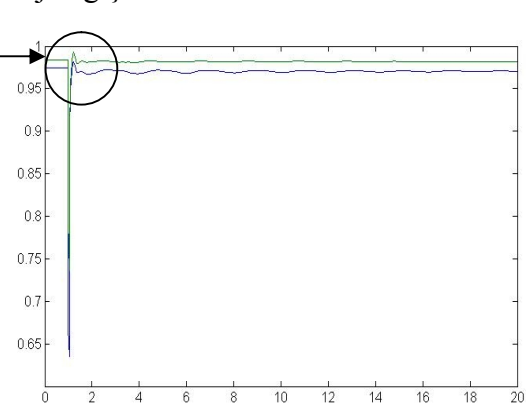
Şekil 7.28. POD sistemde 10 nolu barada voltaj değişimi.



Şekil 7.31. RBFNN sistemde 10 nolu barada voltaj değişimi.

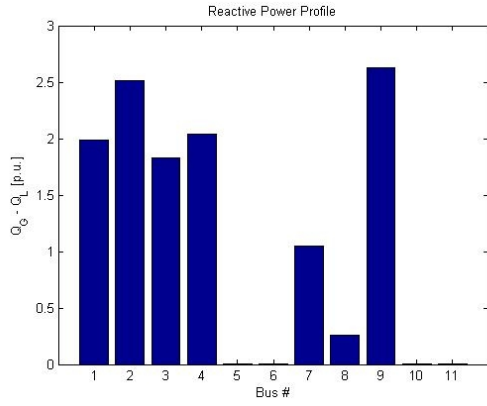


Şekil 7.29. POD sistemde 9 ve 10 nolu baralarda voltaj değişimi.

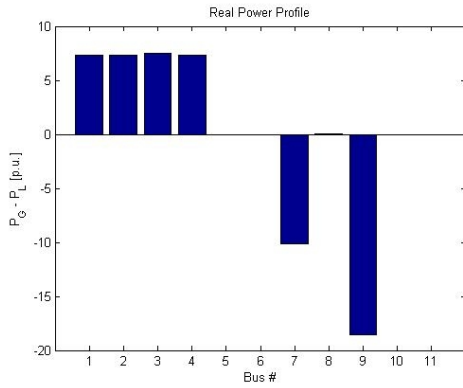


Şekil 7.32. RBFNN sistemde 9 ve 10 nolu baralarda voltaj değişimi.

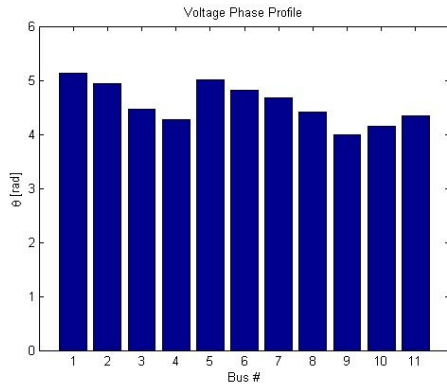
Şekil 7.27 den 7.32 ye kadar 9 nolu ve 10 nolu baralardaki voltaj değişimleri incelendiğinde RBFNN li sistemde ilk osilasyon anının yok denecek kadar az salınımla gerçekleştiği ve ilerleyen kısımlarda osilasyonların daha az olduğu görülerek voltaj değişiminin RBFNN kontrolörle daha iyi kontrol edilebildiği söylenebilir.



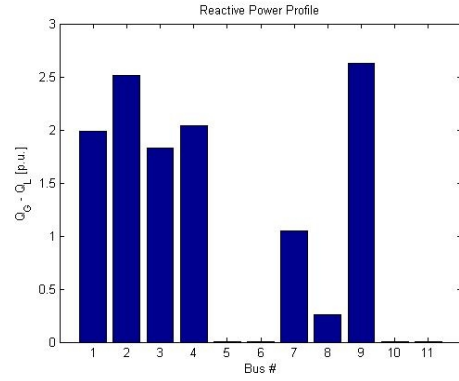
Şekil 7.33. POD sistemde reaktif power profili.



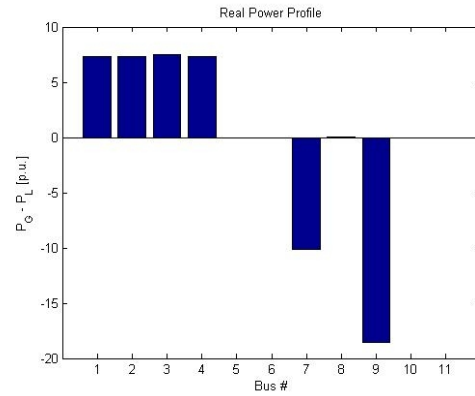
Şekil 7.34. POD sistemde reel power profili.



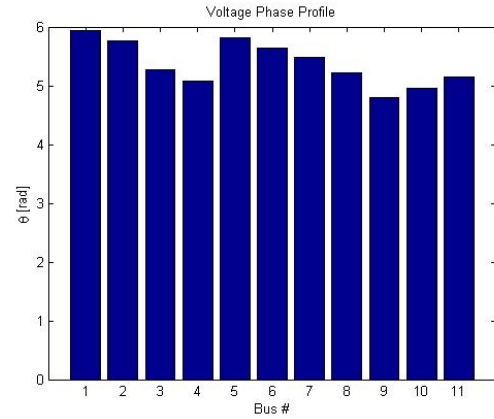
Şekil 7.35. POD sistemde voltaj faz profili.



Şekil 7.36. RBFNN sistemde reaktif power profili.



Şekil 7.37. RBFNN sistemde reel power profili.



Şekil 7.38. RBFNN sistemde voltaj faz profili.

Şekil 7.33'den 7.38'e kadar incelendiğinde, reel ve reaktif power profilinde çok az değişiklik görülmüştür. Bunun nedeni:

POD Kontrolör için TOPLAM KAYIP:
 REAL POWER [p.u.] 0.82804
 REACTIVE POWER [p.u.] 12.2954

RBFNN Kontrolör için TOPLAM KAYIP
 REAL POWER [p.u.] 0.82915
 REACTIVE POWER [p.u.] 12.3206

olmasıdır. Bunun yanısıra, RBFNN kontrollü sistemde voltaj faz profilinde daha etkin bir sonuç elde edilmiştir.

8. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Reaktif güç kompanzasyon teknolojileri hakkında genel bir inceleme yapıldı. İşlem prensipleri, dizayn karakteristikleri ve kendiliğinden komutalı konverterlerle düzenlenmiş VAR kompanzatorların uygulama örneklerine değinildi. Reaktif güç kompanzatorlarının kullanımı örneklerle ele alındı.

Yeni VAR kompanzator teknolojilerinden olan STATCOM, SSSC ve UPFC ele alındı. STATCOM, bir kontrol edilebilir reaktif güç kaynağıdır öyle ki , büyük external reaktörler ve kapasitör bankalarına gerek duymadan ortak kuplajlama noktasında reaktif gücü emerek veya üreterek voltaj desteğini sağlar. SSSC' nin temel işlevi, geleneksel seri kompanzasyona çok benzerdir, farkı, senkron bir voltaj gibi anahtarlama güç konverteri kullanmasıdır. SSSC, seri hattın içinde kompanze edilmiş voltaj enjekte ederek hatta çift yönlü kompanzasyon sağlar. STATCOM' un ac sisteme paralel, SSSC'nin sisteme seri bağlanması bir de ortak dc terminal olması durumunda bu sisteme UPFC (Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü) adı verilir.

Çalışmanın temel amacı UPFC' nin POD, PSS ve RBFNN kontrolörleriyle performans karşılaştırmasıdır. Bu amaçla PSAT (Power System Analysis Toolbox) programı kullanıldı. Test sistemi olarak Prabha Kundur' un "Two Area System" sistemi kullanıldı. Ve bu sistemde UPFC daha iyi performans gösterdiğinden dolayı en orta noktaya yerleştirildi. Geleneksel olarak POD ve PSS kontrolörler kullanılmaktaydı. Yeni olarak ilk kez RBFNN kontrolörle birlikte PSAT toolbox kullanıldı ve performans karşılaştırması yapıldı. RBFNN, çok boyutlu uzayda eğri uydurma yaklaşımıdır ve bir eniyileme uygulamasıdır. Grafikselle sonuçlardan da görüleceği üzere RBFNN kontrolör, POD ve PSS' e göre daha az osilasyon sağlamış ve sistemdeki bozucu etkilere daha yumuşak ve çabuk tepki göstererek daha iyi geçici rejim analizi göstermiştir.

Bu çalışmada, tek katmanlı RBFNN yapısı kullanıldı. İleriye dönük olarak bu katman sayısı artırılabilir. Ayrıyeten, UPFC'nin konumu orta nokta haricindeki konumlara yerleştirilerek performans karşılaştırması yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] T. J. Miller, "Reactive power Control in Electric Systems", John Willey & Sons, 1982.
- [2] E. Wanner, R. Mathys, M. Hausler, "Compensation Systems for Industry," Brown Boveri Review, vol. 70, pp.330-340, Sept./Oct. 1983.
- [3] G. Bonnard, "The Problems Posed by Electrical Power Supply to Industrial Installations," in Proc. of IEE Part B, vol. 132, pp. 335-340, Nov. 1985.
- [4] A. Hammad, B. Roesle, "New Roles for Static VAR Compensators in Transmission Systems," Brown Boveri Review, vol. 73, pp. 314-320, June 1986.
- [5] Nickolai Grudinin and Ilya Roytelman, "Heading Off Emergencies in Large Electric Grids", IEEE Spectrum, Vol. 34, N° 4, April 1997, pp. 43-47.
- [6] Carson W. Taylor, "Improving Grid Behavior", IEEE Spectrum, Vol. 36, N°6, June 1999, pp. 40-45.
- [7] Canadian Electrical Association, "Static Compensators for Reactive Power Control," Cantext Publications, 1984.
- [8] L. Gyugyi, "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-15, n° 5, pp. 521-532, Sept./Oct. 1979.
- [9] L. Gyugyi, R. Otto, T. Putman, "Principles and Applications of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators," IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-97, n° 5, pp. 1935-1945, Oct. 1980.
- [10] Y. Sumi, Y. Harumoto, T. Hasegawa, M. Yano, K. Ikeda, T. Mansura, "New Static Var Control Using Force-Commutated Inverters," IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-100, n° 9, pp. 4216-4223, Sept. 1981.
- [11] C. Edwards, K. Mattern, E. Stacey, P. Nannery, J. Gubernick, "Advanced Static VAR Generator Employing GTO Thyristors," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 3, n° 4, pp. 1622-1627, October 1988.
- [12] L. Walker, "Force-Commutated Reactive Power Compensator," IEEE Trans. Industry Application, vol. IA-22, n° 6, pp. 1091-1104, Nov./Dec. 1986.
- [13] Karl E. Stahlkopf and Mark R. Wilhelm, "Tighter Controls for Busier Systems", IEEE Spectrum, Vol. 34, N° 4, April 1997, pp. 48-52.
- [14] Rolf Grünbaum, Åke Petersson and Björn Thorvaldsson, "FACTS, Improving the performance of electrical grids", ABB Review, March 2003, pp. 11-18.

- [15] N. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS, Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems," IEEE Press, New York, 2000.
- [16] H. Frank and S. Ivner, "Thyristor-Controlled Shunt Compensation in Power Networks," ASEA Journal, vol.54, pp. 121-127, 1981.
- [17] H. Frank and B. Landstrom, "Power Factor Correction with Thyristor-Controlled Capacitors," ASEA Journal, vol. 45,nº 6, pp. 180-184, 1971.
- [18] J. W. Dixon , Y. del Valle, M. Orchard, M. Ortúzar, L. Morán and C. Maffrand, "A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 50, Nº 5, October 2003, pp. 982-989.
- [19] L. Morán, P. Ziogas, G. Joos, "Analysis and Design of a Synchronous Solid-State VAR Compensator," IEEE Trans. Industry Applications, vol. IA-25, nº 4, pp. 598-608, July/August 1989.
- [20] S. Torseng, "Shunt-Connected Reactors and Capacitors Controlled by Thyristors," IEE Proc. Part C, vol. 128, nº 6, pp. 366-373, Nov. 1981.
- [21] A. K. Chakravorti and A. E. Emanuel, "A Current regulated Switched Capacitor Static Volt Ampere Reactive Compensator", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, Nº 4, July/August 1994, pp.986- 997.
- [22] H. Jin, G. Goós and L. Lopes, "An Efficient Switched- Reactor-Based Static Var Compensator", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, Nº 4, July/August 1994, pp. 997-1005.
- [23] Juan W. Dixon, Jaime García and Luis Morán, "Control System for a Three-Phase Active Power Filter Which Simultaneously Compensates Power Factor and Unbalanced Loads", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, Nº 6, December 1995, pp 636-641.
- [24] R. Grünbaum, B. Halvarsson, A. Wilk-wilczynski, "FACTS and HVDC Light for Power System Interconnections", Power Delivery Conference, Madrid, Spain, September 1999.
- [25] Osvin Gaupp, Plinio Zanini, Peter Daehler, Eugen Baerlocher, Ruediger Boeck, Johannes Werninger, "Bremen's 100-MW static frequency link" Issue-No: 9, 10/96 (pp.4-17), M420, ABB Review Article.
- [26] Juan Dixon and Luis Morán, "A Clean Four-Quadrant Sinusoidal Power Rectifier, Using Multistage Converters for Subway Applications", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 52, Nº 3, June 2005.

- [27] L. Lorenz, " Power Semiconductors: State of the Art and Future Developments." Keynote Speech at the International Power Electronics Conference, IPEC Niigata, 2005, Japan, April 2005 , CD ROM.
- [28] Hingorani, N.G., "Flexible AC Transmission", *IEEE Spectrum*, April 1993, p.40-44
- [29] Gyugyi, L., "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-state Synchronous Voltage Sources", IEEE, 1993, p. 904-911.
- [30] Hingorani, N.G, Gyugyi,L., *Understanding FACTS Devices*, IEEE Press 2000.
- [31] Nabavi-Niaki, A., Iravani, M.R., "Steady-state and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power System Studies", *IEEE Transactions of Power Systems*, Vol. 11, No. 4, November 1996, p. 1937-1943.
- [32] Wang, H.F., 'Applications of Modelling UPFC into Multi-machine Power Systems', *IEE Proceedings Generation Transmission Distribution*, Vol. 146, No. 3, May 1999, p. 306-312.
- [33] Uzunovic, E., Canizares, C.A., Reeve, J., "Fundamental Frequency Model of Unified Power Flow Controller", *North American Power Symposium*, NAPS, Cleveland, Ohio, October 1998.
- [34] Huang, Z., Ni, Y., Shen, C.M., Wu, F.F., Chen, S., Zhang, B., 'Application of Unified Power Flow Controller in Interconnected Power Systems -- Modeling, Interface, Control Strategy and Case Study', *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 1999.
- [35] Mohan N, Undeland T.M., Robbins, W.P., *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons, Inc.,1995.
- [36] J. J. Paserba, "How FACTS Controllers Benefit AC Transmission Systems", Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE 6-10, Vol.2, Page(s):1257 – 1262, June 2004.
- [37] H. K. Tyll, "FACTS Technology for Reactive Power Compensation and System Control", Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES, Page(s):976 – 980, 8-11 Nov. 2004.
- [38] L. Gyugyi, "Converter – Based FACTS Controllers", Flexible AC Transmission Systems - The FACTS (Ref. No. 1998/500), IEE Colloquium, Page(s):1/1 – 111, 23 Nov. 1998.
- [39] K. Habur, D. O’Leary, "For Cost Effective and Reliable Transmission of Electrical Energy", WorldBank .

- [40] W. Breuer, D. Povh, D. Retzmann, E. Teltsch X. Lei, “Role of HVDC and FACTS in future Power Systems”, Siemens AG, Germany XJ Group, China http://www.iea.org/dbtwwpd/textbase/work/2004/distribution/presentations/Retzmann_bkgd_2.pdf
- [41] S. J. Chapman, “Electric Machinery Fundamentals”, McGraw-Hill, 3rd Edition, 1999.
- [42] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, “Understanding FACTS, Concepts and Technology of Flexible Transmission Systems”, Wiley-IEEE Press December 1999.
- [43] L. Gyugyi, “Application Characteristics of Converter Based FACTS devices”, Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference, Vol.1, Page(s):391 - 396, 4-7 Dec. 2000.
- [44] R. Grünbaum, R. Sharma, J. P. Charpentier, “Improving the efficiency and quality of AC transmission systems”, Joint World Bank / ABB Power Systems Paper, 2000 http://www.worldbank.org/html/fpd/em/transmission/efficiency_abb.pdf
- [45] C. D. Schauder and H. Mehta, “Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators”, IEEE Proceedings, Vol. 140, No. 4, July 1993.
- [46] G. Glanzmann, “FACTS, Flexible Alternating Current Transmission Systems”, EEH-Power Systems Laboratory, Technical Report, ETH Zurich, Jan 2005 http://www.eeh.ee.ethz.ch/downloads/psl/publications/Glanzmann_FACTS_internal.pdf
- [47] T.M.L. de Assis, E. H. Watanabe, L.A.S. Pilotto, “Analysis of Steady State and Dynamic Performance of a Static Synchronous Compensator (STATCOM)” <http://www.ipst.org/TechPapers/2001/IPST01Paper219.pdf>
- [48] Kalyan K. Sen “STATCOM- STATIC synchronous COMPensator: Theory, Modeling and Applications”, Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE Vol 2, Page(s):1177 - 1183, 31 Jan-4 Feb 1999.
- [49] H. K. Tyll, “FACTS Technology for Reactive Power Compensation and System Control”, Paper for IEEE/PES panel session on FACTS, Nov 8-11, 04, Sao.
- [50] Laxzlo Gyugyi, “Solid – State Synchronous Voltage Sources for Dynamic Compensation and Real-Time Control of AC Transmission Lines” Power Delivery, IEEE Transactions on Vol 9, Issue 2, April 1994 Page(s):904 - 911 Digital Object Identifier 10.1109/61.296273.
- [51] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, “Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible ac transmission Systems”, IEEE Press, Piscataway, New Jersey, 1999 ISBN 0-7803-3455-8.

- [52] Gabriela Glanzmann, "FACTS Flexible Alternating Current Transmission Systems", Power Systems Laboratory ETH Zürich 14. January 2005.
- [53] Watanabe, E.H.; de Souza, L.F.W.; de Jesus, F.D.; Alves, J.E.R.; Bianco, A, "GCSC - Gate Controlled Series Capacitor: A New Facts Device for Series Compensation of Transmission Lines". Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES 8-11 Nov. 2004 Page(s):981 – 986.
- [54] S.S.Choi ,F. Jiang, G. Shrestha, "Suppression of transmission system oscillations by thyristor-controlled series compensation" Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, Vol 143, Issue 1, Jan. 1996 Page(s):7 - 12 .
- [55] Dr.Kalyan Sen, " Recent Development in Electric Power Transmission", can access from: http://wpweb2.tepper.cmu.edu/ceic/SeminarPDFs/Sen_CEIC_Seminar_4_15_03.pdf, downloaded in October 2005.
- [56] Amir H. Norouzi and A. M. Sharaf, "Two Control Schemes to Enhance the Dynamic Performance of the STATCOM and SSSC", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol 20, No. 1, January 2005.
- [57] Gregory Reed, Ronald Pape, Masatoshi Takeda, "Advantages of Voltage Sourced Converter (VSC) Based Design Concepts for FACTS and HVDC-Link Applications", IEEE 2003 Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, vol 3, 13-17 July 2003 Page(s).
- [58] Paulo F. Ribeiro, "An Overview on FACTS and Power Quality Issues: Technical Challenges, Research Opportunities and Cost Considerations." Can be accessed from http://engr.calvin.edu/PRibeiro_WEBPAGE/ribeiro/presentations/itajuba-june02.ppt , downloaded in September 2005.
- [59] C. A. Canizares and F. L. Alvarado, UWPFLOW, Continuation and Direct Methods to Locate Fold Bifurcations in AC/DC/FACTS Power Systems, 1999, available at <http://www.power.uwaterloo.ca>.
- [60] M. Larsson, .ObjectStab An Educational Tool for Power System Stability Studies., *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 56.63, Feb. 2004.
- [61] J. H. Chow and K. W. Cheung, A Toolbox for Power System Dynamics and Control Engineering Education and Research, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, no. 4, pp. 1559.1564, Nov. 1992.
- [62] R. D. Zimmerman, C. E. Murrillo-Sánchez, and D. Gan, "*Matpower, Version 3.0.0, User's Manual*", Power System Engineering Research Center, Cornell University, 2005, available at <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/matpower.html>.

- [63] A. H. L. Chen, C. O. Nwankpa, H. G. Kwatny, and Xiao-ming Yu, "Voltage Stability Toolbox: An Introduction and Implementation", in *Proc. of 28th North American Power Symposium*, MIT, Nov. 1996.
- [64] J. Mahseredjian and F. Alvarado, "Creating an Electromagnetic Transient Program in MATLAB: MatEMTP", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, no. 1, pp. 380.388, Jan. 1997.
- [65] G. Sybille, "*SimPowerSystems User's Guide, Version 4*", published under sublicense from Hydro-Qu'ebec, and The MathWorks, Inc., Oct. 2004, available at <http://www.mathworks.com>.
- [66] K. Schoder, A. Hasanovi'c, A. Feliachi, and A. Hasanovi'c, "PAT: A Power Analysis Toolbox for MATLAB/Simulink", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 42.47, Feb. 2003.
- [67] C. D. Vournas, E. G. Potamianakis, C. Moors, and T. Van Cutsem, "An Educational Simulation Tool for Power System Control and Stability", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 48.55, Feb. 2004.
- [68] F. Milano, "PSAT, "Matlab-based Power System Analysis Toolbox",02, available at <http://thunderbox.uwaterloo.ca/~fmilano>.
- [69] D. Karlsson and D. J. Hill, "Modelling and Identification of Nonlinear Dynamic Loads in Power Systems", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 157.166, Feb. 1994.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Adana'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Dörtyol/HATAY'da tamamladıktan sonra lise öğrenimini Malatya'da tamamladı. 2001 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Bilgisayar Öğretmenliği Bölümü'nü kazandı. 2005 yılında bu bölümden mezun oldu ve aynı yılda İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen Malatya Yeşilyurt Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezi'nde bilgisayar öğretmeni olarak çalışmaktadır.