

136709

T.C
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANA BİLİM DALI

FACTS ELEMANLARI KULLANILAN GÜÇ AKIŞ
SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

ULAŞ EMİNOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ


DANIŞMAN: Doç. Dr. Saadetdin HERDEM


136709
T.C. NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


HAZİRAN 2003

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne:

Bu çalışma jürimiz tarafından ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mehmet TÜMAY (Çukurova Üniversitesi).....

Üye : Doç. Dr. Saadetdin HERDEM (Niğde Üniversitesi, Danışman).....

Üye : Doç. Dr. Tankut YALÇINÖZ (Niğde Üniversitesi).....

ONAY:

Bu tez 06/06/2003 tarihinde, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 2003/13-06-a sayılı kararıyla belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun kararıyla kabul edilmiştir.

06/06/2003


Doç. Dr. Aydın TOPÇU

Enstitü Müdürü

ÖZET

FACTS ELEMANLARI KULLANILAN GÜÇ AKIŞ SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

EMİNOĞLU, Ulaş

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Saadetdin HERDEM

Haziran 2003, 117 Sayfa

Son yıllarda güç elektroniği elemanlarının akım ve gerilim kapasitelerinin artması Esnek AC İletim Sistemlerinin (FACTS) hızla gelişmesini sağlamıştır. FACTS elemanları güç kontrolünü ve mevcut iletim hatlarının kullanılabilir kapasitesini arttırmak için yeni imkanlar oluşturmuştur.

Bu tezde, FACTS elemanlarından Statik Var Kompanzator (SVC), Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC), Statik Kompanzator (Statcom), Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC), Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC) ve Faz Kaydırıcılarının matematiksel modeli, tasarımı ve temel devre yapısı incelenmektedir. SVC, TCSC ve Statcom kontrolü Matlab/Simulink ve Power System Blockset kullanılarak yapılmıştır. FACTS elemanlarının güç sistemine etkisi bir çok uygulama ile incelenmiştir. İlk olarak dağıtık parametrelili iletim hatlı, iki baralı basit bir sistem SVC ve Statcom ile yük gerilimi ve akımının kontrolü için kullanılmıştır. Tezde ikinci olarak dinamik (değişken) yüklü güç sisteminde TCSC ve SVC'nin etkileri incelenmiştir. Son olarak, beş baralı güç sisteminde SVC ve TCSC'nin yük akışı ve gerilim regülasyonuna olan etkileri gösterilmiştir.

Anahtar Sözcükler: FACTS, SVC, TCSC, Statcom, UPFC, Faz Kaydırıcısı, Enerji İletim Sistemleri, Seri ve Paralel Kompanzasyon, Dinamik Yük, Güç Akışı, Gerilim regülasyonu

SUMMARY

INVESTIGATION OF POWER FLOW SYSTEMS USING FACTS DEVICES

EMİNOĞLU, Ulaş

Nigde University

University School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical & Electronics Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Saadetdin HERDEM

January 2003, 117 Pages

Improvement of voltage and current limits on the power electronics devices leads to a fast development of Flexible AC transmission Systems (FACTS) in the last decade. FACTS devices open up new opportunities for controlling power and enhancing the usable capacity of existing transmission lines.

In this thesis, the mathematical model, design and the basic structure of The FACTS devices such as Static Var Compensator (SVC), Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), Static Compensator (Statcom), Static Synchronous Series Capacitor (SSSC), Unified Power Flow Controller (UPFC) and Phase Shifter, are investigated. The controls of SVC, TCSC and Statcom are done using Matlab/Simulink and Power System Blockset. The effect of FACTS devices on power system are analysed with few applications. Firstly, a simple two buses system with distributed parameter line is used for controlling load voltage and current with SVC, TCSC and Statcom. Secondly, the effects of TCSC and SVC devices on power system with dynamic loads are investigated. Finally, the impacts of the SVC and TCSC on power flow and voltage regulation are demonstrated on a power system with five buses.

Key Words: FACTS, SVC, TCSC, Statcom, UPFC, Phase Shifter, Transmission Systems, Series and Shunt Compensation, Dynamic Load, Power Flow, Voltage regulation

ÖNSÖZ

Bu çalışmada Tristör Kontrollü Reaktör ve invertör temelli FACTS cihazlarından Statik Var Kompanzatör (SVC) ve Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) ile Statcom, Statik Senkron Seri Kapasitör, Birleşik Güç Akış Kontrolörü ve Faz kaydırıcılarının temel devre yapısı, çalışma prensibi ve güç sistemlerindeki kullanımını incelenmiştir.

Bu elemanların farklı enerji sistemi problemlerine uygulaması incelenerek çalışmaların tamamı Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Gerilim ve akım kontrolünün FACTS elemanları ile nasıl yapılacağı ve FACTS cihazlarının değişken yüklü enerji sisteminde ki etkisi incelenmiştir. SVC ve TCSC'nin enerji sisteminde güç akışına etkisi başka bir uygulama olarak alınmıştır. Son olarak Statik Kompanzatör (Statcom) kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu simulink ortamında gerçekleştirilmiştir.



TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana her türlü konuda destek olan sayın danışmanım Doç. Dr. Saadetdin HERDEM ve benden yardımlarını esirgemeyen sayın Doç. Dr. Tankut YALÇINÖZ'e ayrıca Elektrik-Elektronik mühendisliği bölümünün değerli öğretim elemanlarına, yaşamım boyunca benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Bu çalışma, Devlet Planlama Teşkilatı tarafından DPT 2003K120880-2, 2003. nolu proje kapsamında desteklenmektedir. Tez araştırmasının pratik uygulamasını gerçekleştirmek amacıyla verdikleri destekten dolayı Devlet Planlama Teşkilatı Müdürlüğüne teşekkür borçluyuz.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
SUMMARY	iv
ÖNSÖZ	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR	xv
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. TRİSTÖR KONTROLLÜ REAKTÖR	6
2.1 Giriş	6
2.2 TCR Eşdeğer reaktans ifadesinin belirlenmesi	7
BÖLÜM 3. STATİK VAR KOMPANZATÖR	12
3.1 Giriş.....	12
3.2 SVC Sürekli Durum Analizi ve Kontrol tekniği.....	12
3.3 Statik VAR Kompanzatör (SVC) Limitlerinin Belirlenmesi	17
3.4 SVC'nin Güç Sistemlerine Uygulanması	19
3.5 Statik Var Kompanzatör (SVC) Tasarımı	21
3.6 Tristör Anahtarlamaalı Kapasitör (TSC)	22
BÖLÜM 4. TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KAPASİTÖR (TCSC)	24
4.1 Seri Kompanzasyon	24
4.2 TCSC Sürekli Durum Analizi.....	25
4.2.1 TCSC çalışma modları.....	34
4.2.2 TCSC kontrol stratejileri ve limitleri.....	36
4.3 TCSC Tasarımı	39
BÖLÜM 5. İNVERTÖR ANAHTARLAMAalı PARALEL VE SERİ KOMPANZATÖRLER	41
5.1 Giriş	41

5.2 Üç Fazlı İnvörtörler	41
5.3 Dalga Genişlik Modülasyonlu (PWM) Anahtarlama Yöntemi	44
5.4 Statik Kompanzator (Statcom)	46
5.4.1 Statcom sürekli durum analizi	48
5.4.2 Statcom kontrol tekniği	50
5.4.3 Statcom frekans cevabı	55
5.5 Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC)	56
5.5.1 SSCC sürekli durum analizi ve kontrol tekniği	58
BÖLÜM 6. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ KONTROLÖRÜ (UPFC) VE FAZ	
KAYDIRICILARI	63
6.1 Birleşik Güç Akış Kontrolörü	63
6.2 Birleşik Güç Akışı Kontrolörü Sürekli Durum Analizi	64
6.3 UPFC ile Kontrol ve Dinamik Performansı	67
6.3.1 Paralel konvertör kontrolü	68
6.3.2 Seri konvertör kontrolü	69
6.3.3 UPFC dinamik performansı	74
6.4 UPFC Temel Frekans Modeli	77
6.5 Faz Kaydırıcıları	80
6.5.1 Statik faz kaydırıcı sürekli durum modeli	82
BÖLÜM 7. FACTS ELEMANLARI KULLANILAN GÜÇ AKIŞ SİSTEMLERİNİN	
İNCELENMESİ	87
7.1 SVC ve TCSC Kullanılarak Enerji İletim Sistemlerinde Gerilim	
ve Akım Kontrolü	87
7.1.1 SVC ile reaktif güç kompanzasyonu yapılarak	
gerilim kontrolü	89
7.1.2 TCSC ile enerji iletim hatlarında seri kompanzasyon yapılarak hat	
sonu akım ve geriliminin kontrolü	92
7.2 Değişken Yüklü Güç Sistemlerinde SVC ve TCSC Performansının	
İncelenmesi	95
7.2.1 SVC ile reaktif güç kompanzasyonu yapılarak değişken yüklü	
güç sistemlerinde gerilim kontrolü	97
7.2.2 TCSC ile seri kompanzasyon yapılarak değişken yüklü	

güç sistemlerinde gerilim kontrolü	100
7.3 SVC ve TCSC'nin Enerji İletim Sistemlerinde Güç Akışına Etkisinin İncelenmesi	102
7.3.1 SVC'nin enerji iletim sistemlerinde güç akışına etkisinin incelenmesi	104
7.3.2 TCSC'nin enerji iletim sistemlerinde güç akışına etkisinin incelenmesi	106
7.4 Statik Kompanzator (Statcom) Kullanılarak Reaktif Güç Kompanzasyonu	108
BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	112
KAYNAKLAR	114

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1	TCR akımının bir pertot aralığı için değişimi	9
Tablo 7.1	Aktif ve reaktif gücün belirli zaman aralıklarındaki değerleri	95
Tablo 7.2	Yk ve Generatör güçleri	103
Tablo 7.3	Kompanzasyonsuz durum için bara gerilimleri, faz açısı ve görünür güç değerleri	104
Tablo 7.4	SVC ile reaktif güç kompanzasyonu durumunda bara gerilimlerindeki değişimler	105
Tablo 7.5	SVC ile reaktif güç kompanzasyonu durumunda görünür güçlerdeki değişimler	106
Tablo 7.6	TCSC ile seri kompanzasyon durumunda bara gerilimlerindeki değişimler	107
Tablo 7.7	TCSC ile Seri kompanzasyon durumunda görünür güçlerdeki değişimler.....	108

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	TCR devre şeması	6
Şekil 2.2	TCR tetikleme devresi	7
Şekil 2.3	TCR Gerilim ve akımının $\alpha=90^\circ$ (a) ve $\alpha=126^\circ$ (b) tetikleme açlarına göre değişimi	8
Şekil 2.4	TCR reaktansının tetikleme açısına göre değişimi	11
Şekil 3.1	SVC temel devre şeması	13
Şekil 3.2	Gerilim kontrolü için SVC blok diyagramı.....	14
Şekil 3.3	SVC kontrolör modeli	15
Şekil 3.4	SVC'nin geçici kararlılık modeli	15
Şekil 3.5	SVC'nin sürekli durum uç karakteristiği (a), ideal karakteristik (b)	16
Şekil 3.6	SVC uç karakteristiği	17
Şekil 3.7	SVC'nin eşdeğer reaktans karakteristiği	19
Şekil 3.8	SVC'nin güç sistemine bağlantı şeması	19
Şekil 3.9	SVC modelinin güç sistemine bağlantı şeması	20
Şekil 3.10	TCR eşdeğer suseptansının α' ya göre değişimi	21
Şekil 3.11	TSC tek faz devre şeması (a), üç faz devre şeması (b), anahtarlama devresi (c)	22
Şekil 4.1	Basit bir güç sisteminde seri kompanzasyon devre şeması (a), çıkış geriliminin aktarılan aktif güce göre değişimi (b)	24
Şekil 4.2	Sabit kapasitör (a), Tristör anahtarlama seri kapasitör (b) ve Tristör kontrollü seri kapasitör (c) devre şemaları	25
Şekil 4.3	Basit TCSC devre şeması	26
Şekil 4.4	İletim hattı ve TCSC modeli	27
Şekil 4.5	$\alpha=120^\circ$ için hat akımının zamana göre değişimi	27

Şekil 4.6	$\alpha=120^\circ$ için TCSC elemanlarının akım ve gerilimlerinin zamana göre değişimi	29
Şekil 4.7	$\alpha=160^\circ$ için hat akımının zamana göre değişim grafiği	29
Şekil 4.8	$\alpha=160^\circ$ için TCSC elemanlarının akım ve gerilim grafikleri	30
Şekil 4.9	TCSC reaktansının frekansa göre değişimi	31
Şekil 4.10	TCSC'nin güç sistemine bağlantı şeması	33
Şekil 4.11	Tıkama modu için seri kapasitör gerilimi ve akımı	34
Şekil 4.12	Baypas modu için akım ve gerilimin değişimi	35
Şekil 4.13	TCSC empedans karakteristiği	36
Şekil 4.14	TCSC empedans kontrolü diyagramı	38
Şekil 4.15	Geri beslemeli TCSC empedans kontrolü blok diyagramı	38
Şekil 4.16	Akım kontrolü için TCSC blok diyagramı	39
Şekil 5.1	Üç fazlı invertör şeması	42
Şekil 5.2	Üç fazlı invertör çıkış gerilimlerinin değişimi	42
Şekil 5.3	İki invertörlü (12 puls) devre şeması	43
Şekil 5.4	İki invertörlü (12 puls) devrenin bağlantı şeması	43
Şekil 5.5	İki invertörlü (12 puls) sistemde invertör çıkış gerilimleri ve toplam çıkış geriliminin zamana göre değişimi.....	44
Şekil 5.6	Darbe genişlik modülasyonu gerilimleri ve çıkış geriliminin değişimi	45
Şekil 5.7	İki invertörlü Statcom devre şeması	47
Şekil 5.8	Kontrol edilmeyen Statcom karakteristiği	49
Şekil 5.9	Statcomun sürekli durum V-I karakteristiği	50
Şekil 5.10	Statcomlu güç sisteminin tek faz devre şeması	51
Şekil 5.11	PWM gerilim kontrollü Statcom blok diyagramı	52
Şekil 5.12	Statcom geçici kararlılık modeli	53

Şekil 5.13 Statcom için PWM gerilim kontrolörü (a), faz açısı kontrolörü (b) blok diyagramları	54
Şekil 5.14 Statcom akım kazancının frekansa göre değişimi	55
Şekil 5.15 Statcom kayıplarının akıma göre değişimi	56
Şekil 5.16 SSSC'li güç sistemi devre şeması (a), gerilimlere ait fazör diyagramı (b)	57
Şekil 5.17 SSSC ile kompanze edilen hattın eklenen gerilime göre aktif güç değişimi	58
Şekil 5.18 SSSC'nin güç sistemine bağlantı şeması	59
Şekil 5.19 SSSC akım kontrolü modeli	60
Şekil 6.1 UPFC'nin seri senkron gerilim kaynağı modeli	64
Şekil 6.2 UPFC temel devre şeması	65
Şekil 6.3 UPFC ile kontrol edilen AC sistem aktif gücünün faz açısına göre değişimi	67
Şekil 6.4 UPFC için sürekli durum modeli devre şeması	70
Şekil 6.5 UPFC'ye ait paralel kontrolör blok diyagramları	72
Şekil 6.6 UPFC seri konvertörü için kontrolör blok diyagramı	72
Şekil 6.7 UPFC'li basitleştirilmiş güç sistemi devre şeması	75
Şekil 6.8 UPFC ile kontrol edilen hattın giriş ve çıkış gerilim ve akımlarının değişimi	75
Şekil 6.9 Paralel konvertörün tek fazı için devre şeması	76
Şekil 6.10 Faz kaydırıcı bağlantı şeması (a), çıkış gerilimi fazör diyagramı (b)	80
Şekil 6.11 Mekanik anahtarlama faz kaydırıcı şeması (a), fazör diyagramı (b)	81
Şekil 6.12 Faz kaydırıcı tek faz devre modeli	82
Şekil 6.13 Faz kaydırıcısının gerilim ve aktif güce etkisinin grafiksel olarak değişimi	83
Şekil 6.14 Çok kademeli Çıkış gerilimli faz kaydırıcı devre şeması (a), Tristör anahtarları (b), çıkış gerilimi için fazör diyagramı (c)	84
Şekil 6.15 Faz açısı kontrol edilen faz kaydırıcı devre şeması(a), anahtarlama devresi (b), gerilimler için fazör diyagramı (c)	85

Şekil 6.16	PWM kontrollü faz kaydırıcı devre şeması (a), Gerilimlere ait fazör diyagramı (b)	86
Şekil 7.1	İki baralı iletim hattı tek faz devre şeması	88
Şekil 7.2	Sistemde herhangi bir kontrol yapılmadığı durum için hat sonu gerilimi ve akımı ve bunlardaki toplam harmonik bozulmaların zamana göre değişimi	88
Şekil 7.3	SVC ile reaktif güç kompanzasyonu devre şeması	90
Şekil 7.4	SVC ile reaktif güç kompanzasyonu yapılması durumunda sistem değişkenlerinin değişimi	90
Şekil 7.5	TCSC ile seri kompanzasyon devre şeması	92
Şekil 7.6	TCSC ile seri kompanzasyon sonucunda elde edilen sonuçların değişim grafikleri	93
Şekil 7.7	Toplam aktif ve reaktif gücün değişimi	95
Şekil 7.8	Kompanzasyonsuz durum için değişken yüklü güç sisteminde akım ve gerilimin değişimi	96
Şekil 7.9	Değişken yüklü güç sisteminde SVC ile reaktif güç kompanzasyonu devre Şeması	97
Şekil 7.10	SVC ile değişken yüklü sistemde reaktif güç kompanzasyonu yapılması sonucu elde edilen simülasyon sonuçları	98
Şekil 7.11	TCSC ile seri kompanzasyon devre şeması	100
Şekil 7.12	TCSC ile değişken yüklü sistemde seri kompanzasyon yapılması sonucu elde edilen simülasyon sonuçları	100
Şekil 7.13	Beş iletim sisteminin tek faz devre şeması	103
Şekil 7.14	SVC'nin hatta bağlantı şeması	104
Şekil 7.15	TCSC'nin hatta bağlantı şeması	106
Şekil 7.16	Statcom kontrol şeması ve simülasyon sonuçları	109
Şekil 7.17	Statcomla yapılan gerilim kontrolü ile elde edilen simülasyon sonuçları	109

SİMGE VE KISALTMALAR

V	Gerilim
I	Akım
P	Aktif Güç
Q	Reaktif Güç
S	Görünür (Kompleks) Güç
Z	Eşdeğer Empedans
THD	Toplam Harmonik Bozulma
FACTS	Esnek AC İletim Sistemleri (Flexible AC Transmission Systems)
EPRI	The Electric Power Research Institute
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
TCR	Tristör Kontrollü Reaktör
SVC	Statik VAr Kompanzator
TCSC	Tristör Kontrollü Seri Kapasitör
Statcom	Statik Kompanzator
SSSC	Statik Senkron Seri Kapasitör (Kompanzator)
UPFC	Birleşik Güç Akış Kontrolörü
SVS	Statik Gerilim Kaynağı
TSC	Tristör Anahtarlama Kapasitör

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzün değişen enerji talebine bağlı olarak enerji iletim sistemlerinde kontrol edilebilirlik ve sistem kapasitesinin artırılması konuları son derece önem kazanmıştır. İletim hatlarının kuruluş amacı yük ile üretim merkezleri arasındaki bağlantıyı sağlayarak yükteki hava durumuna, saate, bölgesel farklılığa vb. gibi etkenlere bağlı değişimlerin en ekonomik şekilde karşılanmasını sağlamaktır. Enerji iletim hatlarından büyük güç transfer edilmesiyle yeni santral gereksinimi minimize edilerek mevcut santraller verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun yanında komşu ülke ve bölgelerden enerji alımına ve satışına imkan tanınmış olmaktadır. Son yıllarda iletim hatlarının yüklenmesi büyük ölçüde artmıştır ve bu artış devam etmektedir. Yeni hat yapımı veya mevcut hatların yenilenmesi günümüzde en ekonomik senaryo olarak karşımıza çıkmaktadır. Şu an kullandığımız iletim sistemlerinin çoğunda fiziksel sınırlamalar nedeniyle istenilen miktarda güç akışı sağlanamamaktadır. İletim sistemleri günümüzde mekanik veya elektromekanik kontrol elemanları ile kumanda edilmektedir. (Yalçınöz ve diğ., 2001), (Hingorani ve diğ., 1993)

AC sistemlerde güç akışı, faz açısı, hat empedansı ve hat geriliminin bir fonksiyonudur. Bu değişkenlerin kontrolündeki herhangi bir aksama istenmeyen reaktif güç akışına, yüksek güç kayıplarına ve yüksek veya düşük gerilimlere yol açmaktadır. Paralel ve seri kompanzasyon yapılarak hat empedansının kontrolü ile gerilim büyüklüğü, faz açısı ve hat akımının kontrolü yapılarak güç faktörünün iyileştirilmesi dolayısıyla güç transferinin artırılması mümkündür. Güç sistemlerinde gerilim kontrolü yük bakımından büyük öneme sahiptir. Sistemdeki gerilim düşümü veya gerilim yükselmesi beslenen yüklerde arızalara ve performans düşüşüne neden olmaktadır. (Yalçınöz ve diğ., 2001), (Karady ve diğ., 2000)

Gelişen yarı iletken teknolojisi ile büyük güçte güç elektroniği elemanları geliştirilmektedir. Bu elemanlar kullanılarak enerji sistemlerinin kontrolü "FACTS: Esnek

AC İletim Sistemleri” adı verilen daha verimli, hızlı ve güvenilir bir teknolojinin oluşmasına imkan sağlamıştır. (Canizares ve diğ., 2000), (Canizares ve diğ., 1998)

FACTS terimi 1990’lı yıllarda elektrik bilimi literatürüne geçmekle beraber daha önceki yıllarda küçük güçlü bazı uygulamalarda da kullanılmıştır. Bu teknoloji, günümüzde mekanik olarak AC güç iletim sistemlerinin limitlerini aşmak amacı ile kullanılmaktadır. Mikroelektronik, iletişim ve güç elektroniği ile ilerleyen bu teknolojilerin bileşik etkisi onları daha güvenli ve etkin bir hale getirmiştir. FACTS teknolojisinin enerji sistemindeki uygulamalarında gerekli standartlaşmanın oluşması için ve FACTS cihazlarının dizaynında, işletmesinde projelendirilmesinde ve koordinasyonunda dikkat edilecek hususların belirlenmesi için başta EPRI (The Electric Power Research Institute) ve CIGRE (International Council on Large Electric Systems) olmak üzere bir çok kuruluş çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmalarda teknik problemlerin çözümünün yanı sıra ekonomik ve politik unsurlar da göz önünde tutulmaktadır.

FACTS kontrolörlerinin enerji iletim konfigürasyonuna ve işletimine verdiği cevabın belirlenmesi önemlidir. Bu nedenle reaktif güç transferinin miktarı, sistem gerilim profili, enerji sisteminin işletmedeki etkisi, kullanılan elemanların konfigürasyonu FACTS kontrolörlerinin dizaynında önemli kriterlerdir. Planlama çalışmasında temel kriterler olarak en uygun performans ve maliyet alınabilir. FACTS aygıtlarının iletim sistemlerinin sınır koşullarının belirlenmesinde ve iletim sisteminde meydana gelen problemlerin çözümünde önemli rol alacağı düşünülmektedir. FACTS cihazları AC iletim sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu, faz açısı kontrolü, iletim hattının empedans kontrolü ile sistemdeki akım ve gerilimin istenilen değerde kontrolü gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. (Hingorani ve diğ., 1993), (Pilotti ve diğ., 1997) Bunlar Tristör Kontrollü Reaktör ve invertör temelli olmak üzere iki ana grupta incelenir. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) temelli FACTS cihazları da iki ana gruba ayrılır.

- Statik Var Kompanzatör (SVC)
- Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)

Bazı uygulamalarda Statik Var Kompanzatör için kullanılan kapasitörün bağlantı şekli değiştirilerek farklı bir devre şeması elde edilir. Bu durum için de Bölüm 3’de açıklanacağı gibi SVC’den farklı bir çalışma prensibi veya kullanım amacına sahip olduğu söylenemez.

Yarı iletken teknolojisinin gelişmesi farklı FACTS cihazlarının geliştirilmesine imkan sağlamıştır. Bunlar invertör temelli FACTS cihazları olarak adlandırılır. İnvvertör temelli FACTS cihazları ile güç sistemlerinde empedans kontrolü, faz açısı kontrolü, gerilim regülasyonu ve reaktif güç kompanzasyonu gibi bir çok uygulamalar yapılmaktadır. Bu elemanlar

- Statik Kompanzatör (Statcom)
- Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC)
- Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC)
- Faz Kaydırıcıları

olmak üzere dört temel yapıda incelenmektedir. (Canizares ve diğ., 1999)

Yük akışının kontrolü enerji sistemlerinin önemli konularından biridir. FACTS cihazlarıyla yük akışının kontrol edilmesi ve yük akışının analizi incelenerek bu çalışmada iletim hattının kapasitesi FACTS cihazlarıyla artırılmıştır. (Gotham ve diğ., 1998) İngiliz NGC firmasının sahip olduğu iletim hattının güvenli ve ekonomik olarak işletilmesi için FACTS'ın yük akışının kontrollüne etkisi araştırılmıştır. (Li ve diğ., 2001) SVC ve TCSC modellerini kullanarak enerji iletim sistemlerinde güç akışı (Garng ve diğ., 2001) ve TCR temelli FACTS cihazlarının güç sistemlerinde toplam güç transferi kapasitesinin değişimine olan etkisi (Yan ve diğ., 2001) tarafından incelenmiştir. (Preedavichit ve diğ., 1998) optimum reaktif yük akışı problemini FACTS cihazlarının kontrol parametrelerini göz önüne alarak çözmüştür. (Chang ve diğ., 1998) gerilim kararlılığının iyileştirilmesi için geliştirdikleri optimizasyon algoritmasıyla SVC (Statik Var Kompansatör) planlamasını gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmayla SVC'nin bağlanma yerinin en iyi şekilde belirlenmesi ve sistemin kayıplarının azaltılması amacına ulaşmışlardır. Ayrıca SVC'nin büyüklüğünün ve bağlantı yerinin optimum olarak seçilmesi için bazı metotlar geliştirilmiştir. (Thukaram ve diğ., 2000)

Yapılan çalışmaların büyük bir bölümünde FACTS cihazlarının modeli (SVC için kapasitif reaktif güç eşdeğeri, TCSC için kapasitif veya endüktif reaktans değeri) kullanılarak enerji sistemine etkileri teorik olarak incelenmiştir. Geliştirilen metotların ve yapılan çalışmaların tam olarak doğruluğu uygulamaların simülasyonu veya deneysel olarak yapılması sonucu gösterilebilmektedir. Enerji iletim sistemlerinde yük zamanla değiştiğinden bu cihazların değişken yüklü sistemlerdeki dinamik davranışı simülasyonla veya deneysel olarak

belirlenebilir. Ayrıca FACTS cihazları anahtarlama kontrolörleri olduğundan teorik olarak yapılan analizlerde harmonik bileşenlerin sistem değişkenleri üzerindeki etkisi incelenmemektedir.

Bu çalışmada, FACTS elemanlarının enerji iletim sistemlerinde gerilim, akım ve güç akışına etkisinin incelenmesi; SVC ve TCSC'nin enerji iletim hatlarında mevcut hat kapasitesinin kullanımının artmasına etkisinin incelenmesi; hat sonu gerilimi veya akımının kontrolü ile güç akışının optimum kontrolünün gerçekleştirilmesi; değişken yük durumunda SVC ve TCSC dinamik analizinin yapılması amaçlanmıştır.

Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) ve invertör temelli FACTS cihazlarının sürekli durum analizi incelenmiştir. Bölüm 2'de TCR yapısı incelenerek kullanılan tristörlerin tetikleme açılarına bağlı olarak değişen eşdeğer reaktans karakteristiği verilmiştir. TCR'ye paralel kapasitör bağlanmasıyla elde edilen paralel reaktif güç kompanzatorü SVC'nin sürekli durum analizi verilerek, kontrol tekniği, tasarımı ve güç sistemlerine uygulanması durumundaki güç akış denklemleri Bölüm 3'de incelenmiştir. Aynı şekilde TCR temelli seri kompanzatorü olan TCSC'nin sürekli durum analizi yapılarak Enerji İletim Sistemlerinde aktif ve reaktif güç akışına etkisi, çalışma modları ve tasarımı Bölüm 4'de detaylı olarak verilmiştir.

Yarı iletken teknolojisinin gelişmesi ile yüksek akım ve gerilim kapasitesine sahip güç elektroniği elemanlarının üretimi invertör temelli FACTS cihazlarının tasarımına imkan sağlamıştır. Bölüm 5'de paralel reaktif güç kompanzatorü Statcom'un devre yapısı, çalışma prensibi ve kontrol tekniği incelenerek dinamik analizi verilmiştir. Statcomun enerji iletim sistemlerine seri bağlanmasıyla elde edilen Statik Senkron Seri Kapasitör SSSC'nin sürekli durum analizi ve kontrolü verilmiştir. Statcom ve SSSC kullanılarak elde edilen birleşik güç akış kontrolörünün (UPFC) devre şeması, UPFC paralel ve seri konvertörlerinin kontrolü Bölüm 6'da incelenerek dinamik performansı ve temel frekans modeli detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca bu bölümde güç sistemlerinde faz açısı kontrolü için kullanılan faz kaydırıcı devre şeması ve fazör diyagramları incelenmiştir.

FACTS cihazlarından SVC, TCSC ve Statcomun Matlab/Simulink programı kullanılarak yapılan dinamik analizi, enerji iletim sistemlerinde statik ve dinamik (kademeli olarak değişen) yük kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu (SVC, Statcom kullanılarak) ve hat

empedansının değiştirilmesi (TCSC kullanarak) yoluyla yük akımı ve geriliminin kontrolü Bölüm 7'de verilmiştir. Ayrıca birden fazla generatör ve iletim hattının bağlı olduğu güç sisteminde SVC ve TCSC kullanarak sırasıyla paralel ve seri kompanzasyon yapılması durumunda sistemdeki aktif ve reaktif güç akışının değişimi de Matlab/Simulink programı kullanılarak incelenmiştir.



BÖLÜM 2

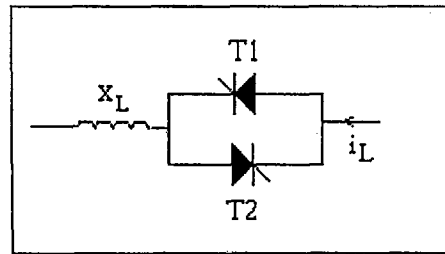
TRİSTÖR KONTROLLÜ REAKTÖR (TCR)

2.1 Giriş

Tristör kontrollü reaktör (TCR); sabit reaktanslı endüktans (L) ve buna seri bağlı birbirine zıt yönlü, paralel iki tristörden oluşmaktadır. Tristörler simetrik olarak tetiklenerek TCR reaktansı değiştirilir. Pratikte tristörler yerine birden fazla seri tristör grupları bağlanarak bloke edilen gerilim seviyesi artırılmaktadır. TCR akımı gerilimden yaklaşık olarak 90° geridedir. Çekilen akımın aktif bileşeni çok küçük olup devre kayıpları TCR reaktif gücünün %0.5-%2'si oranında değişmektedir. TCR eşdeğer reaktansının ifadesi elde edilirken bazı ön kabüller yapılmaktadır.

- Çekilen aktif güç çok küçük olduğundan indüktör rezistansı ihmal edilmektedir.
- TCR geriliminin tam sinüzoidal olduğu kabul edilmektedir.

Tristör Kontrollü Reaktöre ait genel devre şeması Şekil 2.1'de verilmiştir.



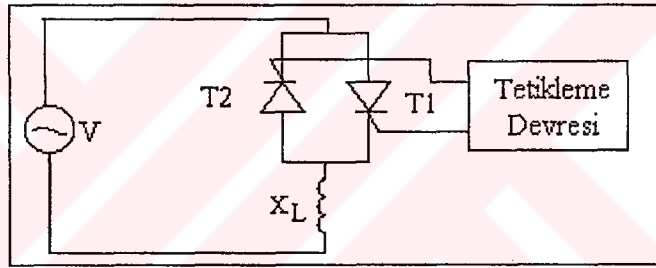
Şekil 2.1 TCR devre şeması

TCR tristörlerinin tetikleme açısı reaktör geriliminin ve akımının pozitif başlangıç noktalarından belirlenir. Tristörler simetrik olarak tetiklenmektedir. Bu durumda maksimum tetikleme açısı 180° olur. Tetikleme açısı 90° olduğunda her iki tristör kullanılan endüktans dan dolayı sürekli iletimde kalarak TCR'yi sürekli devrede tutmaktadır. (Hingorani ve diğ., 1999) Bu değerden küçük tetikleme açılarında büyük DC

bileşene sahip simetrik olmayan akım akmaktadır. Bu nedenle TCR tristörleri 90° - 180° arasında tetiklenir. Tetikleme açısının artması ile akımın temel bileşen değeri azalır. Bu endüktans değerinin artırılmasına eşdeğerdir. çekilen akımın azalması reaktif gücün azalmasına neden olur. Dolayısıyla TCR tetikleme açısının kontrolü ile değişken empedans elde edilmektedir. Bu da güç sistemlerinde seri veya paralel olarak reaktif güç kompanzasyonu ve sisteme reaktif gücün aktarılması ile hat sonu geriliminin ve hat üzerindeki gerilim düşümünün kontrolüne imkan sağlamaktadır. (Rico ve diğ., 1996)

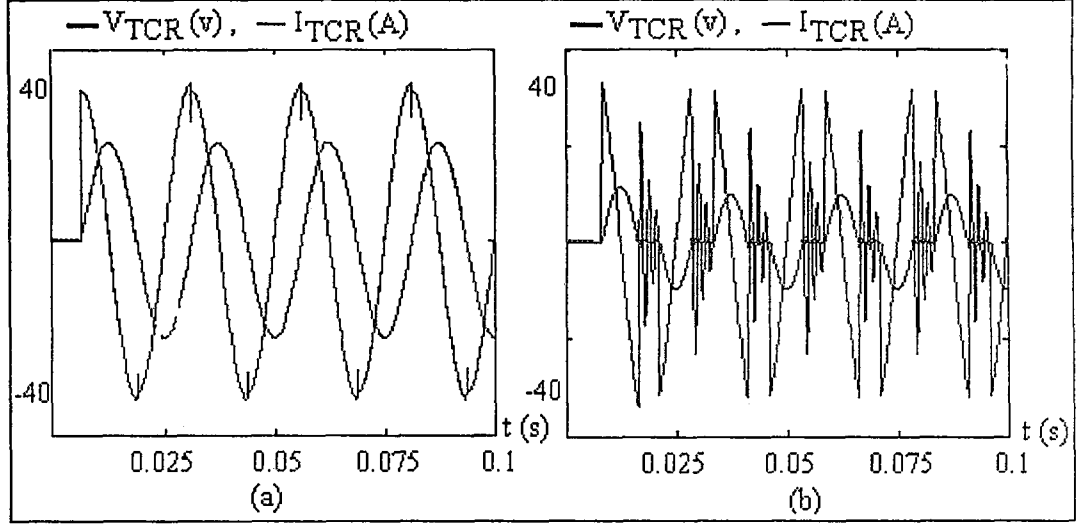
2.2 TCR Eşdeğer Reaktans İfadesinin Belirlenmesi

TCR gerilimi ve akımının tetikleme açısına bağlı olarak değişimini elde etmek için Şekil 2.2'de verilen tetikleme devresinden yararlanır.



Şekil 2.2 TCR tetikleme devresi

Devrede $v=40$ sinöt ac giriş gerilimi, $X_L=1.57 \Omega$ ve $f=50$ Hz olarak alınmıştır. Farklı iki tetikleme açısı için TCR akım ve geriliminin değişimleri Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3 TCR Gerilim ve akımının $\alpha=90^\circ$ (a) ve $\alpha=126^\circ$ (b) tetikleme açılarına göre değişimi

Şekil 2.3 (a)'dan görüldüğü gibi tetikleme açısının 90° olması durumunda TCR akım ve gerilimi sinüzoidal olarak değişmekte ve TCR sürekli iletimde kalmaktadır. Bu durumda TCR eşdeğer reaktansı endüktans reaktansı X_L 'ye eşit olur. Tetikleme açısının 126° olması durumunda akım ve gerilim tam sinüzoidal olmamakla beraber harmonik bileşenlere sahiptir. Akımın temel bileşeni bir önceki duruma nazaran daha düşüktür. Bu durumda TCR eşdeğer reaktansı X_L 'den büyük olur. Tetikleme açısı arttıkça akımın temel bileşeninin büyüklüğü azalmakta ve TCR eşdeğer empedansı artmaktadır. Tetikleme açısının 180° olması durumunda reaktans değeri sonsuz (açık devre) ve akım değeri sıfıra eşit olur. İletimde kalma açısı derece olarak σ ile gösterilirse tristörlerin tetikleme açısı cinsinden ifadesi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (2.1)$$

Sürekli durumda bir periyod için TCR gerilimi ve buna bağlı olarak akımının değişim ifadesi aşağıdaki şekilde gösterilir

$$v_L(\omega t) = \begin{cases} v_m \sin \omega t, & 0 \leq \omega t \leq \pi - \alpha, \quad \alpha \leq \omega t \leq 2\pi - \alpha, \quad \pi + \alpha \leq \omega t \leq 2\pi \\ 0, & \pi - \alpha < \omega t < \alpha, \quad 2\pi - \alpha < \omega t < \pi + \alpha \end{cases} \quad (2.2)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.3)$$

$$i(\omega t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L}(\cos \alpha - \cos \omega t), & \alpha < \omega t < \alpha + \pi \\ 0, & \alpha + \pi < \omega t < \alpha + 2\pi \end{cases} \quad (2.4)$$

Eğer gerilimin sıfır geçiş noktası başlangıç noktası olarak alınırsa TCR akımı Denklem 2.3'den yararlanılarak elde edilen integral ile hesaplanır. (Abdulla ve diğ., 1999) Akımın bir periyotluk zaman aralığında değişimi Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 TCR akımının bir periyot aralığı için değişimi

ωt	$i_L(\alpha, \omega t)$
$\omega t \in [0, \pi - \alpha]$	$\text{Im}(-\cos \alpha - \cos \omega t)$
$\omega t \in [\pi - \alpha, \alpha]$	0
$\omega t \in [\alpha, 2\pi - \alpha]$	$\text{Im}(\cos \alpha - \cos \omega t)$
$\omega t \in [2\pi - \alpha, \pi + \alpha]$	0
$\omega t \in [\pi + \alpha, 2\pi]$	$\text{Im}(-\cos \alpha - \cos \omega t)$

Burada $I_m = V_m / X_L$ maksimum indüktör akımı ve $w = 2\pi f$ temel frekans değeridir. Periyodu T olan bir $f(\theta)$ fonksiyonun Fourier serisine açılarak trigonometrik formda ifade edilmesi mümkündür.

$$f(\theta) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta \quad (2.5)$$

Buradaki katsayılar aşağıda verilen denklemler ile hesaplanır.

$$A_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta \quad (2.6)$$

$$A_n = \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos n\theta d\theta \quad (2.7)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin n\theta d\theta \quad (2.8)$$

TCR akımının Fourier analizinden $A_0=0$ ve $B_n=0$ elde edilir. Sürekli durum modeli için yalnızca temel frekans bileşeni alınır.

$$A_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_L(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (2.9)$$

Tablo 2.1'den akımın bir periyotluk değeri yerine yazılarak

$$A_1 = -\frac{I_m}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] \quad (2.10)$$

ifadesi elde edilir. Akımın temel bileşeni gerilimden 90° geride kalmaktadır.

$$i_L(\omega t) = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (2.11)$$

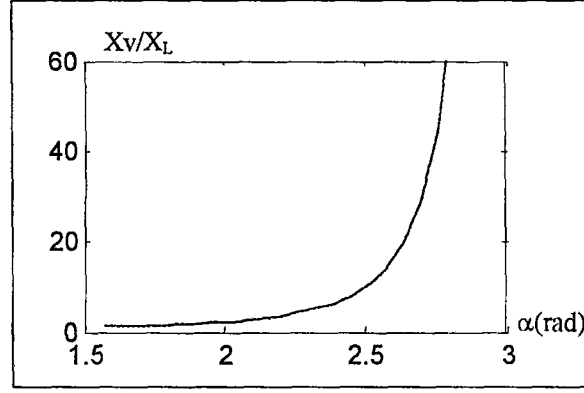
maksimum akım bileşeni denklemde yerine yazılırsa;

$$i_L(\omega t) = \frac{-V_m}{X_V} \cos \omega t \quad (2.12)$$

Fourier analizinden elde edilen akımın temel bileşeni ve Denklem 2.11'den kontrol edilebilen TCR reaktansının ifadesi elde edilir.

$$X_V = X_L \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad (2.13)$$

Elde edilen eşitlikte X_L endüktansının reaktansı ve α tristörlerin tetikleme açısıdır. (Larsen ve diğ., 1997) Üç fazlı sistemlerde üç adet TCR üçgen bağlanarak güç sistemine bağlanır. Böylece yüksek harmonik bileşenlerin üçgen bağlantı içinde dolaşarak güç sistemine akması engellenmiş olur. TCR tristörlerinin tetikleme açısı arttıkça akımdaki harmonik bozulmalar artmaktadır. Bu harmonikler tristörlerin simetrik olarak tetiklenmesinden dolayı tek bileşenlerdir. Üçgen bağlantı ile maksimum toplam harmonik bozulma katsayısı %10'nun altına düşürülür. TCR eşdeğer reaktansının endüktans reaktansı cinsinden tetikleme açısına göre değişimi Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4 TCR reaktansının tetikleme açısına göre değişimi

Tetikleme açısı α arttıkça TCR reaktansı artmakta ve tristörlerin iletimde kalma süreleri azalmaktadır. Ayrıca akımın harmonik bileşenleri de artmaktadır. (Larsen, 1997) Harmonikleri azalmak için pasif filtreler veya birden fazla TCR grupları paralel olarak bağlanır. Böylece TCR gruplarının yıldız veya üçgen olarak farklı bağlanması ile oluşan gerilimler arası faz farkı, toplam gerilim ve akımın harmonik bileşenlerinin azalmasına neden olur.

BÖLÜM 3

STATİK VAR KOMPANZATÖR (SVC)

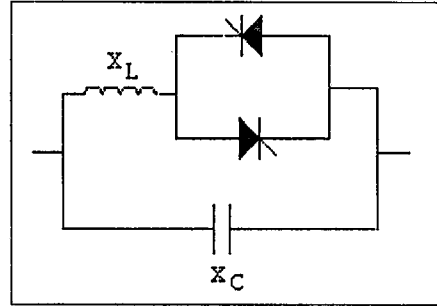
3.1 Giriş

Statik var kompanzatör (SVC) güç sistemine paralel bağlanarak çekilen veya aktarılan reaktif gücün kontrolü ile bağlı olduğu sistem geriliminin belirli limitlerde kontrolüne imkan sağlamaktadır. Statik terimi hareketli veya dönen bir parçadan oluşmadığından dolayı kullanılmaktadır. SVC, tristör kontrollü reaktör (TCR) ve buna paralel bir kondansatörden oluşur. Bazı durumlarda SVC tristör anahtarlamalı kapasitör ve buna paralel reaktör şeklinde tasarlanarak gerilim regülasyonu için kullanılmaktadır.

3.2 SVC Sürekli Durum Analizi ve Kontrol Tekniği

Güç elektroniğindeki teknolojik gelişmeler ve geniş elektronik kontrol metotları 1970 den bu yana hızlı statik VAR kompanzatör (SVC) uygulamalarına imkan sağlamıştır. Bu kompanzatör hızlı cevap verme, güvenli ve geniş çalışma aralığı için tasarlanmıştır. Uygulama alanlarının büyük çoğunluğunda reaktif güç üretimi ve kontrolü amaçlıdır (Mithulanathan ve diğ., 1999) Ayrıca SVC güç osilasyonlarının azaltılması için de kullanılmaktadır. SVC'nin esas fonksiyonu yerleştirildiği bölgede reaktif güç kompanzasyonu ile seçilen bara geriliminin kontrolüdür. Gerilimin belirli seviyede tutulması yük açısından son derece önemlidir. Düşük gerilim yük performansında düşüşe neden olmaktadır. Örneğin asenkron motorun moment ve hızının azalması, elektrik lambasının parlaklığının azalması vb. durumlar oluşabilir. Bunun yanısıra aşırı gerilim manyetik saturasyonlara ve harmonik bileşenlerin artışına neden olmaktadır. İki makinadan oluşan bir güç sisteminin sürekli durum için maksimum güç transfer limitinin kompanzasyon ile iki katına çıkartılması mümkündür. Sürekli durum kararlılığının artışı sistemin geçici durum kararlılığını da olumlu yönde etkilemektedir. Gerilim regülasyonu ve geçici durum kararlılığının artırılmasının yanı sıra SVC ile yapılan hızlı kontrol güç osilasyonlarının azalmasına neden olmaktadır. SVC genel olarak iki temel devre yapısına

sahiptir. Bunlardan ilki TCR (Tristör Kontrollü Reaktör) ve buna paralel kapasitör diğeri TSC (Tristör anahtarlamalı Kapasitör) ise Tristör Kontrollü Reaktör ve ona seri bağlı kapasitörden oluşmaktadır. Birinci olarak verilen TCR ve paralel kapasitörden oluşan SVC yapısı uygulamalarda geniş olarak kullanılmaktadır. İdeal bir SVC aktif ve reaktif güç kaybı olmayan, gerilimi referans gerilime eşit değişmeyen ve çok hızlı cevap verebilen kontrolör olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.1’de SVC devre şeması verilmiştir.



Şekil 3.1 SVC temel devre şeması

SVC eşdeğer empedansı TCR tristörlerinin tetikleme açısı değiştirilerek endüktif veya kapasitif olarak belirlenen sınırlar arasında değiştirilebilir. Endüktif değer için sistemden reaktif güç çekilmekte, kapasitif çalışma durumunda ise sisteme reaktif güç enjekte edilmektedir. SVC’nin tam analizi için ikinci bölümde verilen TCR eşdeğer reaktansından yararlanılır.

SVC’nin tristör kontrollü reaktör ve paralel bir kapasitörden oluşması nedeniyle TCR’nin eşdeğer reaktans ifadesinden yararlanarak SVC eşdeğer reaktansı X_e ’nin ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$X_e = X_C \frac{\pi / r_x}{\sin 2\alpha - 2\alpha + \pi(2 - 1/r_x)} \quad (3.1)$$

Burada $r_x = X_C / X_L$ ye eşit olup SVC’nin kapasitif ve endüktif çalışma aralığına göre değişmektedir. Temel frekansta dengeli çalışma durumunda geçici kararlılık için eşdeğer devre modeli oluşturularak denklemlerin per-unit cinsinden yazılması mümkündür.

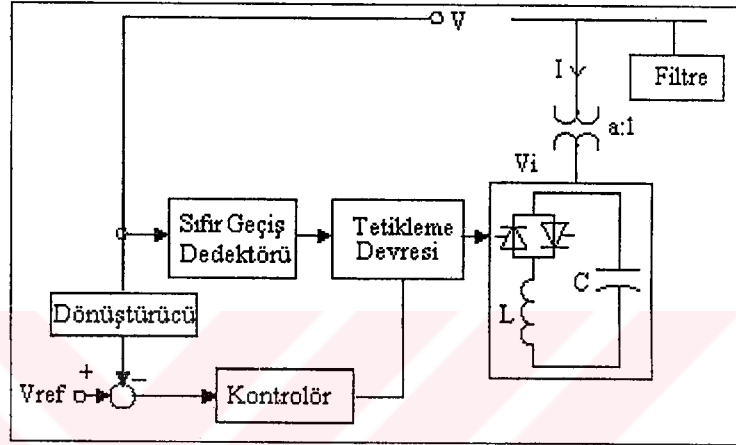
$$B_e - \frac{2\alpha - \sin 2\alpha - \pi(2 - X_L / X_C)}{\pi X_L} = 0 \quad (3.2a)$$

$$I - V_i B_e = 0 \quad (3.2b)$$

$$Q - V_i^2 B_e = 0$$

(3.2c)

Verilen denklemler V_i kapasitör gerilimi, α tetikleme açısı sınırlarının yanı sıra SVC akımı ve gerilimi sınırlarını da göstermektedir. (Faur, 1996) Nümerik işlemlerin kolaylığı açısından denklemlerde admitans modeli kullanılmaktadır. SVC ile gerilim kontrolünün blok diyagramı Şekil 3.2’de verilmiştir.



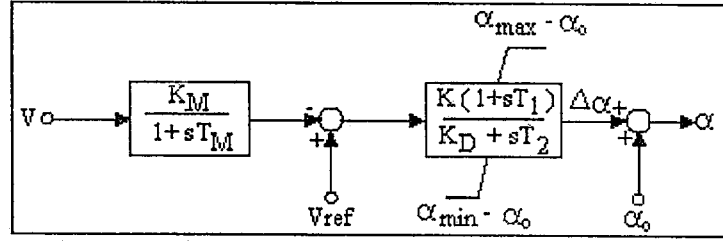
Şekil 3.2 Gerilim kontrolü için SVC blok diyagramı

Burada V_i kapasitör gerilimi, V ise kontrol edilen bara gerilimidir. (Canizares, 2000) SVC akımı kapasitif ve endüktif çalışma durumuna göre sırasıyla negatif ve pozitif olmaktadır. Filtre, SVC çıkış gerilimindeki harmonik bileşenlerin AC sisteme akmasını engellemek için kullanılır. Kontrol için başlangıç tetikleme açısı α_0 , $B_e=0$ eşitliğinden belirlenir. Bu durum SVC için rezonans durumu olup çekilen akım ve reaktif güç sıfırdır.

$$2 \alpha_0 - \sin 2\alpha_0 - \pi(2 - X_L/X_C) = 0$$

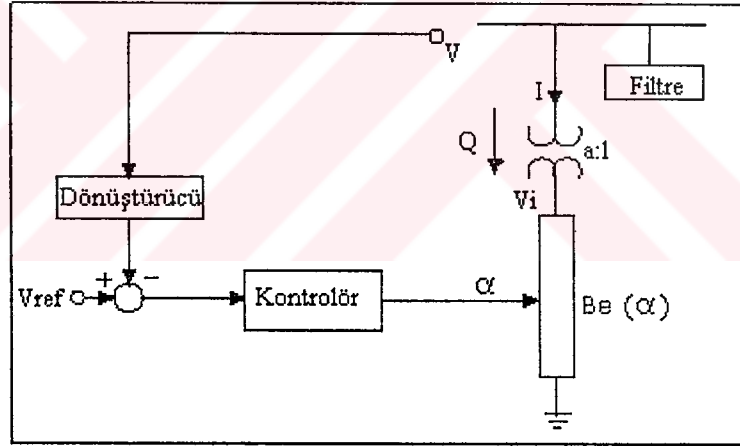
(3.3)

Burada rezonans tetikleme açısı X_L/X_C değerine bağlı olarak belirlenir. Bu oran ise yapılacak kontrolde endüktif ve kapasitif çalışma aralığının eşit olma veya olmama durumlarına göre belirlenir. Şekil 3.3’te gerilim kontrolü için SVC’nin kontrolör modeli verilmiştir.



Şekil 3.3. SVC kontrolör modeli

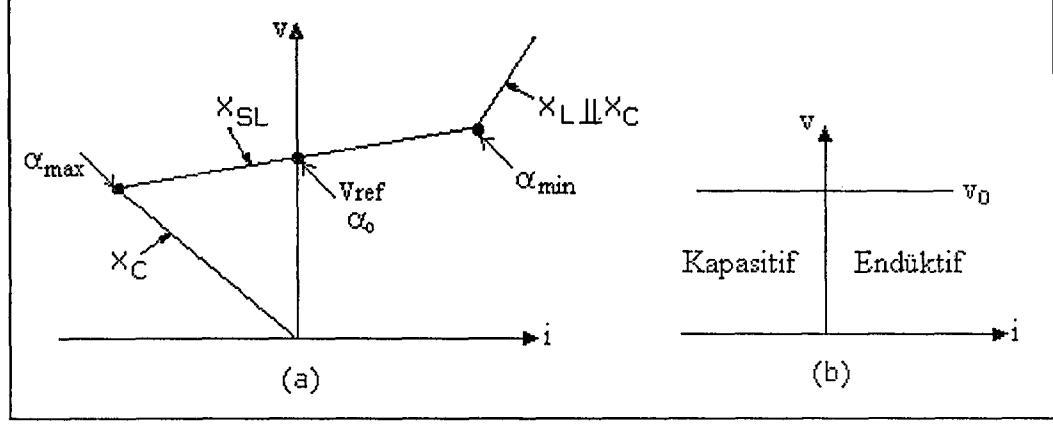
Burada V kontrol edilen bara gerilimi, V_{ref} referans gerilim ve T_1 , T_2 ise kontrolörlerin zaman sabitleridir. (Canizares, 2000), (Mithulanathan ve diğ., 1999) Bara gerilimi referans gerilim ile karşılaştırılarak hata işareti kontrolöre aktarılır. Hata sinyalinin büyüklüğüne göre yeni tetikleme açısı belirlenir. Tetikleme açısına göre SVC ile sisteme aktarılan veya sistemden çekilen reaktif güç değeri değiştirilerek sistem geriliminin kontrolü yapılır. Reaktif güç kompanzasyonu sistemin geçici kararlılığının artmasına neden olmaktadır. SVC için geçici kararlılık modeli Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4 SVC'nin geçici kararlılık modeli

Statik VAR kompanzator (SVC) reaktansı tristör tetikleme açısına bağlı olarak X_L ve X_C aralığında değişmektedir. Sürekli durum denklemleri, daha önce verilen geçici durum denklemlerine SVC için gerilim kontrolü denkleminin dahil edilmesi sonucu elde edilir. (Canizares ve diğ., 1999), (Faur ve diğ., 1996) SVC'ye ait gerilim kontrol denklemi sürekli durum V - I karakteristiğinden yararlanılarak elde edilir. Bu karakteristik SVC'nin endüktif ve kapasitif olarak çalışma aralıklarına göre belirlenir. Eşit çalışma aralığı için sürekli durum V - I karakteristiği Şekil 3.5’de verilmiştir. Kontrolör geriliminin sınırları tasarımcı tarafından belirlenir. Bu sınırlardan yararlanarak daha sonra verilecek olan SVC

güç denklemlerinden kapasitör değeri ve bundan yararlanılarak TCR endüktansının değeri belirlenir.



Şekil 3.5 SVC'nin sürekli durum uç karakteristiği (a), ideal karakteristik (b)

Şekil 3.5'deki X_{SL} tanımlanan kontrol aralığı için SVC eşdeğer reaktansdır. Bu durumda SVC için kontrol denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$V = V_{ref} \pm X_{SL} \cdot I \quad (3.4)$$

Daha önceden verilen Denklem 2'yi $g(\alpha, V, V_i, I, Q, B_e)$ ile ifade edersek SVC'ye ait sürekli durum denklemleri aşağıdaki şekilde yazılır.

$$V - V_{ref} \pm X_{SL} \cdot I = 0 \quad (3.5a)$$

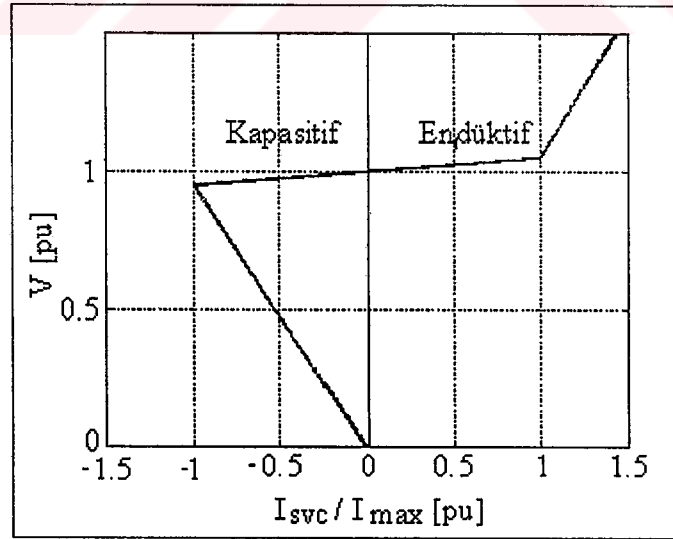
$$g(\alpha, V, V_i, I, Q, B_e) = 0 \quad (3.5b)$$

Elde edilen bu denklemler aynı zamanda SVC'li güç sistemlerinde SVC'nin güç akış denklemlerini oluşturmaktadır. Denklem 3.4 için SVC'nin kapasitif çalışmasında "+", endüktif çalışmasında "-" işareti alınır. Yapılan kontrolde tetikleme açısı belirlenen limitlere ulaşmaktadır. Bu durumda tetikleme açısı sabit tutularak referans gerilim değeri değiştirilir. Tetikleme açısının normal sınırlar aralığında değişmesi durumunda referans gerilim, başlangıç referans gerilimine eşittir. Tetikleme açısı minimum değerine ulaştığında referans gerilim değeri arttırılarak kontrole devam edilir. Tetikleme açısı maksimum değerine ulaştığında referans gerilim başlangıç değerinin altına çekilerek kontrole devam edilir. Her iki durum referans gerilimin başlangıç değerine eşitleninceye

kadar devam ettirilir. Gerilimin V_{\min} - V_{\max} aralığında kontrolü, reaktif gücün $Q_{\max C}$ ile $Q_{\max L}$ ve akımın $\pm I_{\max}$ aralığında değişmesine neden olur. Maksimum endüktif ve kapasitif güç SVC tasarımına bağlı olarak değişir. SVC'nin en önemli özelliği eşit çalışma aralığına sahip olmasıdır. Ayrıca sisteme paralel bağlandığından dolayı rezonans durumu sistem performansına çok büyük bir etki yapmamaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi yapılan kontrole göre rezonans açısı belirlenir. Genel olarak SVC için $X_C/X_L=10$ alınarak rezonans tetikleme açısı $\alpha=143^\circ$ olarak belirlenir. (Canizares,2000), (Canizares ve diğ., 1999), (Faur ve diğ., 1996), (Mithulanathan ve diğ., 1999)

3.3 Statik VAR Kompanzator (SVC) Limitlerinin Belirlenmesi

Gerilim-Akım karakteristiğinden SVC için kontrol ifadesi Denklem 3.4'de verilmiştir. Burada SVC kapasitif çalıştığında akımın işareti negatif, endüktif çalıştığında ise akımın işareti pozitifdir. Kapasitif çalışmada sistem gerilimi artmakta ve endüktif çalışmada ise sistem gerilimi azalmaktadır. Genel olarak X_{SL} eğimi (0,02-0,05) pu aralığında değişmektedir. Gerilim limitleri için SVC sabit reaktans olarak modellenir. SVC ile gerilim kontrolü yaklaşık olarak %10 oranında yapılmaktadır. SVC için akım-gerilim karakteristiği ölçekli olarak Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 SVC uç karakteristiği

Karakteristik endüktif ve kapasitif çalışma aralıklarının eşit olması durumuna göre çizilmiştir. Ayrıca maksimum endüktif ve kapasitif akımlar per unit olarak alınmıştır. SVC reaktif gücü;

$$Q_{SVC} = \frac{V^2}{X_V} - \frac{V^2}{X_C} \quad (3.6)$$

şeklinde yazılır. Burada X_V , TCR reaktansıdır. Reaktif güç çıkışı sıfır olduğunda, kapasitif ve endüktif akımlar birbirine eşit olur. Bu durumda paralel rezonans oluşarak SVC paralel kolları arasında endüktif ve kapasitif reaktif güç aktarımı oluşmaktadır. Tetikleme açısındaki azalma endüktif akımın kapasitif akımdan daha büyük olmasına neden olmakta ve bu durumda reaktif güç çıkışı endüktif olmaktadır. Her ne kadar reaktans değeri kontrol edilip, kontrol limitleri tetikleme açısı ile belirlense de SVC reaktif güç limitlerine maksimum ve minimum gerilimlerde ulaşmaktadır. Eğer tetikleme açısı limiti minimum kontrol geriliminden daha büyük bir değerde tutulursa SVC'den aktarılan reaktif güç maksimum kapasitif güç limitinden daha büyük değerde olur. $Q_{maxC}=Q_{maxL}$ olacak şekilde eşit aralıklı kontrol için SVC kontrol limitleri gerilim kontrol limitlerine göre belirlenir.

$$Q_{maxC} = \frac{V_{min}^2}{X_C} \quad (3.7)$$

$$Q_{maxL} = \frac{V_{max}^2}{X_L} - \frac{V_{max}^2}{X_C} \quad (3.8)$$

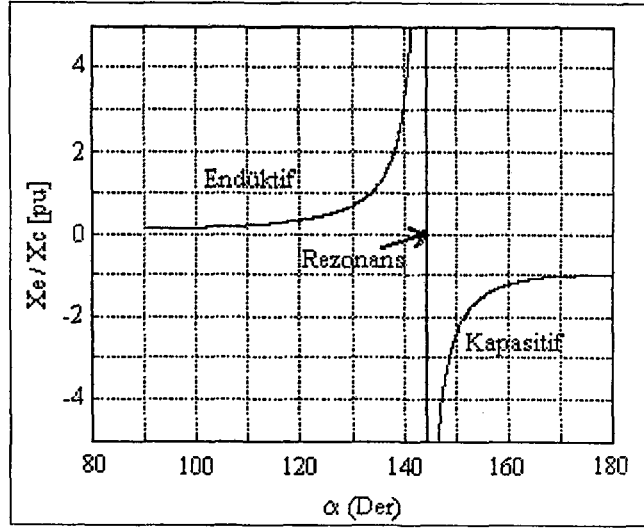
Verilen eşitliklerden yararlanarak $\pm 5\%$ 'lik gerilim kontrol aralığı için

$$X_L = 0.55 X_C \quad (3.9)$$

olarak elde edilir. Buna alternatif olarak eğer çekilen endüktif ve kapasitif akımların eşit olma durumuna göre aynı gerilim sınırlarında kontrol yapılacaksa ;

$$X_L = 0.53 X_C \quad (3.10)$$

değeri elde edilir. Bir diğer durum ise endüktif ve kapasitif çalışma aralıklarının birbirinden farklı olması durumudur. $X_L = 0.1 X_C$ için SVC eşdeğer reaktansının kapasitör reaktansına oranının tetikleme açısına göre değişimi Şekil 3.7'de verilmiştir. (Canizares ve diğ., 1999), (Rossi ve diğ., 2000)

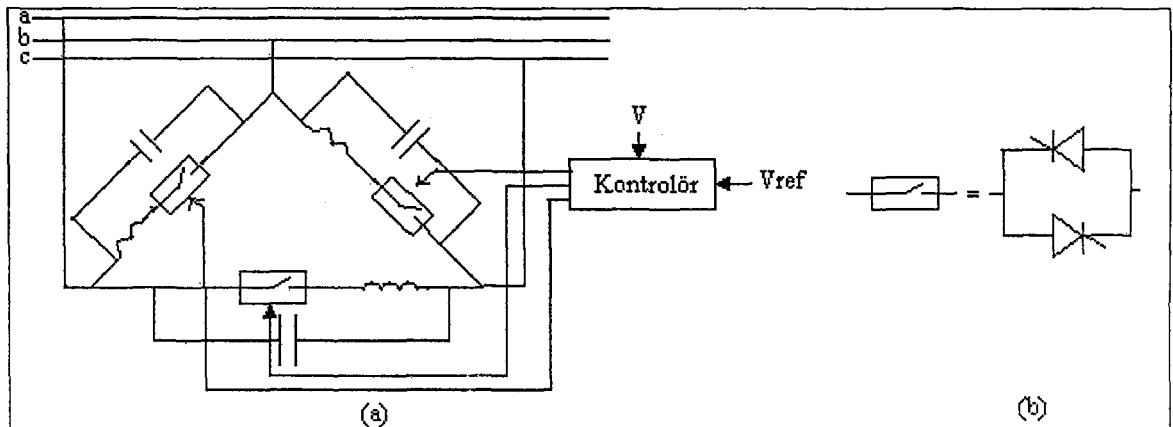


Şekil 3.7 SVC'nin eşdeğer reaktans karakteristiği

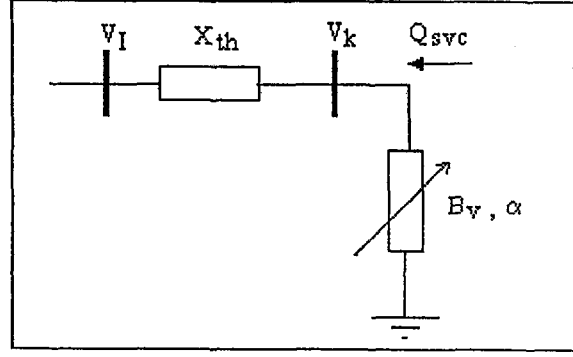
Bu duruma karşılık gelen rezonans tetikleme açısı $\alpha = 143^\circ$ dir. Bu açı X_C/X_L oranına bağlı olarak değişir. Bu oran azaldıkça rezonans açısı azalmakta, artması durumunda rezonans açısı artmaktadır. Fakat bu durumlarda kontrol aralıkları birbirine eşit olmamaktadır. Statik Var Kompanzator sürekli durumda hem endüktif hem de kapasitif olarak çalıştığından endüktif ve kapasitif çalışma aralıkları eşit alınır.

3.4 SVC'nin Güç Sistemine Uygulanması

Daha önce SVC için sürekli durum modeli ve denklemleri verilmiştir. SVC sisteme paralel olarak bir transformatör ile bağlanarak sistemde gerilim kontrolü yapılır. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da SVC'nin açık devre şeması ile SVC modelinin güç sistemine bağlantı şeması verilmiştir.



Şekil 3.8 SVC'nin güç sistemine bağlantı şeması



Şekil 3.9 SVC modelinin güç sistemine bağlantı şeması

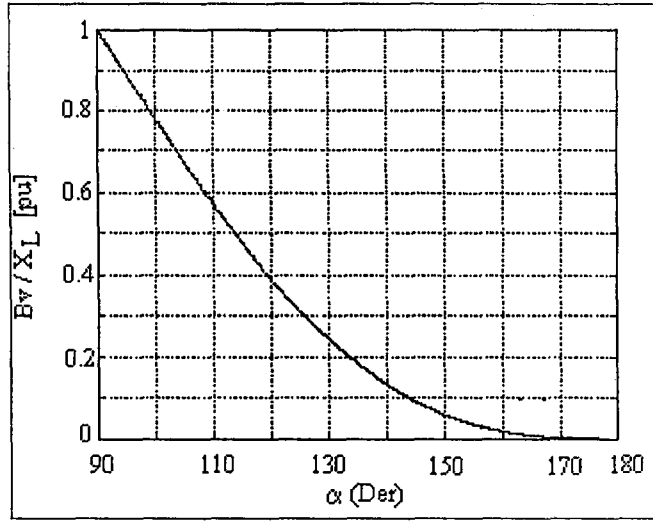
Verilen Şekil 3.9'da k. baraya bağlı olan bir SVC için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$V_I - X_{SL} \left(V_K B_V - \frac{V_K}{X_C} \right) - V_{REF} = 0 \quad (3.11a)$$

$$-\frac{V_K^2}{X_C} + V_K^2 B_V + Q_{SVC} = 0 \quad (3.11b)$$

$$\pi X_L B_V + 2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha = 0 \quad (3.11c)$$

Burada $B_V = 1/X_V$ dir. Verilen denklem sisteminde SVC'ye ait durum değişkenleri matrisi $r_{SVC} = [Q_{SVC} \ B_V \ \alpha]^T$ olarak tayin edilir. Güç akış denklemlerinin çözümünde kontrolör durum değişkenlerinin uygun başlangıç değerlerinin belirlenmesi, sistem performansı açısından son derece önemlidir. $X_V = X_C$ için $Q_{SVC} = 0$ rezonans durumu, reaktif güç için uygun bir başlangıç noktasıdır. Başlangıç tetikleme açısı olarak $\alpha = 92^\circ$ alınır. Bu durumda başlangıç TCR admitansı $B_V = 1/X_L$ olarak alınır. Durum değişkenleri için belirlenen bu başlangıç noktalarının yapılan test sistemlerinde oldukça başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bu durumda $r_{SVC} = [Q_{SVC}^0 \ B_V^0 \ \alpha^0]^T = [0 \ 1/X_L \ 92^\circ]^T$ olur. Burada B_V tristör kontrollü reaktörün suseptansı olup, X_V tetikleme açısı değiştirilerek X_L ile sonsuz arasında değişmesi durumunda $1/X_L$ ile 0 aralığında değişmektedir. (Canizares ve diğ., 1999), (Zeno diğ., 1996) TCR suseptansının X_L 'ye oranının tristör tetikleme açısına göre per-unit olarak değişimi Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.10 TCR eşdeğer suseptansının tetikleme açısına (α 'ya) göre değişimi

Şekilden görüleceği üzere tetikleme açısı arttıkça TCR reaktansı artmakta dolayısıyla admitansı ve suseptansı azalmaktadır. Tetikleme açısı 180° olduğunda reaktans değeri sonsuz ve TCR'den akan akım sıfır olmaktadır.

3.5 Statik Var Kompanzator (SVC) Tasarımı

Gerilim kontrolünün $\pm\%5$ oranında yapılması bara geriliminin minimum 0.95 pu değerinde tutulması anlamına gelir. Dolayısıyla SVC ile gerilimi kontrol edilen baralar güç sisteminde PV (sabit güç ve gerilimli) bara olarak alınabilir. Çünkü güç sisteminde bu baraya bir reaktif güç kaynağının bağlanması ile aynı işlev gerçekleştirilmektedir.

SVC tasarımında öncelikle kapasitör değeri belirlenir. Sistemde SVC yok iken gerilimin belirlenen minimum değerinde tutulması için gerekli olan reaktif (kapasitif) güç, güç akışından hesaplanır. Gerekli olan bu güç SVC'nin maksimum kapasitif gücüdür. Denklem 3.7'den kapasitör değeri per unit olarak belirlenir.

$$X_{C[pu]} = \frac{0.95^2}{Q_{\max C[pu]}} \quad (3.12)$$

Eğer endüktif güç değeri kapasitif güce eşit olacak şekilde eşit aralıklı bir kontrol yapılacaksa $Q_{\max L} = Q_{\max C}$ ve $V_{\max} = 1.05$ pu değerleri kullanılarak Denklem 3.8'den

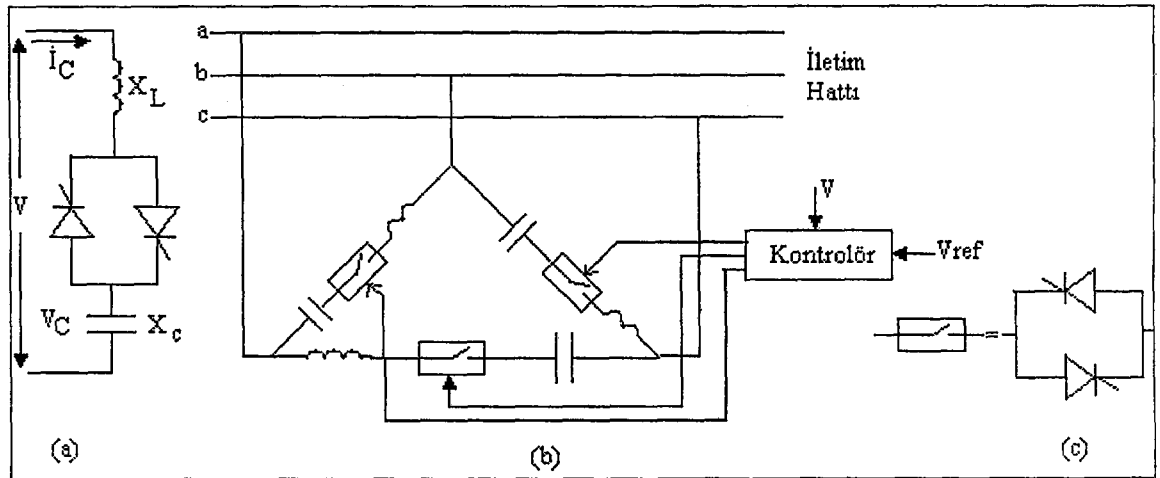
$X_L = 0.55X_C$ olarak bulunur. Eğer çekilen endüktif ve kapasitif maksimum akım eşitliğine göre gerilim kontrolü yapılacaksa $X_L = 0.51X_C$ eşitliğinden TCR indüktörünün reaktans değeri belirlenir. Kapasitör değeri belirlendikten sonra SVC'nin endüktif ve kapasitif çalışma aralığına göre belirlenen X_C/X_L oranına bağlı olarak TCR endüktansının reaktansı belirlenir. (Canizares ve diğ., 1999), (Hingorani ve diğ., 1993)

3.6 Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC)

Tristör anahtarlama kapasitör, SVC çeşitlerinden biri olup güç sistemlerinde gerilim ve reaktif güç kontrolü için kullanılmaktadır. Yapı itibariyle TVR'ye seri bağlı kapasitörden oluşur. Endüktans akımı, güç sistemi ile TSC arasında oluşacak rezonans etkisinin azaltılması için yapılmaktadır. Üç fazlı sistemlerde TSC üçgen bağlanır. Tristör tetikleme açılarının kontrolü anahtarlama geçişleri minimum olacak şekilde yapılır. Tristör gerilimlerinin minimum veya sıfır değerlerinde tetikleme yapılır. TSC sürekli ve hızlı reaktif güç ve gerilim kontrolüne imkan sağlamaktadır. Kullanım amaçlarını aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür.

- Geçici aşırı gerilimlerin kontrol edilmesi
- Gerilim düşümünün kontrol edilmesi
- Geçici kararlılığın artırılması
- Sistem osilasyonlarının söndürülmesi

TSC'e ait tek faz ve üç faz devre şemaları Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11 TSC tek faz devre şeması (a), üç faz devre şeması (b), anahtarlama devresi (c)

Güç kayıplarını azaltmak için TCR ile TSC birlikte kullanılır. Bu durumda reaktif güç kapasitesi artar. Buna paralel olarak kontrol sistemi daha karmaşık bir yapıya sahip olur.

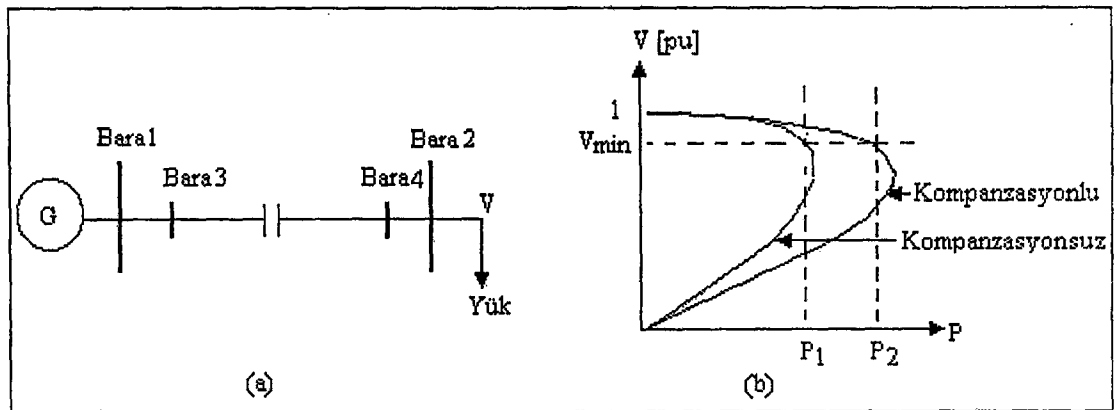


BÖLÜM 4

TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KAPASİTÖR (TCSC)

4.1 Seri Kompanzasyon

Seri kapasitörler uzun süredir yüksek gerilimli iletim sistemlerinde sistem kararlılığını ve güç kapasitesini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Seri kompanzasyon prensip olarak hattın endüktif reaktansını azaltarak gerilim düşümünü kompanze etmek ve çekilen reaktif gücü azaltmak için kullanılmaktadır. Seri kompanzasyonla sisteme aktarılan kapasitif güç kaynaktan çekilen reaktif gücün azalmasına yol açmaktadır. Kapasitif güç hattın akan akımın karesi ile orantılı olduğundan sistemin yükü arttıkça aktarılan kapasitif güçde artmaktadır. Küçük yüklerde hattaki gerilim düşümü ve seri kapasitör gerilimi düşük değerdedir. Yük arttıkça çekilen akım arttığından gerilim düşümü artar. Seri kompanzasyon ile hattın endüktifliği bastırılarak gerilim düşümü azaltılır ve hattın güç transfer kapasitesi artırılır. (Canizares ve diğ., 1999), (Gyugyi ve diğ., 1993) Enerji iletim hatlarının seri empedansı endüktiftir. Bu empedans değerinin %5-%10'u rezistif etkinin sonucudur. Şekil 4.1'de basit olarak bir seri kompanzasyon şeması ve gerilim kararlılığı ile güç transferine olan etkisi grafiksel olarak verilmiştir.

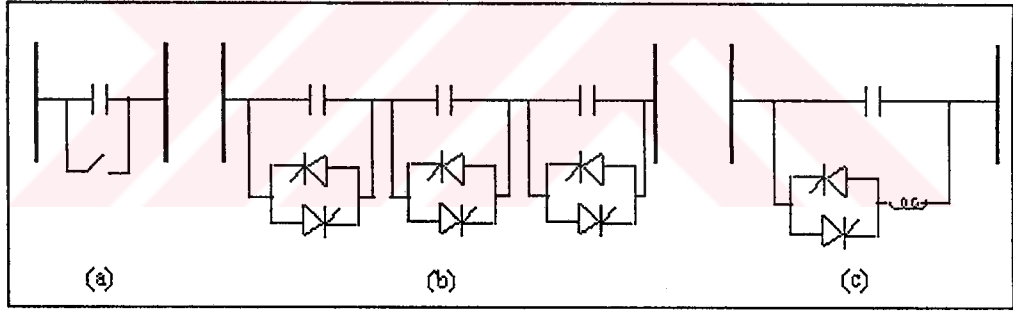


Şekil 4.1 Basit bir güç sisteminde seri kompanzasyon devre şeması (a), çıkış geriliminin aktarılan aktif güce göre değişimi (b)

Grafikten görüldüğü gibi seri kompanzasyon ile aktarılan aktif güç ve gerilim kararlılığı artmaktadır. Yapı itibariyle seri kompanzasyonlar üç ana grupta incelenir:

- Tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC)
- Tristör anahtarlama seri kapasitör (TSSC)
- Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC)

Tristör kontrollü seri kapasitörler, tristör kontrollü reaktör ve buna paralel kapasitör gruplarından oluşmaktadır. (Yong ve diğ., 1999) TCSC temel frekansta geniş kontrol aralığına sahip kapasitör ile hatta seri bağlanarak hattın empedans kontrolüne imkan sağlamaktadır. TCSC'nin en önemli özellikleri endüktif olarak çalıştırılabilmesi ve geçici kararlılığın artırılması olarak belirtilebilir. Tristör anahtarlama seri kapasitör ise birbirine paralel zıt yönlü tristörler ile devreye alınan veya devreden çıkartılan kapasitör gruplarından oluşmaktadır. Seri kompanzasyon için farklı devre şemaları Şekil 4.2'de verilmiştir.

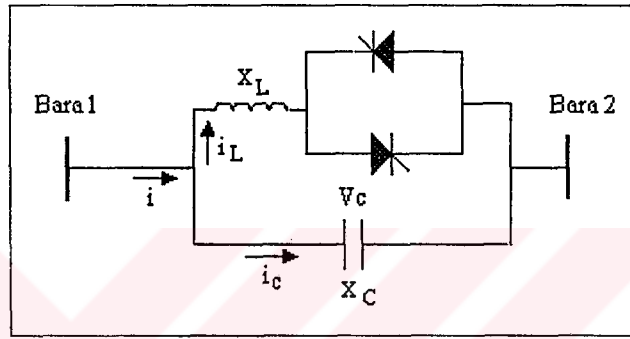


Şekil 4.2 Sabit kapasitör (a), Tristör anahtarlama seri kapasitör (b) ve Tristör kontrollü seri kapasitör (c) devre şemaları

4.2 TCSC Sürekli Durum Analizi

Seri kompanzasyon sistem kararlılığı ve güç transfer kapasitesini arttırmak amacıyla gerçekleştirilen bir kompanzasyon çeşitidir. İletim hattından aktarılan güç hat empedansı ile doğrudan orantılı olduğundan hat empedansının kompanze edilmesi sonucunda transfer limitleri artmaktadır. Örnek olarak diğer parametrelerin sabit olması durumunda %50'lik seri kompanzasyon ile sürekli durum güç transfer kapasitesi yaklaşık olarak iki katına çıkar. Ayrıca %75'lik seri kompanzasyon ile transfer kapasitesinin dört katına çıkartılması mümkündür. Seri kompanzasyon ile güç kapasitesinin büyük değere çıkartılmasına rağmen

pratikte maksimum %70'lik kompanzasyon yapılmaktadır. (Canizares ve diğ., 1999) Bunun nedeni ise gerilim ve faz açısındaki küçük değişimler aktarılan güçte kontrol edilemeyecek büyüklükte değişimlere neden olmasıdır. TCSC yapı olarak SVC ile aynı olup güç sistemine seri olarak bağlanmaktadır. Diğer bir fark ise TCSC sisteme transformatör kullanılmadan doğrudan bağlanmasıdır. Güç sistemlerinde TCSC endüktif olarak yalnızca geçici durum analizinde güç osilasyonlarının söndürülmesi için çalıştırılır. Bu nedenle TCSC'nin endüktif çalışma aralığı kapasitif çalışma aralığından çok küçük olarak seçilir. Basit olarak tek faz için TCSC devre şeması Şekil 4.3'de verilmiştir.

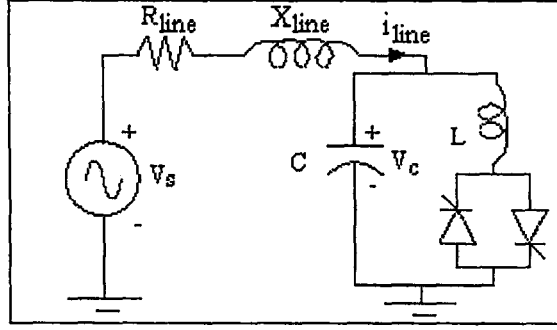


Şekil 4.3 Basit TCSC devre şeması

Tristör kontrollü seri kapasitör eşdeğer empedansı, değişken TCR empedansı ve buna paralel sabit kapasitör reaktansının eşdeğerinden elde edilir. Bu durumda eşdeğer reaktans değeri TCR reaktansından yararlanarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$X_c = \frac{X_c X_L}{X_c [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] / \pi - X_L} \quad (4.1)$$

$X_c = X_v$ durumunda oluşan rezonansa karşılık gelen rezonans tetikleme açısı $r_x = X_c / X_L$ oranına bağlı olarak değişmektedir. (Canizares ve diğ., 1999) TCSC'ye ait basitleştirilmiş dinamik model Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4 İletim hattı ve TCSC modeli

Eşdeğer V_s gerilim kaynağı R_{line} ve X_{line} parametreleri ile modellenen iletim hattı ve kompanzator için gerekli olan gücü sağlamaktadır. Burada tristör lineer olmayan R_n direnci ile modellenmektedir. Kontrol, kapasitör geriliminin sıfır geçiş noktaları ile senkronize edilmektedir. Kirchhoff'un akım ve gerilim kanunları kullanılması ve kapasitör gerilimi ile endüktans akımının durum değişkenleri olarak seçilmesi sonucunda sistemin durum-uzay modeli oluşturulur. Sisteme ait sürekli durum denklemleri aşağıdaki şekilde yazılır.

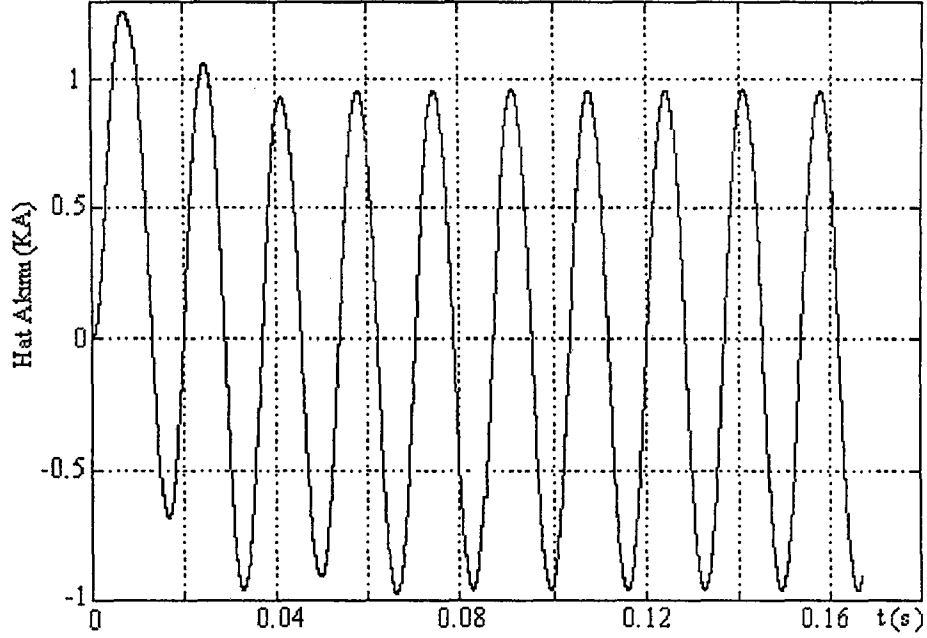
$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \dot{I}_{line} - \frac{1}{C} \dot{I}_L \quad (4.2a)$$

$$\frac{di_{line}}{dt} = \frac{1}{L_{line}} V_m \sin \omega t - \frac{1}{L_{line}} V_c - \frac{R_{line}}{L_{line}} \dot{I}_{line} \quad (4.2b)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} V_c - \frac{R_n}{L} i_L \quad (4.2c)$$

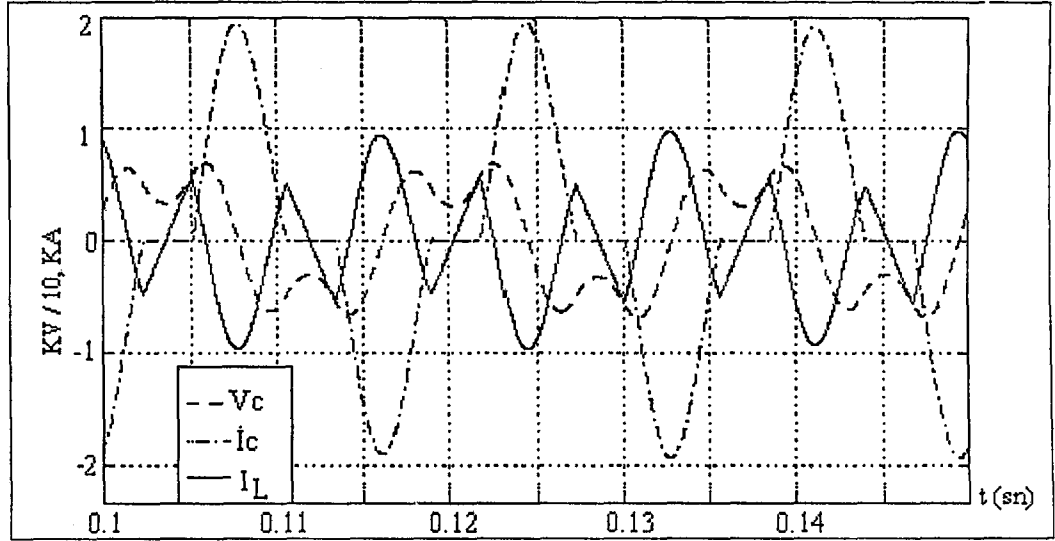
$$i_C = i_{line} - i_L \quad (4.2d)$$

Şekil 4.4'de verilen devre için $V_m=64.5$ kV, $C=176$ μ F, $L=6.8$ mH, $R_{line}=15.3$ ohm ve $X_{line}=58$ ohm olarak alınması durumunda Matlab simülasyon analizi ile akım ve gerilim değişimleri elde edilmiştir.

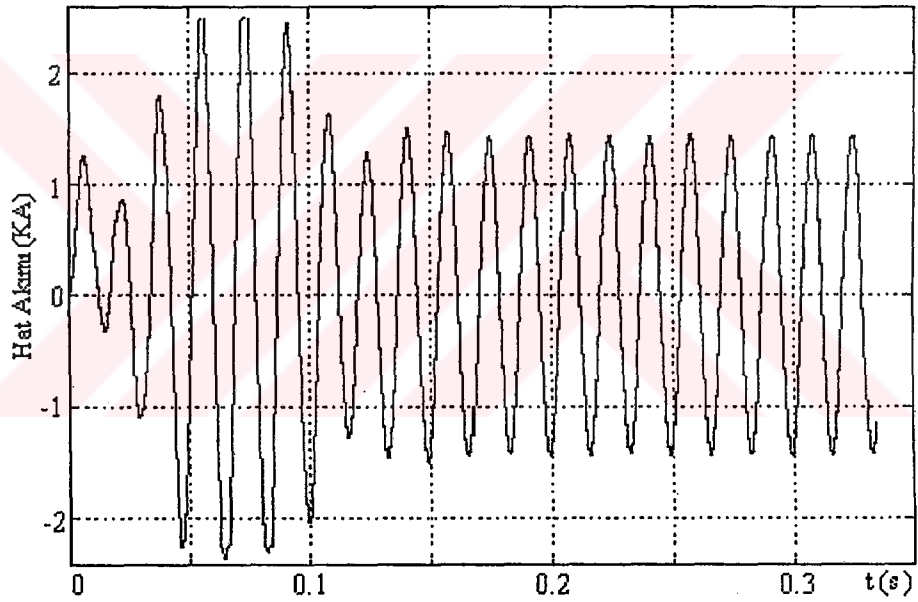


Şekil 4.5 $\alpha=120^\circ$ için hat akımının zamana göre değişimi

Verilen tetikleme açısı için TCSC endüktif olarak çalışmaktadır. Bu nedenle geçici durum yalnızca 3 saykıldan oluşmaktadır. Tetikleme açısı azaldıkça geçici durum kararlılığı artmakta ve saykıl sayısı azalmaktadır. Küçük tetikleme açılarında seri kapasitör gerilimi ve akımı yüksek harmonikler içermektedir. Tetikleme açısı arttıkça TCR akımı yüksek harmonik bileşenler içermekte, seri kapasitör akımı ve gerilimi yaklaşık sinüs şeklinde olmaktadır. (Canizares ve diğ., 1999), (Faur ve diğ., 1996) Fakat sistemin geçici durum kararlılığı kötüleşmektedir. Ayrıca kapasitif modda çalışırken yüksek tetikleme açısı değerlerinde seri kapasitör akımı hat akımından oldukça büyük değerde olmaktadır. Buradan TCSC kapasitif modda çalışırken harmonik akımlar TCSC içinde dolaştığından hat akımının sinüzoidal olarak değişmesi sonucunun çıkartılması mümkündür. Tetikleme açısı $\alpha= 120^\circ$ değeri için TCSC elemanlarının akım ve geriliminin değişimi Şekil 4.6'da, $\alpha= 160^\circ$ için hat akımının zamana göre değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir.

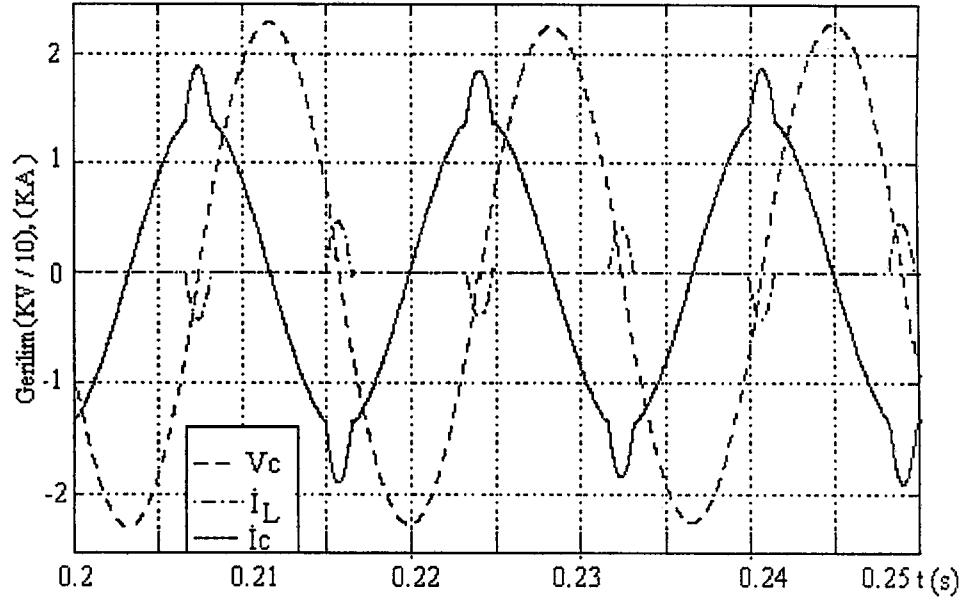


Şekil 4.6 $\alpha=120^\circ$ için TCSC elemanlarının akım ve gerilimlerinin zamana göre değişimi



Şekil 4.7 $\alpha=160^\circ$ için hat akımının zamana göre değişimi

Şekil 4.7'den görüldüğü gibi TCR tristörlerinin tetikleme açısı arttıkça kompanzator kapasitif olarak çalışmakta ve güç sisteminin geçici durumu bozulmaktadır. Verilen değerler için kontrolör rezonans açısı $\alpha=136^\circ$ dir. Rezonans açısından büyük tetikleme açılarında kompanzator kapasitif, küçük açılarda ise endüktif olarak çalışmaktadır. TCSC güç sistemine seri olarak bağlandığından dolayı rezonans durumunun sistem güvenliği açısından büyük önemi vardır. Tetikleme açısı $\alpha=160^\circ$ için kompanzator elemanlarının akım ve gerilimlerinin zamana göre değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 $\alpha=160^\circ$ için TCSC elemanlarının akım ve gerilim grafikleri

TCSC kapasitör gurupları 10-30 Ω /Faz ve sürekli akım kapasitesi 1500-3000 Amper değerindedir. Kullanılan tristörler 100 kV'lik gerilim kapasitesine sahip tristörlerdir. İndüktör birkaç mH'lik endüktanstan oluşmaktadır. Kapasitör gurupları arasında aşırı gerilim oluşmasını önlemek için metal-oksit varistör kullanılmaktadır. TCSC temel devresinin karakteristiği kapasitör blokları ve tristörlü devre bileşeninin reaktansına bağlı olarak değişmektedir. Bu kollara ait reaktanslar;

$$X_c = -\frac{1}{\omega_n C} \quad (4.3)$$

$$X_v = X_L \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\pi} \quad (4.4)$$

ifadeleri ile belirlenir. Burada $\omega_n=2\pi f_n$ sistemin radyan olarak nominal frekansdır. Sistemin rezonans frekansı tristörlü koldaki endüktans ve seri kapasitör guruplarının kapasitesi ile belirlenir.

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_n \sqrt{\frac{-X_c}{X_v}} \quad (4.5)$$

Sistemin temel frekansı ile rezonans frekansı arasındaki oran λ ile gösterilir. Bu oran için en uygun değerler sistemin güvenilirliği açısından 2 ile 4 arası değerlerdir. Bu durumda

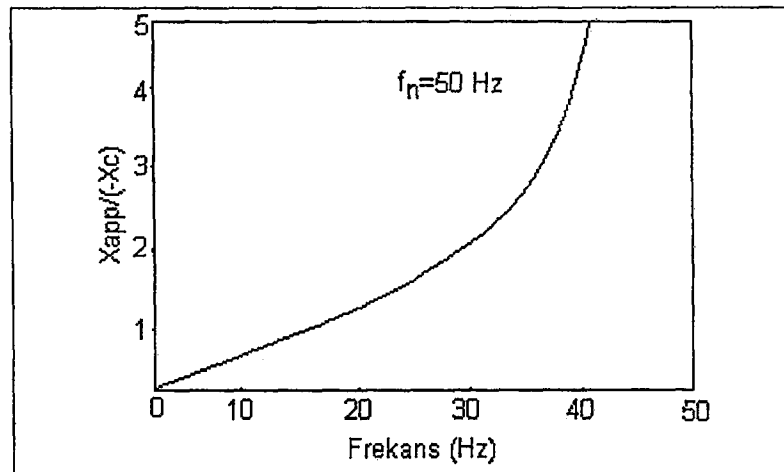
indüktör reaktansı kapasitör grubu reaktansından oldukça küçük değerde seçilir. TCSC farklı değerli görünür reaktanslarda çalıştırılabilir. Bu reaktans kapasitör fazör geriliminin hat akımına oranının imajiner bileşeni olarak tanımlanır.

$$X_{app} = \text{Im}\left\{\frac{V_c}{I_L}\right\} \quad (4.6)$$

TCSC için pratik olarak kapasitör reaktansı ve kontrolörün görünür toplam reaktansı arasında yükseltme faktörü (K_B) tanımlanmaktadır.

$$K_B = \frac{X_{app}}{X_C} \quad (4.7)$$

Bu oran kompanzatorün endüktif veya kapasitif olarak çalışmasına göre pozitif ve negatif değerde olmaktadır. TCSC temel devresi maksimum yükseltme faktörü ve kapasitör gerilimine göre tanımlanmaktadır. (Song ve diğ., 1999) Hat akımı arttıkça yükseltme faktörü azalmaktadır. Maksimum yükseltme faktörü uygun değerdeki minimum hat akımına göre tanımlanmaktadır. Bu katsayının birden küçük olması yapılan kontrol açısından uygun değildir. TCSC seri sabit kapasitör reaktansı frekans ile ters orantılı olarak değişir. Değişken frekansta kompanzator davranışı kontrol sistemi cevabına bağlı olarak değişir. Genel olarak özel bir sistemde özel bir kompanzator için görünür empedansının simülasyon veya ölçümler ile belirlenmesi gerekir. TCSC görünür reaktansının kapasitör reaktansı cinsinden frekansa göre değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9 TCSC reaktansının frekansa göre değişimi

Seri kapasitör reaktansı frekansla azaldığından dolayı frekans arttıkça kompanzator reaktansı artar. TCSC'ün dezavantajı seri kapasitör eklenmesinden dolayı hat empedansı ile arasında rezonans durumunun oluşmasıdır. Rezonans durumu generatör milinin kritik bir şekilde dalgalanmasına neden olmaktadır. Bu mekanik osilasyonlar ise mekanik arızalara neden olmakta ve generatörün senkronizasyondan çıkmasına neden olmaktadır. Bu arızaları ortadan kaldırmak için alt senkronizasyon rezonans söndürücüler kullanılır. Kompanzator için harmonik analiz sürekli durum için yapılır. 30 ve daha büyük harmonik bileşenler filtre kullanılarak önlenir. Toplam harmonik bozulma hat akımı ve TCSC gerilimi için aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Harmonik bileşenlere sahip sinyal için toplam harmonik bozulma;

$$THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{30} V_n^2} \quad (4.8)$$

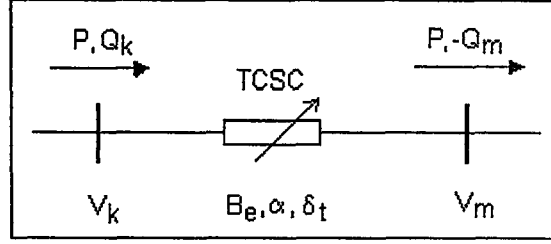
ifadesi ile hesaplanır. Şekil 4.4'de verilen devre için gerilim ve akımdaki toplam harmonik bozulmaların tetikleme açısına göre değişimi aşağıda Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Tetikleme açısının değişimine göre TCSC akım ve gerilimindeki harmonikler

α [der]	%THD (I_{line})	%THD(V_{TCSC})	X_e
100	2.3	29.9	İndüktif
120	2.7	48.7	İndüktif
130	3.9	43.7	İndüktif
140	16.2	27.9	Kapasitif
143	8.6	21.1	Kapasitif
150	2.5	11.3	Kapasitif
160	1.2	3.1	Kapasitif
170	1.7	1.8	Kapasitif
175	1.6	1.6	Kapasitif

Tablodan görüleceği üzere TCSC endüktif olarak çalıştırıldığında reaktans arttıkça akım ve gerilimdeki toplam harmonik bozulma artmaktadır. Kapasitif çalışma durumunda ise kapasitif reaktans azaldıkça akım ve gerilimdeki toplam harmonik bozulma azalmaktadır.

Tristör kontrollü bir seri kapasitörün güç sistemine bağlantı şeması Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. TCSC'nin güç sistemine bağlantı şeması

Verilen sistemde TCSC'nin reaktans/admitans kontrolü ile hat gerilimi, akımını, faz açısı veya hattan çekilen aktif ve reaktif güç kontrol edilir. Verilen parametreler birbirine bağlı olduğundan herhangi bir parametrenin kontrolü diğerlerini etkilemektedir. Sisteme uygun olarak TCSC sürekli durum denklemleri yazılabilir.

$$P + V_k V_m B_e \sin(\delta_k - \delta_m) = 0 \quad (4.9a)$$

$$-V_k^2 B_e + V_k V_m B_e \cos(\delta_k - \delta_m) - Q_k = 0 \quad (4.9b)$$

$$-V_m^2 B_e + V_k V_m B_e \cos(\delta_k - \delta_m) - Q_m = 0 \quad (4.9c)$$

$$B_e - B_e(\alpha) = 0 \quad (4.9d)$$

$$\sqrt{P^2 + Q_k^2} - I V_k = 0 \quad (4.9e)$$

Burada V_k ve V_m bağlı bulunan bara gerilimleri, δ_k ve δ_m sırasıyla verilen faz gerilimi açıları, B_e eşdeğer admitans, I ise kontrol edilen akımdır. Tetikleme açısı değiştirilerek I akımını doğrudan kontrol edilmektedir. Eğer verilen sürekli durum denklemlerini $g(\alpha, V_k, V_m, \delta_k, \delta_m, I, P, Q_k, Q_m, B_e)$ şeklinde ifade edersek hat empedans kontrolü için sürekli durum güç akış denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$B_e - B_{eref} = 0 \quad (4.10a)$$

$$g(\alpha, V_k, V_m, \delta_k, \delta_m, I, P, Q_k, Q_m, B_e) = 0 \quad (4.10b)$$

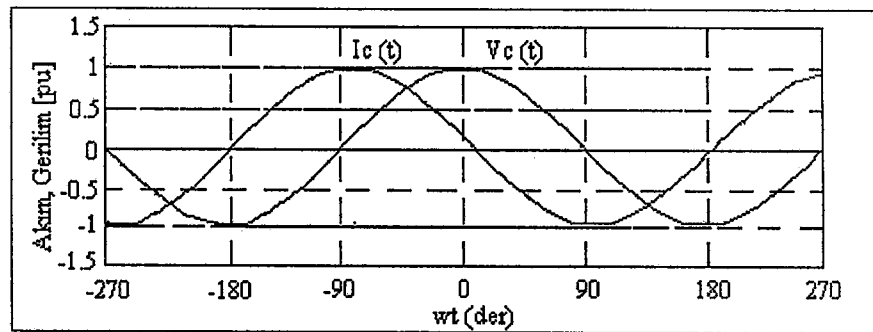
Nümerik işlemlerin kolaylığı açısından sürekli durum denklemleri, SVC’de olduğu gibi admitans formunda verilmektedir. B_e durum değişkenininin başlangıç değeri, tetikleme açısının rezonans açısına yakın bir değeri olarak alınır. Eğer rezonans açısı $151,5^\circ$ ise kapasitif çalışmada başlangıç açısı $\alpha_o=155^\circ$ ve endüktif durumu için $\alpha_o=148^\circ$ değerleri kontrolör için uygun değerlerdir. (Canizares ve diğ., 1999), (Faur ve diğ., 1996), (Rossi ve diğ., 2000)

4.2.1 TCSC çalışma modları

Tristör kontrollü seri kapasitör tristör guruplarının tetikleme açısına göre farklı modlarda çalışmaktadır. Bunlar genel olarak endüktif ve kapasitif modlardır. TCSC hat empedansının kompanzasyonu için kullanıldığından sürekli durumda genellikle kapasitif olarak çalıştırılmaktadır. Eğer tristör gurupları tetiklenmeyip sürekli kesimde tutulursa hat akımı seri kapasitör akımına eşit olur ve bu durum “tıkama (blocking) mod” olarak adlandırılır. Kapasitör gerilimi hat akımı cinsinden ifade edilir.

$$V_C = jX_C \dot{I}_L \quad (X_C < 0) \quad (4.11)$$

Bu çalışma modunda TCSC sabit seri kapasitör olarak çalışmakta ve yükseltme faktörü $K_B=1$ olmaktadır. Bu durum için hat akımı ve kapasitör geriliminin zamana göre değişimi Şekil 4.11’de verilmiştir.

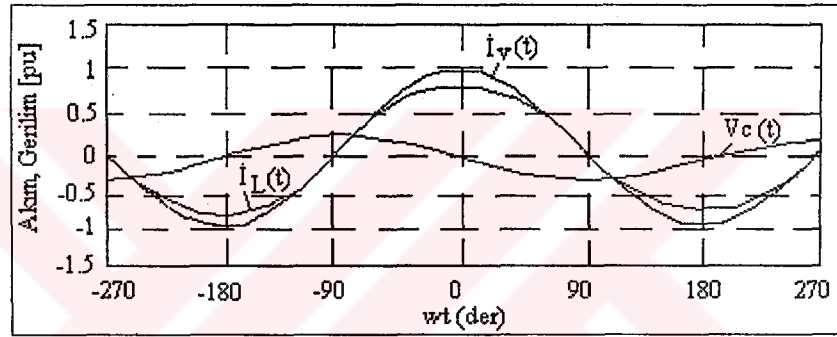


Şekil 4.11 Tıkama modu için seri kapasitör gerilimi ve akımı

Eğer tristörler sürekli olarak iletimde ise bu durumda TCSC indüktör ve kapasitörün paralel eşdeğerinden oluşur. Bu durum ise “bypass mod” olarak adlandırılır. Kompanzatör için sürekli durum gerilim ifadesi bu durum için aşağıdaki şekilde ifade edilir.

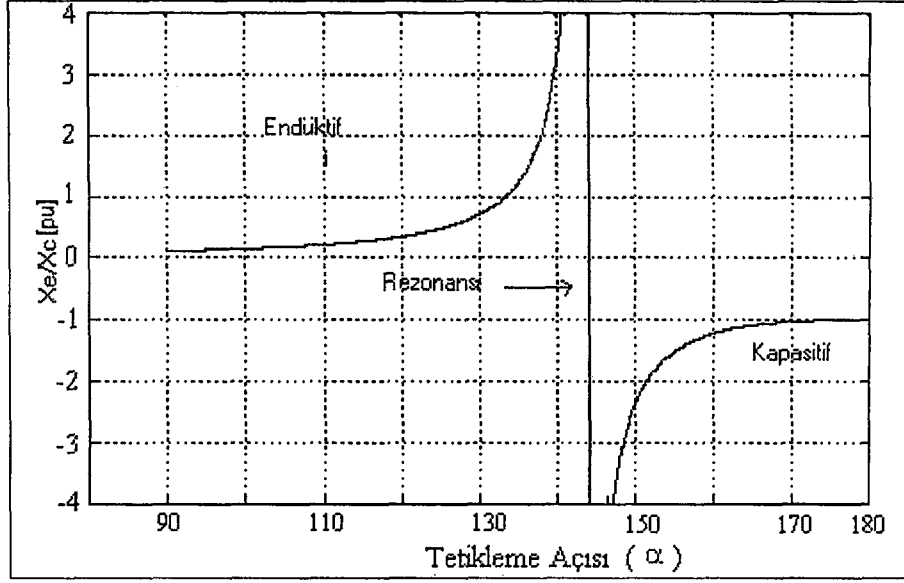
$$V_C = jK_B X_C \dot{I}_L \quad (4.12)$$

Burada \dot{I}_L , hat akımını göstermektedir. Bu mod için yükseltme faktörü negatif olur. Tristörlerin sürekli iletimde olması durumunda hat akımı ile tristör kontrollü reaktör akımı aynı fazda ve birbirine çok yakın değerde olmaktadır. (Song ve diğ., 1999) Çünkü kompanzator tasarımı daha sonra gösterileceği üzere indüktör reaktansı kapasitör reaktansından oldukça küçük olduğundan paralel eşdeğer endüktif olur. Kapasitör grupları akımın tepe değerlerinde deşarj olduğundan dolayı TCR akımı hat akımından büyük değerde olur. Bu çalışma modu için λ frekans oranı tıkama moduna oranla oldukça büyük değerdedir. Kapasitör gerilimi tıkama moduna göre oldukça küçük olduğundan dolayı baypas modu arıza durumlarında kapasitör etkisini azaltmak için kullanılmaktadır. Bu çalışma modu için gerilim ve akımların değişimi Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12 Bypass mod için akım ve gerilimin değişimi

Burada \dot{I}_L hat akımını, \dot{I}_V TCR akımını ve V_C ise kapasitör aynı zamanda TCSC gerilimini göstermektedir. TCSC’yi oluşturan tristör tetiklemeli reaktör güç sisteminin akım ve gerilimlerinde harmonikler oluşturmaktadır. Bu nedenle TCR’nin harmonik akım kaynağı olarak modellenmesi mümkündür. Devredeki seri kapasitör harmonik akımlar için düşük empedanslı olduğundan dolayı harmonik akım bileşenlerinin çok küçük bir kısmı iletim hattına aktarılmaktadır. TCSC empedansının kontrolü tristörlerin tetikleme açısını değiştirerek yükseltme faktörünün kontrolü ile yapılır. TCSC empedansının tristörlerin tetikleme açılarına göre değişimi Şekil 4.13’te verilmiştir.



Şekil 4.13 TCSC empedans karakteristiği

Şekil 4.13'te verilen empedans karakteristiğinde rezonans açısı $\alpha=143^\circ$ dir. Rezonans açısı X_C/X_L oranına bağlı olup bu oran arttıkça artmaktadır. Şekildeki karakteristik $X_C/X_L=10$ değeri için verilmiştir. Rezonans durumunda harmonikler oldukça büyük değerlerdedir. (Canizares, 2000), (Rossi ve diğ., 2000) Endüktif çalışma durumunda kapasitör gerilimi ve akımının harmonik bileşenlere sahip olması nedeniyle TCSC endüktif olarak yalnızca geçici durumda çalıştırılır.

4.2.2 TCSC kontrol stratejileri ve limitleri

İletim sistemlerinde aktarılan güç, hat sonu gerilimi, faz açısı ve eşdeğer hat empedansı ile belirlenmektedir. Eğer hattın rezistansı ihmal edilirse aktarılan güç aşağıdaki şekilde yazılır.

$$P = \frac{V_k V_m}{X_e} \sin \theta_{km} \quad (4.13)$$

Burada V_k ve V_m hat başlangıcı ve hat sonu gerilim büyüklükleri, X_e hat empedansı ve θ_{km} faz açıları farkıdır. Hat empedansının kontrolü ile aktarılan gücün belirli aralıklarda kontrolü için diğer parametrelerin sabit değerde olduğu kabul edilmelidir. Fakat hatta reaktif güç enjekte edildiğinden hat gerilimleri ve faz açıları değişmektedir. Bu durumda aktarılan güç bu parametrelerin değişimi sonucu değişecektir. Hat empedansı kontrolü ile

%70' lik kompanzasyon için verilen kontrol eşitliği kullanılarak uygun tetikleme açısı belirlenir.

$$X_{TCSC}=0,7 X_{HAT} \quad (4.14)$$

Diğer bir kontrol stratejisi ise güç modülasyonudur. Böylece parametrelerin birbirini etkilemesi ile aktarılan gücün tam olarak kontrol edilememesi durumu ortadan kaldırılır.

$$P_{TCSC}=P_{HAT} \quad (4.15)$$

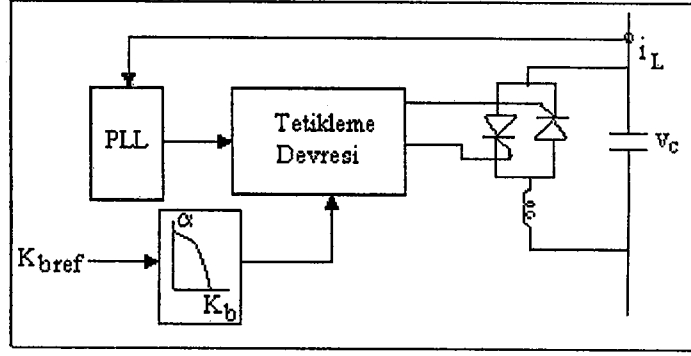
Bu kontrolde, sistem belirlenen sabit gücün hattan akacak şekilde çalışmaktadır. Ayrıca hat akımının kontrolü ile kompanzasyon yapılması mümkündür.

$$I_{TCSC}=I_{HAT} \quad (4.16)$$

Verilen güç ve akım kontrollü kompanzasyonlar güç salınımını azaltmak için kullanılmaktadır. Güç sisteminin kararlılığını arttırmak için ise faz açısı kontrollü kompanzasyon yapılır.

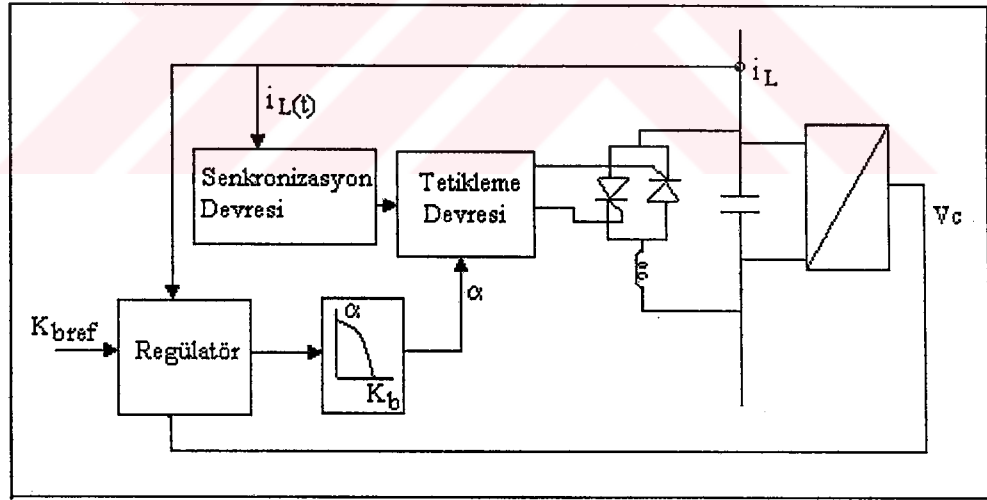
$$\theta_{SET}=\theta_{KM} \quad (4.17)$$

TCSC kontrol limitleri TCR tetikleme açısı limitlerine göre tanımlanır. (Canizares, 1999) TCSC' nin endüktif olarak çalışması için tetikleme açısının $90^\circ \leq \alpha < \alpha_{rez}$ aralığında ve kapasitif olarak çalışması için $\alpha_{rez} < \alpha \leq 180^\circ$ aralığında olması gerekir. TCSC empedansının kritik değerleri olan X_{maxL} ve X_{minC} büyüklükleri X_C/X_L oranına bağlı olarak değişmektedir. TCSC empedansının kontrolü yükseltme faktörü K_B 'nin kontrol edilmesi ile gerçekleştirilir. Kontrol için istenilen değerdeki hat akımına uygun referans yükseltme faktörü belirlenerek tetikleme açısının değiştirilmesi ile empedans kontrolü yapılır. Senkronizasyon hat geriliminden yapılmaktadır. Böylece sistem daha kararlı hale getirilmiş olur. Geri beslemesiz kontrol için sistem cevabı 100 ms değerindedir. Fakat bu kontrolde kompanzator referans değere uygun şekilde sabit empedans ile çalışmaktadır.



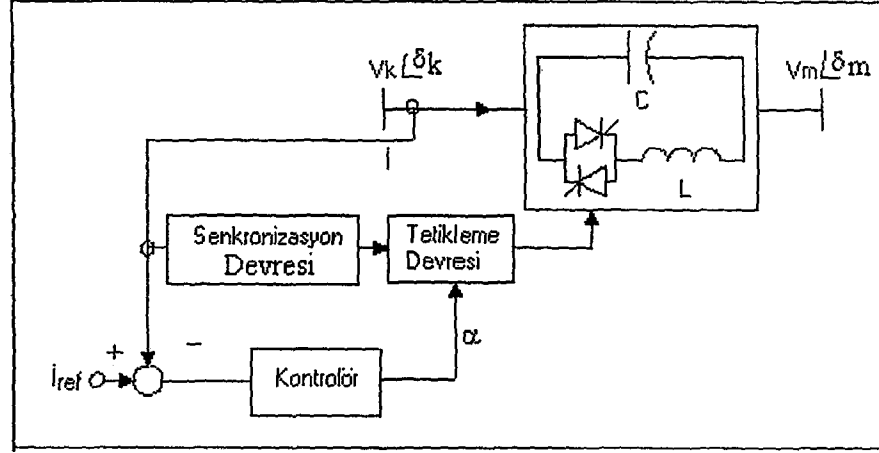
Şekil 4.14 TCSC empedans kontrolü diyagramı

Geri beslemesiz kontrol sisteminin en önemli avantajı uygun sınırlarda çalıştırılarak sistemi aşırı gerilimlerden korumasıdır. Geri besleme döngüsü kontrol hızını arttırmak için kullanılabilir. Kapasitör gerilimi ve hat akımı ölçülerek tristörlerin tetikleme açısını belirlemek üzere geri besleme sinyali regülatöre aktarılır. Geri besleme ile kontrol hızının 2-3 kat artırılması mümkündür. Kapasitör geriliminin ölçülmesi ile yapılan kontrol sonucunda aşırı gerilim oluşması riski ortadan kaldırılmış olur. Bu kontrol için devre şeması Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15 Geri beslemeli TCSC empedans kontrolü blok diyagramı

Bu kontrolde kapasitör gerilimi ve hat akımı ile TCSC'nin görünür empedansı X_{app} saptanarak K_B yükseltme katsayısı belirlenir. Referans yükseltme katsayısı ile karşılaştırma yapılarak kontrolör ile yeni tetikleme açısı belirlenir. Tristörler belirlenen açı ile tetiklenerek kontrol adımı tamamlanır. Şebeke ile senkronizasyon hat akımının sıfır geçiş noktalarına göre yapılır. Hat akımının doğrudan kontrolü ile TCSC empedans kontrolü blok diyagramı Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.16 Akım kontrolü için TCSC blok diyagramı

Basit bir PI kontrolör kullanılarak tetikleme açısının belirlenmesi ile hat akımı doğrudan kontrol edilmektedir. (Canizares ve diğ., 1999), (Sadikoviç ve diğ., 2001) Referans akım ile ölçülen hat akımı karşılaştırılarak hata sinyali kontrolöre iletilir. Kontrolör ile bu sinyale uygun tetikleme açısı belirlenerek tetikleme devresi ile tristörler belirlenen açıda tetiklenir. Böylece TCSC empedansı değiştirilerek hattın akan akımın kontrolü yapılır. Benzer şekilde hattın akan reaktif gücün ölçülüp hat empedansının değiştirilmesi ile de güç ve faz açısının kontrolü yapılabilir.

4.3 TCSC Tasarımı

TCSC tasarımı rezonans açısına göre belirlenen $r_x = X_C/X_L$ oranı esas alınarak gerçekleştirilir. Genel olarak pratikte bu değer eşit empedans aralığı için $r_x=10$ alınır. Bu durumda rezonans açısı $\alpha=143^\circ$ olur. Bu oranın değiştirilerek rezonans açısının sağa veya sola kaydırılması ile endüktif ve kapasitif çalışma aralıkları değiştirilir. Kapasitif modda çalışırken TCSC empedansı minimum olarak kapasitör reaktansına, maksimum olarak ise %100'lük hat kompanzasyonuna eşit değerlerde alınır. Verilen hat empedansı değeri kompanzasyonun maksimum kapasitif empedansı olarak alınır.

$$X_{emax} = X_{hat} \quad (4.18)$$

TCSC empedans karakteristiğinden maksimum kapasitif reaktansı

$$X_{emax} = 3X_C \quad (4.19)$$

olarak alınması durumunda TCSC kapasitör reaktansı hattın reaktansı cinsinden elde edilmiş olur. Rezonans açısı $\alpha_r=143^\circ$ için kapasitif modda tetikleme açısı ;

$$145^\circ \leq \alpha \leq 175^\circ \quad (4.20)$$

aralığında değişmektedir. Bu durumda TCSC'lü iletim hattının reaktansı, kapasitif modda çalışma durumu için yaklaşık olarak sıfır değerine düşürülebilir. Hattan aktarılan güç hat empedansı ile doğrudan orantılı olduğundan seri kompanzasyonun aktarılan güç açısından önemi açıkça görülmektedir. TCR reaktansının kapasitör reaktansına bağlı olarak değişmesi nedeniyle kapasitör reaktansı belirlendikten sonra X_L reaktansı;

$$X_L = \frac{X_c}{10} = \frac{X_{hat}}{30} \quad (4.21)$$

eşitliği ile hesaplanır. Tetikleme açısı arttıkça TCR reaktansı sonsuza gitmekte ve açık devre özelliği göstermektedir. (Canizares ve diğ., 1999) Bu durumda TCSC eşdeğer reaktansı kapasitör reaktansına eşit olur. TCR temelli seri ve paralel kompanzatörler sisteme reaktif güç aktarmak veya çekmek suretiyle gerilim, aktif güç, akım ve faz açısı kontrolünün yanısıra güç osilasyonlarının bastırılması amacıyla da güç sistemlerinde kullanılmaktadır.

BÖLÜM 5

İNVERTÖR TEMELLİ PARALEL VE SERİ KOMPANZATÖRLER

5.1 Giriş

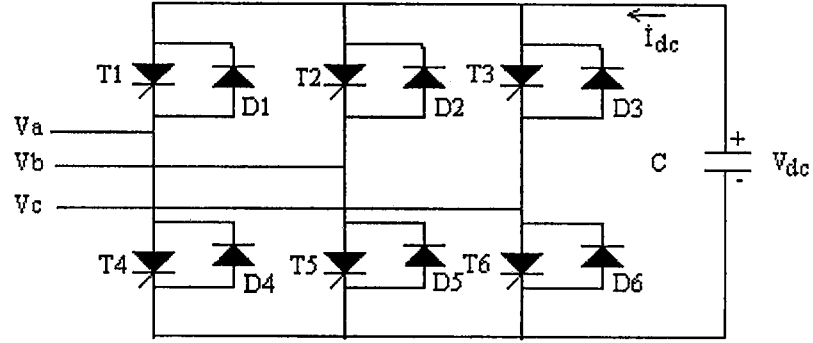
Statik Kompanzatör (Statcom) ve Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC) invertör temelli paralel ve seri FACTS kontrolör elemanlarıdır. Bunlar SVC ve TCSC'e nazaran daha iyi kontrol karakteristiğine sahip olup, Statcom empedansı daha düşük ve SSSC daha geniş bir aralıkta hat empedansının değişimine imkan sağlamaktadır.

Statcom güç sistemlerine paralel olarak bağlanmakta ve çıkış geriliminin bağlı olduğu sistem geriliminden büyük veya küçük olma durumuna göre hatta reaktif güç enjekte etmekte veya hattan reaktif güç çekmektedir. Böylece bağlı bulunduğu sistem geriliminin belirli sınırlarda kontrolüne imkan sağlamaktadır. Statcom güç sisteminde gerilim kontrolü amacıyla kullanılır. Statcomun bir transformatör ile iletim hattına seri olarak bağlanması durumunda Statik Senkron Seri Kapasitör devre şeması elde edilir. Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC) genel olarak enerji iletim sisteminde aktif ve reaktif güç akışının kontrolü amacıyla kullanılır. Sisteme eklenen seri gerilim bileşeni ve akan akım arasındaki faz farkına göre endüktif ve kapasitif olarak çalışmakta ve bağlı olduğu hat empedansının kompanzasyonuna imkan sağlamaktadır. (Canizares, 2000), (Faur ve diğ., 1996)

5.2 Üç Fazlı İnvörtörler

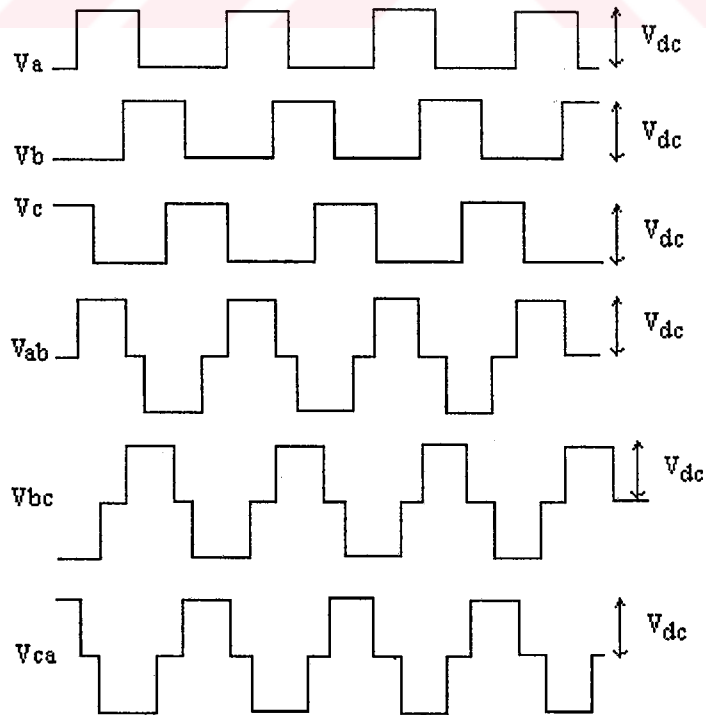
Statcom değişik anahtarlamalı invörtörler kullanılarak farklı uygulamalar için kullanılan FACTS cihazıdır. Bunlardan üç fazlı invörtör şeması Şekil 5.1'de verilmiştir. Yüksek güçlü invörtörler için kesimde olan yarıiletken anahtar üzerindeki gerilim düşümünü azaltmak amacıyla birbiriyle senkron olarak çalışan birden fazla yarıiletkenler kullanılmaktadır. İnvörtör, DC gerilim kaynağı veya bir kapasitör ile beslenerek çıkışta

aralarında 120 derecelik faz farkı olan üç fazlı istenen frekansta AC gerilim elde edilmektedir.



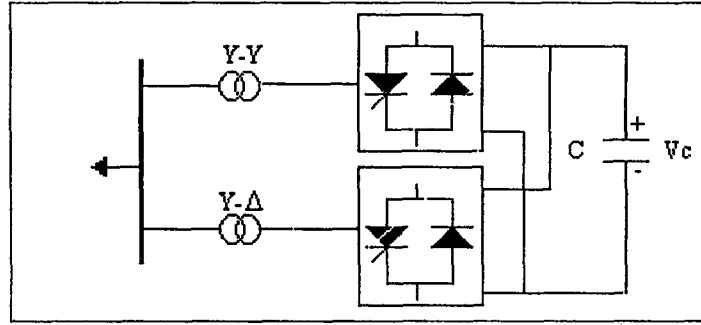
Şekil 5.1 Üç fazlı invertör şeması

Çıkış gerilimindeki harmonikleri azaltmak için sistemde kullanılan invertör sayısı artırılır. Böylece aynı faza ait çıkış gerilimleri arasındaki faz farkından dolayı elde edilen toplam gerilim sinüs dalga formuna yakın sinyal elde edilir. İnvirtör çıkışı faz gerilimlerinin dalga formları Şekil 5.2’de verilmiştir. Birden fazla invertörün kullanıldığı güç sistemlerinde invertör çıkışındaki transformatörlerin primer sargıları yıldız ve birbirine seri olarak bağlanmakta sekonder sargılar ise üçgen ve yıldız bağlanarak aralarında 30 derecelik faz farkı oluşturulmaktadır.



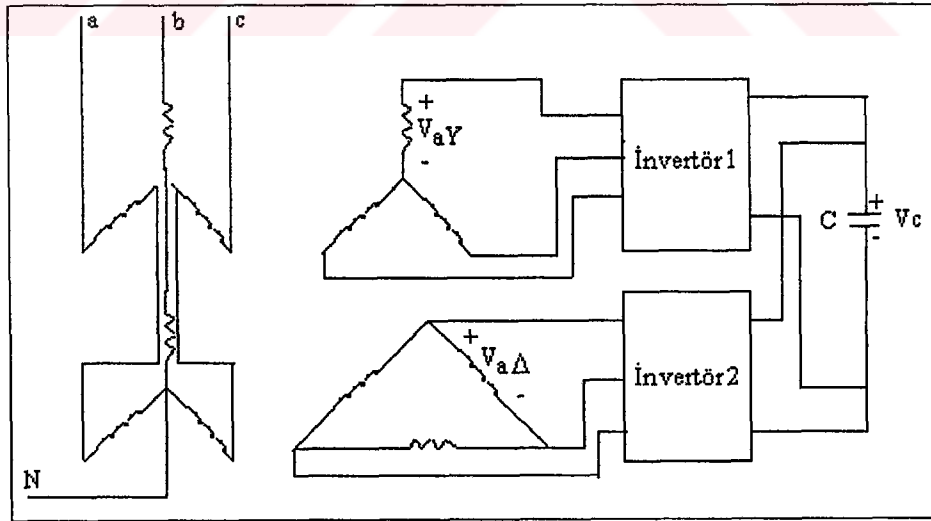
Şekil 5.2 Üç fazlı invertör çıkış gerilimlerinin değişimi

Verilen üç fazlı 6 darbe tetiklemeli invertörlerde çıkış gerilimi $[6k \pm 1]f$ frekanslı harmonik bileşenler içermektedir. Burada f AC sistemin temel frekans bileşeni ve $k=1,2,3\dots$ tam sayıları göstermektedir. İki invertörden oluşan (12 darbeli) Statcom ve SSSC devre yapılarında trafo sargılarının I. trafo için Y-Y, ikinci trafo için Y- Δ bağlanması ile çıkış gerilimleri arasında 30° lik faz farkı oluşmaktadır. Bu bağlantıya ait devre şeması Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.3 İki invertörlü (12 darbeli) devre şeması

Devredeki invertörlerin DC girişleri paralel olarak bağlanmaktadır. Eğer transformatörlerin primer girişleri seri olarak bağlanırsa AC uçtaki çıkış gerilimi her bir invertör çıkış geriliminin toplamına eşit olur. Bu bağlantıya ait devre şeması Şekil 5.4'de verilmiştir.

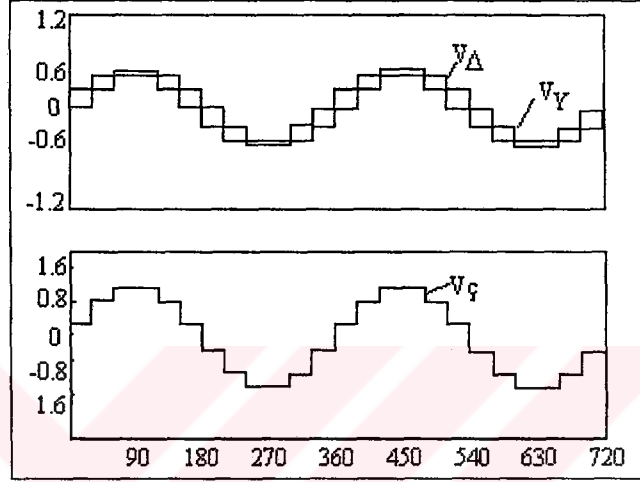


Şekil 5.4 İki invertörlü (12 darbeli) devrenin bağlantı şeması

Yıldız bağlantıda gerilim üçgen bağlantıdan 30° geride olması nedeniyle toplam gerilimdeki harmonikler azalır sinüse yakın dalga formu elde edilir. (Sybille ve diğ., 2000), (Uzunovic ve diğ., 1997) Bu durumda çıkış geriliminin ifadesi

$$V_a = a_1 V_{aY} + a_2 V_{a\Delta} / \sqrt{3} \quad (5.1)$$

şeklinde değişir. (Uzunoviç ve diğ., 1997) Burada a_1 ve a_2 bağlantı trafolarının gerilim dönüştürme oranlarıdır. Trafo çıkış gerilimlerinin eşit genlikli üç seviyeli gerilimler olması durumunda bu gerilimler ve toplam çıkış geriliminin zamana göre değişimi Şekil 5.5'de verilmiştir.



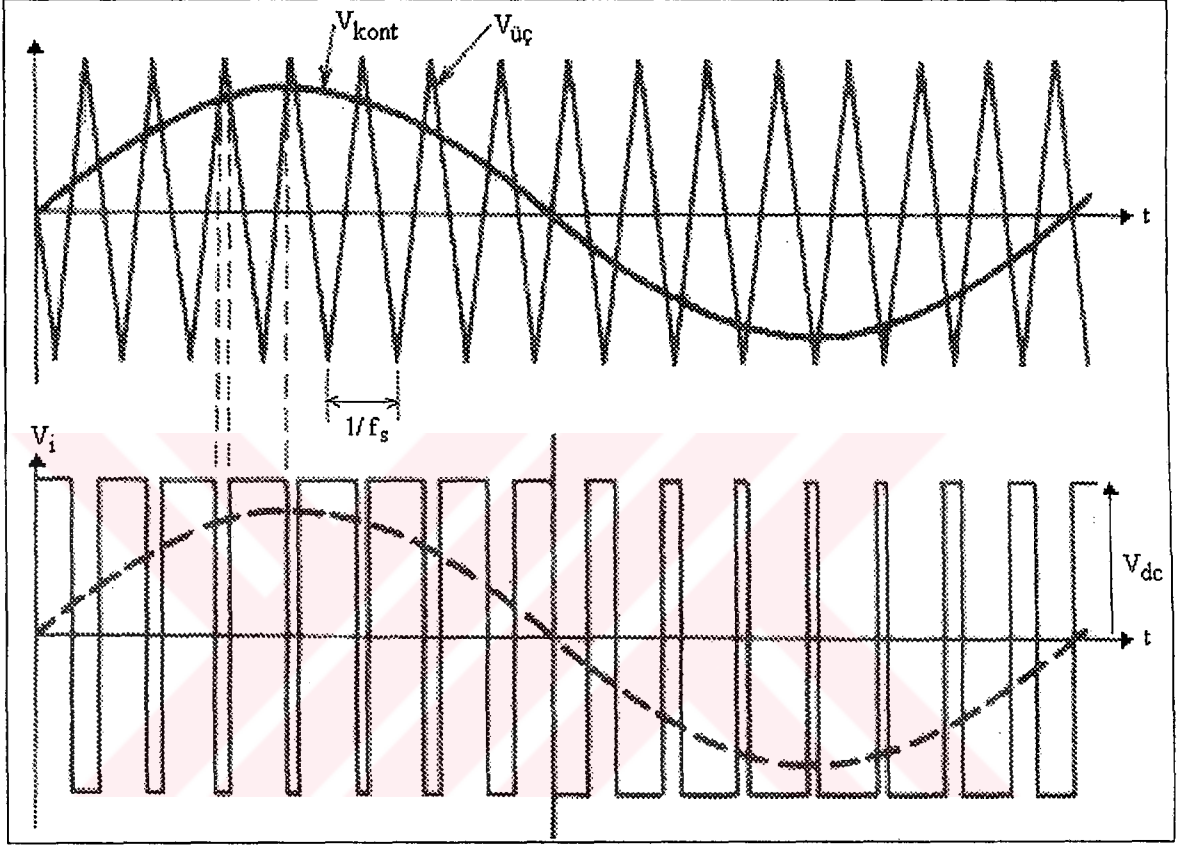
Şekil 5.5 İki invertörlü (12 darbeli) sistemde invertör çıkış gerilimleri ve toplam çıkış geriliminin zamana göre değişimi

Yıldız bağlantıda gerilim üçgen bağlantıdan 30° geride olması nedeniyle toplam gerilimdeki harmonikler azalır sinüse yakın dalga formu elde edilir. Bu durumda çıkış gerilimi $[12k \pm 1]f$ frekanslı harmonik bileşenler içermektedir. (Ekonayake ve diğ., 1996) Harmonikleri azaltmak için kullanılan yöntemlerden biriside darbe genişlik modülasyonu (PWM) anahtarlama yöntemidir.

5.3 Darbe Genişlik Modülasyonlu (PWM) Anahtarlama Yöntemi

Darbe genişlik modülasyonu (PWM) harmonik analizi ve harmoniklerin bastırılması için kullanılan en etkin yöntemdir. Sistemde kullanılan GTO tristörler her yarım periyotta birden fazla iletme ve kesime sokularak çıkışta genişlikleri birbirinden farklı sinyaller elde edilir. Bu iletim ve kesim durumları belirli bir sıraya göre yapılmaktadır. Böylece çıkışta istenilen temel bileşenli ve düşük harmonik bileşenli sinyal elde edilir. Kullanılan yarıiletkenlerin anahtarlama frekanslarının yüksek olması gerekmektedir. Bu metodun en önemli dezavantajlarından birisi kullanılan GTO transistörlerinin anahtarlama

kayıplarının yüksek olmasıdır. Diğer yarı iletken güç elektroniği elemanlarından IGBT, GTO'ya nazaran daha düşük anahtarlama kayıplarına sahip olduğundan düşük frekanslı PWM uygulamalarında daha elverişlidir. PWM kontrol sinyalleri ve çıkış geriliminin değişimi Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6 Darbe genişlik modülasyonu gerilimleri ve çıkış geriliminin değişimi

Burada f_s üçgen dalga frekansı ve anahtarlama frekansı f_1 ise kontrol sinyali ve aynı zamanda invertör çıkış geriliminin frekansdır. Kontrol sinyali ile üçgen dalga karşılaştırılmakta, kontrol sinyalinin üçgen dalga sinyalinden büyük değerleri için pozitif, küçük değerlerinde ise negatif V_{dc} gerilimi elde edilmektedir. İnvörtör çıkış gerilimi etkin değerinin genlik modülasyon oranı ve DC gerilim cinsinden

$$V_{inv} = kV_{dc} \quad (5.2)$$

olarak ifade edilir. Burada k genlik modülasyonu oranına bağlı olarak değişmekte ve

$$k = \frac{m \sqrt{3}}{2 \sqrt{2}} \quad (5.3)$$

$$m = \frac{V_{kont}}{V_{uç}} \quad (5.4)$$

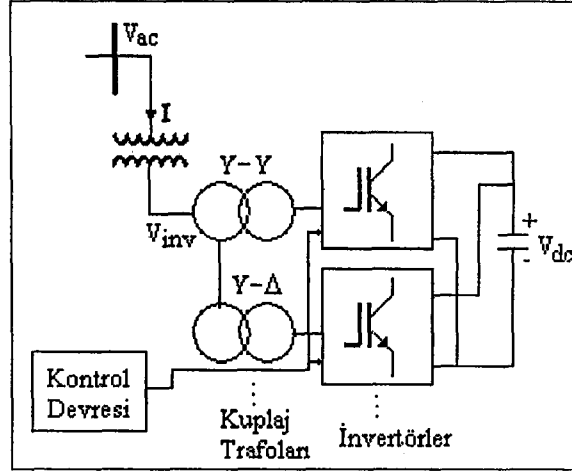
ile ifade edilmektedir. (Sybille ve diğ., 2000) Verilen eşitliklerden görüldüğü gibi invertör çıkış gerilimi anahtarlama frekansına (f_s) ve kontrol sinyali genliğine bağlı olarak değiştirilebilmektedir.

5.4 Statik Kompanzator (Statcom)

Statcom invertör temelli paralel FACTS kontrolör elemanıdır. Güç sistemlerine paralel bağlanarak reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim regülasyonu için kullanılır. Statcom şebeke ile senkron olarak çalışan gerilim ve reaktif güç kaynağı olarak tanımlanabilir. Böylece sisteme bir zorlamalı fonksiyon yaklaşımı ile iletim hattı kompanzasyonunu ve güç akış kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Çıkış geriliminin frekansı sistemin temel frekansına eşit olması gerekmektedir. Kompanzatorün çıkış empedansı teorik olarak temel frekans dışındaki tüm frekanslarda sıfıra eşittir. Pratikte bağlantı trafosunun kaçak akılarından dolayı küçük değerli endüktif reaktansa sahiptir. Çıkış gerilimi ile sistem gerilimi arasındaki faz farkına göre sistemden aktif güç çekmekte veya sisteme aktif güç aktarılmaktadır. Çekilen aktif güç ile kondansatör şarj olmakta ve invertör çıkış gerilimi kontrol edilmektedir. Statcom sisteme reaktif güç aktarırken (kapasitif moda çalışırken) kondansatörün sistem için gerekli olan gerilim seviyesini sağlayabilmesi için şarj olması gerekir. Bu da Statcom çıkış geriliminin sistem geriliminden geri fazda olacak şekilde kontrol edilmesi ile sağlanabilmektedir. Böylece sistemden çekilen aktif güç hem dahili kayıpları karşılar hemde gerekli olan DC gerilimi sağlamış olur. Statcomun paralel reaktif güç kompanzatorü olarak çalışması ve performans karakteristiğinin ideal, senkron, hareketli kompanzator ile benzer olması nedeniyle Statik Senkron Kompanzator (Statcom) olarak adlandırılmaktadır. Statcom geleneksel tristör kontrollü statik var kompanzator ile aynı karakteristiğe sahiptir. İnvörtör çıkış gerilimindeki harmonikleri azaltmak için üç fazlı sistemlerde birden fazla invertör gurupları kullanılır. İnvörtör anahtarları için yüksek güç ve akım kapasitesine sahip GTO ve IGBT anahtarlar kullanılmaktadır. (Sahoo ve diğ., 2002)

Bağlı bulunduğu AC sistem gerilimi ile invertör çıkış geriliminin büyüklüğü Statcom reaktif gücünü tayin etmektedir. Genel olarak iki invertörden oluşan (12 darbeleri) Statcom

devre şeması Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7 İki invertörlü Statcom devre şeması

Reaktif güç Statcom çıkış geriliminin değiştirilmesi ile kontrol edilmektedir. Eğer Statcom çıkış gerilimi AC sistem geriliminden büyük ise akımın reaktif bileşeni Statcom’dan AC sisteme doğru akmakta ve AC sisteme reaktif güç aktarılmaktadır. Bu durumda akım gerilimden yaklaşık olarak 90° ilerde olup aktarılan güç kapasitiftir. Eğer Statcom çıkış gerilimi AC sistem geriliminden küçük ise reaktif akım AC sistemden Statcom’a doğru akmakta ve sistemden reaktif güç çekilmektedir. Bu durumda akım gerilimden yaklaşık olarak 90° geride olup sistemden endüktif güç çekilmektedir. Statcom çıkış geriliminin AC sistem gerilimine eşit olması durumunda reaktif akım ve reaktif güç sıfır olmaktadır.

Kapasitör, invertör için gerekli DC gerilimi sağlamak amacıyla kullanılır. İnvörtör çıkış gerilimi ile AC sistem gerilimi arasındaki faz farkına bağlı olarak kapasitör şarj veya deşarj olmaktadır. Transformator rezistansının ihmal edilmesi durumunda AC sistemden Statcom’a akan aktif güç,

$$P = 3 \frac{V_{ac} V_{inv}}{X} \sin \alpha \quad (5.5)$$

olarak ifade edilir. Burada V_{ac} AC sistem geriliminin V_{inv} ise invertör çıkış geriliminin etkin değerleri, X trafoların eşdeğer reaktansı ve α gerilimler arası faz farkıdır. Bu durumda $\alpha > 0$ ise invertör çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazdadır. Çekilen aktif güç $p > 0$ olduğundan kapasitör şarj olur. Açının negatif olması durumunda çekilen

aktif güç $p < 0$ olmakta ve kapasitör deşarj olur. Sürekli durumda invertör çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazda tutularak sistemden çekilen aktif güç trafo ve invertör kayıpları karşılanmıştır olur. Statcom çıkış gerilimi ve AC sistem geriliminin trigonometrik olarak ifadesi

$$v_{ac}(t) = \sqrt{2} V_{ac} \sin(\omega t + \theta) \quad (5.6)$$

$$v_{inv}(t) = \sqrt{2} V_{inv} \sin(\omega t + \theta - \alpha) \quad (5.7)$$

şeklinde değişmektedir. Eğer invertör kayıpları ihmal edilirse

$$3 \frac{V_{ac} V_{inv}}{X} \sin \alpha = V_{dc} I_{dc} = CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (5.8)$$

eşitliği yazılabilir. Denklem (5.2) ve (5.8)'den yararlanarak

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3k}{CX} V_{ac} \sin \alpha \quad (5.9)$$

ifadesi elde edilir. (Uzunoviç ve diğ., 1997) Denklem 5.9'dan gördüğü gibi $\alpha > 0$ için $dV_{dc}/dt > 0$ ve kapasitör şarj olmakta, $\alpha < 0$ için $dV_{dc}/dt < 0$ ve kapasitör deşarj olmaktadır. Faz açısı $\alpha = 0$ olduğunda $dV_{dc}/dt = 0$ ve kapasitör gerilimi sabit kalmaktadır. Invertör kayıpları kapasitöre paralel bir direnç bağlanarak denkleme kolaylıkla eklenebilir.

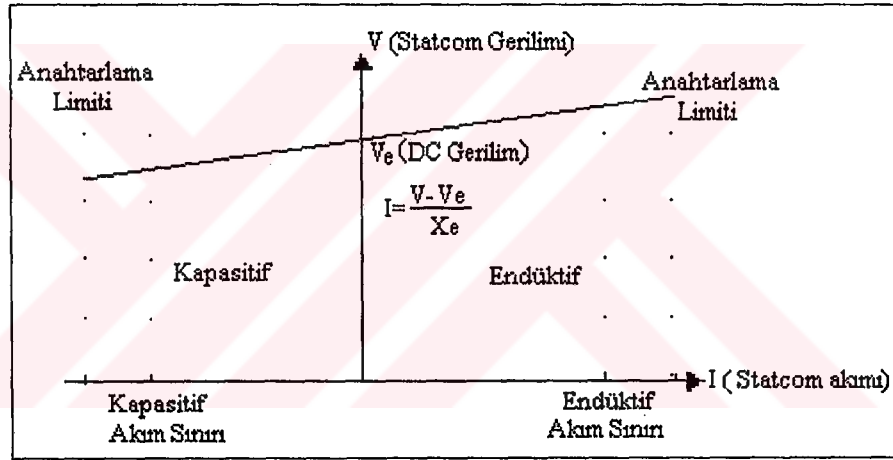
$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3k}{CX} V_{ac} \sin \alpha - \frac{V_{dc}}{RC} \quad (5.10)$$

Bu durumda sürekli çalışma durumu için α açısının sıfırdan büyük olması gerekir. Böylece sistemden çekilen akım invertör kayıplarını karşılamak için kullanılmakta ve kapasitörü şarj etmektedir.

5.4.1 Statcom sürekli durum analizi

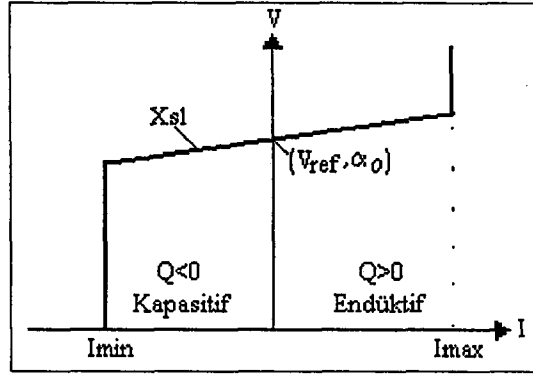
Genel olarak Statcom çıkışı gerilim-akım karakteristiği tamamen invertör gerilimi V_i ve bağlantı transformatörünün reaktansı X_e 'ye bağlıdır. Transformatör reaktansı genellikle

0.1-0.2 ohm aralığında seçilmektedir. Üzerindeki gerilim düşümü ise sistem geriliminin %10-20'si aralığında değişir. Statcom, yarıiletkenlerin açma ve kapama anlarında akan aşırı akım kapasitelerinden büyük değerli geçici akımlar çekmektedir. Buda kullanılan yarıiletkenlerin güvenliği açısından büyük önem arz eder. Sürekli durumda maksimum Statcom gerilimi sistemin nominal geriliminin 1.1 katı olarak alınır. Bu gerilim değeri Statcom tasarımında olumsuz bir durum teşkil etmemektedir. Her ne kadar Statcom geçici durum ve sürekli durumda oluşan aşırı gerilimlere karşı dayanıklı olsa da çalışma esnasında oluşabilecek aşırı gerilimlere karşı gerilim sınırlayıcılar kullanılmaktadır. Geçici durumda oluşan ani gerilimlerin kaynak geriliminden büyük değere çıkması halinde, Statcom diyotlarından akım akarak kondansatörün yüksek gerilimlerle şarj olmasına neden olur. Genel olarak kontrol edilmeyen Statcom'un Gerilim-Akım (V-I) karakteristiği Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8 Kontrol edilmeyen Statcom karakteristiği

Karakteristikten görüleceği üzere Statcom'un, anahtarlama limiti olarak verilen geçici durum sınırlarında çalıştırılması mümkündür. Bunun için kullanılan DC kaynak kapasitör büyüklüğünün değiştirilmesi gerekir. Statcom ve SVC gibi paralel kompanzatörler bir çok pratik uygulamalarda eğimi % 2-5 arasında değişen reaktansta çalıştırılır ve bu reaktans kullanılan transformatör reaktansından oldukça küçük değerdedir. Çünkü transformatör reaktansı sabittir ve konvertör geriliminin verilen şekilde değişmesi gerekir. Statcom için uygun kontrol karakteristiği DC kaynak geriliminin farklı değerlerde alınması ile elde edilir. Şekil 5.9'da Statcom kontrol karakteristiğini gösteren sürekli durum V-I karakteristiği verilmiştir.

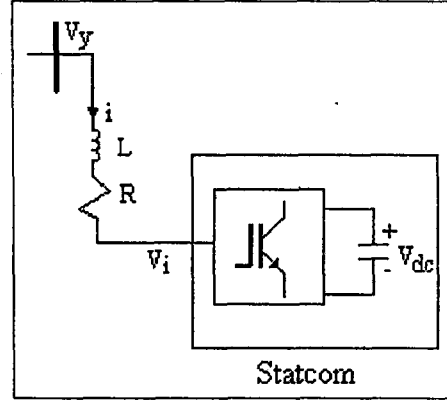


Şekil 5.9 Statcomun sürekli durum V-I karakteristiği

Statcom çıkışta sinüzoidal gerilime yakın gerilim sinyali verme prensibiyle çalışmasından dolayı çok hızlı geçici durum cevabına sahiptir. Sürekli durum çalışma karakteristiği sistem gerilimi, DC kaynak gerilimi ve transformatör empedansına bağlıdır. Herhangi bir açık devre durumunda sistem gerilimi Statcom referans geriliminden daha düşük bir değerde olur. Bu durumda sisteme açık devre geriliminin büyüklüğüne bağlı olarak kapasitif akım aktarılır. Bu akım değerinin üretebilmek için Statcom geriliminin AC sistem geriliminden büyük değerde olması gerekir ki sisteme reaktif güç aktarılabilsin. Eğer sistem gerilimindeki düşüş büyük değerde ise bu durumda sisteme aktarılacak olan reaktif güç değeri artar. Statik VAR Kompanzator de ise bu olay kompanzator suseptansının değiştirilmesi ile gerekli olan akım değeri elde edilmektedir. Bu nedenle Statcom çıkış gerilimi kapasitif modda iken referans gerilimden küçük, endüktif modda ise referans gerilimden büyük değerdedir. Kompanzatorün reaktans eğiminin sıfır olması sistem geriliminin sabit değerde kontrolüne imkan sağlamaktadır. Fakat sistem kayıplarından dolayı eğim hiçbir zaman sıfıra eşit değildir. Bu nedenle sistem gerilimi belli bir toleransta kontrol edilmektedir.

5.4.2 Statcom kontrol tekniği

Kapasitör DC gerilimi ve invertör çıkış geriliminin kontrolü için akımın ve geriliminin aktif ve reaktif bileşenlerinden yararlanır. Park dönüşümü kullanılarak akımın aktif ve reaktif bileşenleri elde edilir. Akımın I_d aktif bileşeni ile DC gerilimin kontrolü için V_q gerilim bileşeni ve I_q reaktif bileşeni kullanılarak invertör çıkış geriliminin kontrolü için V_d gerilim bileşeni kontrol edilmektedir. Şekil 5.7’de verilen Statcom devre şemasında trafoların eşdeğer empedansı $Z=R+jX$ olarak ifade edilmesi durumunda elde edilen sistemin tek fazına ait devre şeması Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil5.10 Statcomlu güç sisteminin tek faz devre şeması

AC sistem ile Statcom arasındaki akım ve gerilim ilişkisi

$$(R+L\frac{d}{dt})i=V_y-V_i \quad (5.11)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada verilen değişkenler

$$i=[i_a \ i_b \ i_c]^T, V_i=[V_{ia} \ V_{ib} \ V_{ic}]^T \text{ ve } V_y=[V_{ya} \ V_{yb} \ V_{yc}]^T \quad (5.12a)$$

$$R = R \times [I]_{3 \times 3} \text{ ve } L = L \times [I]_{3 \times 3} \quad (5.12b)$$

matrisleri ile ifade edilir. DC gerilim ve invertör çıkış gerilimlerinin kontrolü için üç fazlı akım ve gerilimler Park dönüşümü ile d-q bileşenlerine dönüştürülür. Bu durumda akım ve gerilimlerin aktif ve reaktif bileşenleri,

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = Px \begin{bmatrix} V_{ay} \\ V_{by} \\ V_{cy} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = Px \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

$$P = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

ifadeleri ile belirlenir. Denklem 5.12'de verilen dönüşümden yararlanarak elde edilen akım ve gerilim bileşenleri cinsinden Statcomlu sistemin dinamik denklemleri elde edilir.

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \omega i_q + \frac{1}{L}(V_{yd} - V_{id}) \quad (5.15a)$$

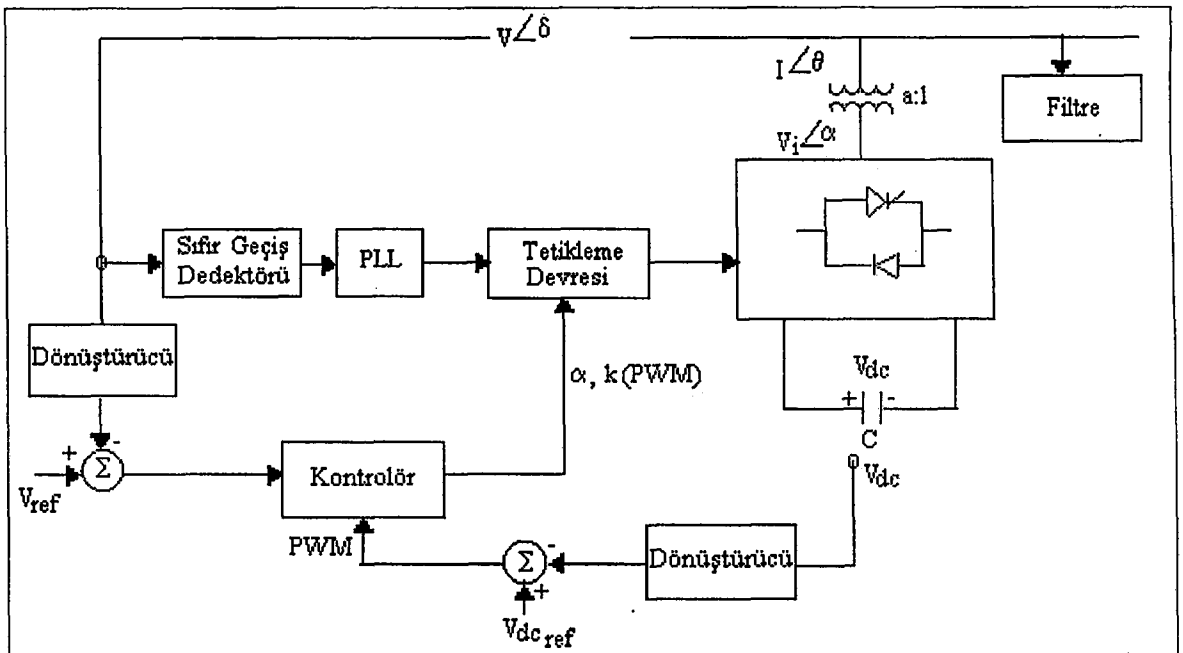
$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \omega i_d + \frac{1}{L}(V_{yq} - V_{iq}) \quad (5.15b)$$

Elde edilen dinamik denklemlerden yararlanarak invertör çıkış geriliminin aktif ve reaktif bileşenlerinin ifadeleri

$$V_{id} = \omega L i_q + V_y - L \omega i_d \quad (5.16a)$$

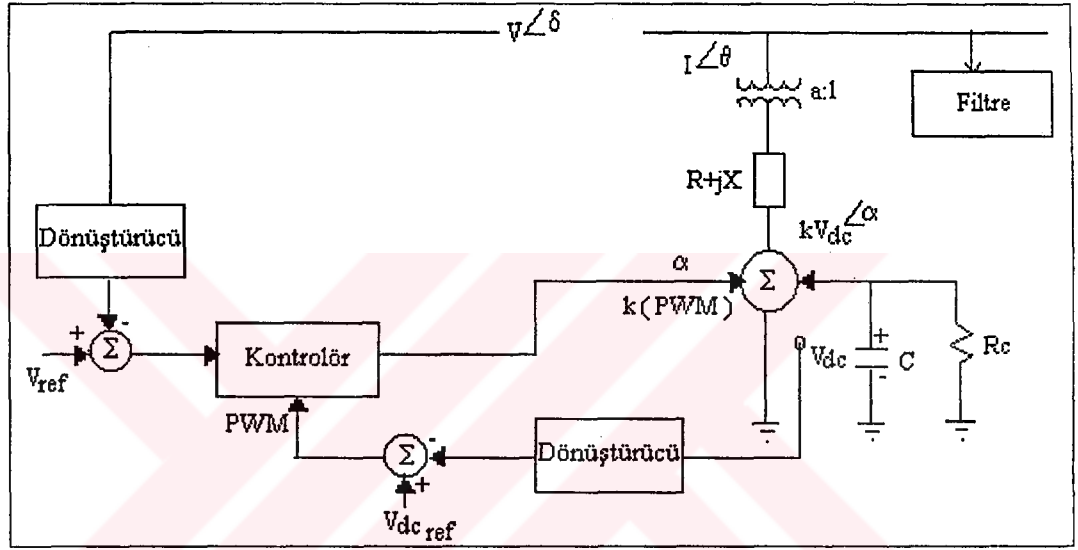
$$V_{iq} = -(\omega L i_d + L \omega i_q) \quad (5.16b)$$

elde edilir. Burada u_d ve u_q lineer PI kontrolörden elde edilen kontrol sinyalleridir. (Sahoo ve diğ., 2002) Bu durumda kontrol sinyalleri ve akımın aktif ve reaktif bileşenlerinden yararlanarak invertör çıkış gerilimi ve DC gerilimi kontrol edilir. Statcomlu kontrol sistemlerinde gerilim kontrolünün dışında faz açısı kontrolü de yapılmaktadır. Şekil 5.11'de genel olarak PWM gerilim kontrollü Statcom blok diyagramı verilmiştir. Sistemde hem invertör DC gerilim kontrolü hem de faz açısı kontrolü yapılmaktadır. Sistemden DC gerilim kontrol döngüsü çıkartıldığında yalnızca faz açısı kontrolüne ait blok diyagramı elde edilmektedir.



Şekil 5.11 PWM gerilim kontrollü Statcom blok diyagramı

Verilen devrede sistem gerilimi Statcom çıkış gerilimine göre kontrol edilir. Kapasitör DC gerilimi α tetikleme açısına göre kontrol edilerek invertör çıkış geriliminin kontrolü yapılır. Bu tetikleme açısı sistemden çekilen veya aktarılan aktif güçten belirlenmektedir. İnvörtör çıkış geriliminin kontrolü sistem geriliminin kontrolüne imkan sağlar. Sistem gerilimi ile kontrol devresi arasındaki senkronizasyon sıfır geçiş dedektörü ve PLL ile gerçekleştirilir. (Canizares, 2000) Çıkış gerilimindeki harmonikleri azaltmak için dijital veya analog aktif ve pasif filtreler kullanılır. Verilen kontrol sisteminden yararlanarak Statcom'un geçici kararlılık modelinin elde edilmesi mümkündür.



Şekil 5.12 Statcom geçici kararlılık modeli

Verilen bu model için birim değer (per-ünit) olarak diferansiyel ve cebirsel denklemler aşağıda verilmiştir.

$$V_{DC} = \frac{VI}{CV_{DC}} \cos(\delta - \theta) - \frac{G_c}{C} V_{DC} - \frac{R}{C} \frac{I^2}{V_{DC}} \quad (5.17a)$$

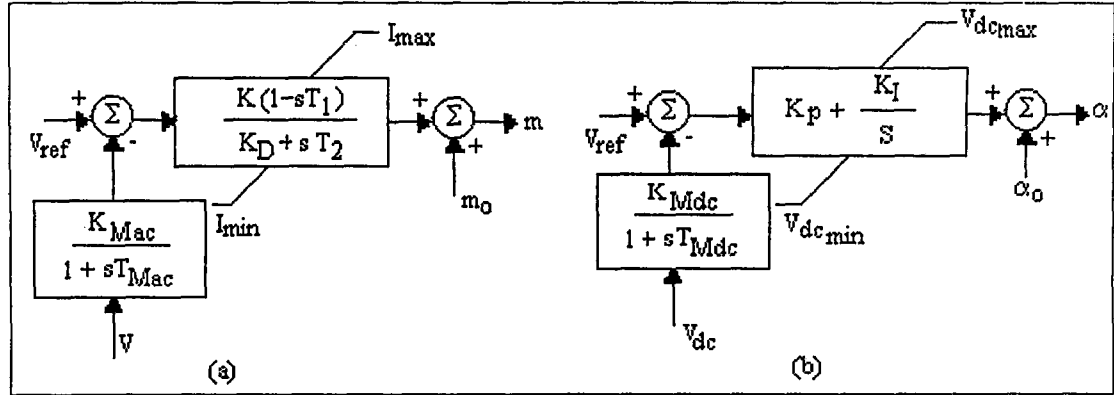
$$P- VI \cos(\delta - \theta) = 0 \quad (5.17b)$$

$$Q- VI \sin(\delta - \theta) = 0 \quad (5.17c)$$

$$P- V^2 G + k V_{DC} V G \cos(\delta - \alpha) + k V_{DC} V B \sin(\delta - \alpha) = 0 \quad (5.17d)$$

$$Q+ V^2 B - k V_{DC} V G \cos(\delta - \alpha) + k V_{DC} V G \sin(\delta - \alpha) = 0 \quad (5.17e)$$

Burada verilen değişkenlerin çoğu Şekil 5.12'de gösterilmektedir. $G_c=1/R_c$ ve $G+jB=(R+jX)^{-1}$ bağlantı transformatörünün admitansdır. Diferansiyel denklemden yararlanarak PWM gerilim kontrolör blok diyagramı Şekil 5.13'de verilmiştir.



Şekil 5.13 Statcom için PWM gerilim kontrolörü (a), faz açısı kontrolörü (b) blok diyagramları

Kontrolör limitleri kullanılan yarıiletken anahtarların akım limitlerine göre belirlenir. Bu limitler Statcomun sürekli durum uç karakteristiğinde verilir. Statcom için yapılan simülasyonlarda akım veya DC gerilimden herhangi biri belirlenen sınırları aşması durumunda kontrolde integratör blokları devre dışı bırakılır. (Canizares, 1999) Denklem 5.17 ve Statcomun V-I karakteristiğinden yararlanarak PWM kontrolörün sürekli durum denklemlerinin elde edilmesi mümkündür. Eğer Denklem 5.17 $g(\alpha, k, V, V_{dc}, \delta, I, \theta, P, Q)$ ile gösterilirse kontrolör için sürekli durum denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$V - V_{ref} \pm X_{SL}I = 0 \quad (5.18a)$$

$$V - V_{Deref} = 0 \quad (5.18b)$$

$$P - G_c V_{DC}^2 - RI^2 = 0 \quad (5.18c)$$

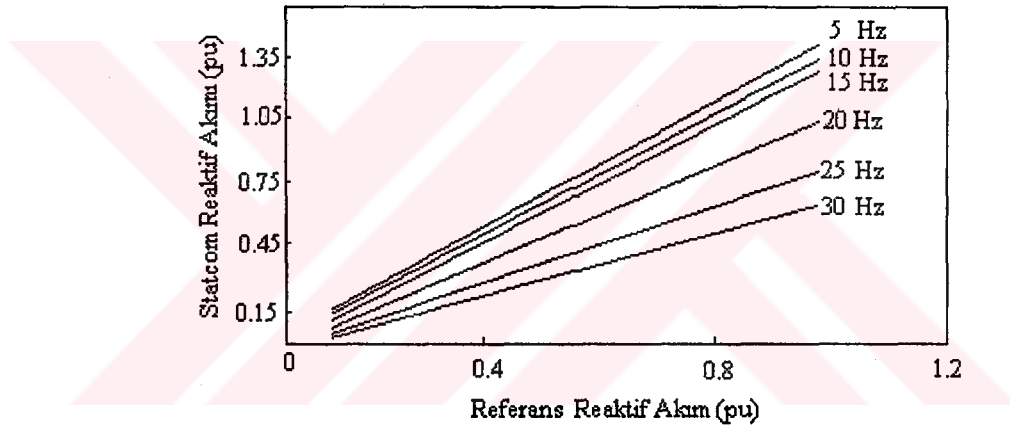
$$g(\alpha, k, V, V_{dc}, \delta, I, \theta, P, Q) = 0 \quad (5.18d)$$

Verilen denklem sistemindeki birinci denklemde pozitif işaret, Statcomun kapasitif olarak çalışmada, negatif işaret ise endüktif çalışma durumunda alınmaktadır. Faz geriliminin kontrolü verilen denklemde DC gerilim denkleminin modellenmesi ve $k=0.9$ alınarak yapılması mümkündür. Bu durumda DC gerilim, α tetikleme açısının değişmesi ile

değişecektir ve kapasitörün şarj veya deşarj olması ile DC geriliminin kontrolü yapılmış olur. (Canizares ve diğ., 1999), (Uzunoviç ve diğ., 1997)

5.4.3 Statcom frekans cevabı

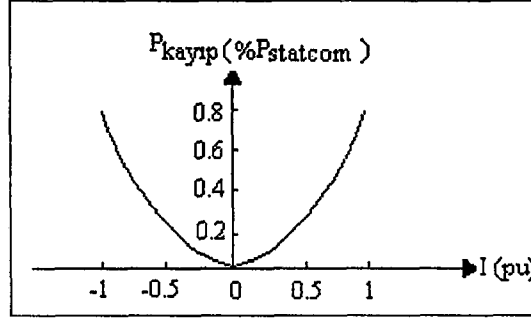
Statcomlu sistemin frekans cevabı referans reaktif akım ile Statcom reaktif çıkış akımı arasındaki ilişkiye göre belirlenir. Birbirinden farklı çalışma frekanslarda reaktif çıkış akımının frekansa göre değişimi Şekil 5.14’de verilmiştir. Bu karakteristik 3-30 Hz aralığında farklı frekanslar için yapılmıştır. 3 Hz’den küçük frekanslar için Statcomda herhangi bir gecikme yoktur. Bu frekans değerlerinden büyük frekans değerlerinde Statcomda gecikme oluşmakta ve frekans arttıkça gecikme artmaktadır.



Şekil 5.14 Statcom akım kazancının frekansa göre değişimi

Bu analiz sonuçları Statcom tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır. Frekans cevabından görüleceği üzere referans ve çıkış akımları arasında bütün frekanslar için belirli bir lineerlik vardır. Herbir frekans değeri için eğim sabit olup 10Hz’den küçük frekanslar için eğim yüksektir. Eğim frekans arttıkça azalmaktadır. Statcomun dahili anahtarlamalı kompanzatör olması nedeniyle elde edilen bu lineerlik son derece önemlidir. DC kapasitör büyüklüğü Statcom dinamik performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Reaktif gücün kontrolü için DC gerilim büyüklüğünün kontrolü gerekir. Kapasitörün şarj veya deşarjı ile Statcom çıkış gerilimi değiştiğinden kapasitör büyüklüğü zaman sabitini değiştirmekte dolayısıyla dolma boşalma süresini etkilemektedir. Dolayısıyla düşük kapasitör değerleri için Statcom dinamik cevabı daha hızlı olacaktır. Konvertör yarı iletkenleri için GTO tristörünün iletim durumundaki gerilim düşümü normal tristöre nazaran daha büyük

olduğundan dolayı iletim kayıpları tristörlere nazaran daha yüksektir. Statcom kayıpları anahtarlama ve transformatör kayıplarından oluşması nedeniyle akımla orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 5.15 Statcom kayıplarının akıma göre değişimi

Yukarda Statcomun endüktif ve kapasitif olarak çalışması durumları için kayıp gücün Statcom akımına göre değişimi verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere her iki durum için çekilen aynı büyüklükteki akımlar için güç kaybı eşittir. Verilen şekilden yararlanarak Statcom için güç kayıplarının uygulamalarda ihmal edilecek kadar küçük olduğu söylenebilir.

5.5 Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC)

Daha önce Statcomun güç sisteminde gerilim kontrolü amacıyla kullanıldığı belirtilmiştir. Statcom transformatör ile iletim hattına seri olarak ta bağlanmaktadır. Bu kompanzator “Statik Senkron Seri Kapasitör” olarak adlandırılır. Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC) genel olarak güç sisteminde aktif ve reaktif güç kontrolü amacıyla kullanılmaktadır. (Canizares ve diğ., 1999) Eğer yalnızca reaktif güç kompanzasyonu yapılıyorsa DC gerilim kaynağının değeri oldukça küçük seçilmektedir. Hatta eklenen gerilimin hem genliğinin hemde faz açısının kontrol edilmesi gerekir. SSSC'nin reaktif güç kompanzatorü olarak çalışması yalnızca gerilimin genlik ayarı ile gerçekleştirilir. Çünkü gerilim hat akımına dik olarak eklenmektedir. Bu durumda gerilim hat akımından 90° ileri veya geri fazdadır. SSSC'nin bu özelliği kontrol edilebilen seri kapasitör veya reaktör olarak tanımlanabilir. Bunlardan tek farkı eklenen gerilimin hat akımından bağımsız olması ve bağımsız olarak kontrol edilebilmesidir. SSSC'nin kapasitif olarak çalıştırılması durumunda endüktif hat empedans gerilimi buna bağlı olarak hat akımı ve aktarılan güç

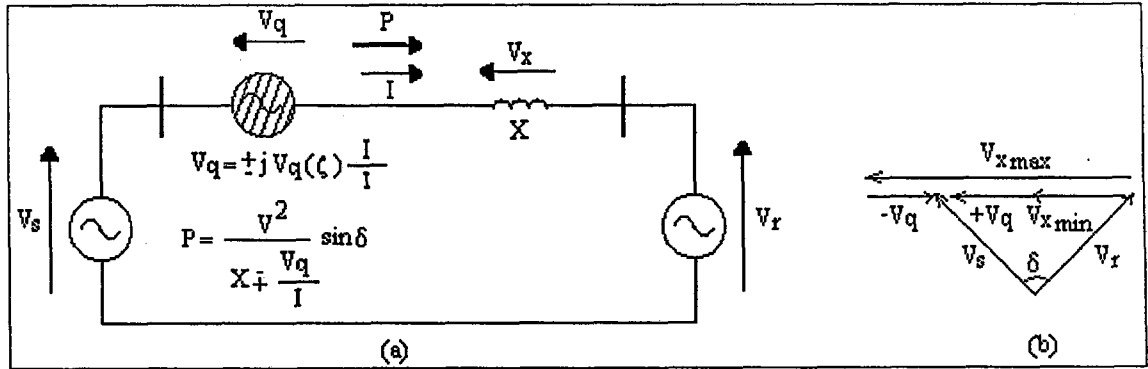
artmaktadır. Eğer AC sistem frekansında hat akımından 90° geride ve büyüklüğü akım büyüklüğünün bir oranı olarak kontrol edilen gerilim sisteme seri olarak eklenirse SSSC kapasitif etki gösterir. Bu durumda çıkış gerilimi

$$V_c = -j k X I \quad (5.19)$$

şeklinde ifade edilir. Burada I hat akımı, X hat reaktansı, k ise seri kompanzasyon derecesini gösteren katsayıdır. Bu durumda $k X = X_c$ olarak yazılabilir. Seri kompanzator değişen hat akımında kompanzasyon gerilimini sabit değerde tutabilmekte veya bu gerilimin genliğini hat akımından bağımsız olarak kontrol edebilmektedir. Kapasitif durumda çıkış gerilimi akımdan 90° geri fazdadır. Akımdan 90° ilerde olması için gerilim polaritesi kontrol sistemi ile değiştirilebilmektedir. Verilen bu özelliklerden yararlanarak sisteme enjekte edilen gerilimin genel ifadesi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$V_q = \pm j V_q(\zeta) \frac{I}{i} \quad (5.20)$$

Burada $V_q(\zeta)$ eklenen gerilimin genliği olup ($0 \leq V_q(\zeta) \leq V_{qmax}$) aralığında değişmektedir. ζ , kontrol için seçilen bir parametre, I kompanzasyonun yapılmadığı durumdaki hat akımı, i ise kompanzasyon durumunda hattan akan akımdır. Verilen (5.20) denkleminde yararlanarak seri kompanzasyon şeması Şekil 5.16'da verilmiştir.



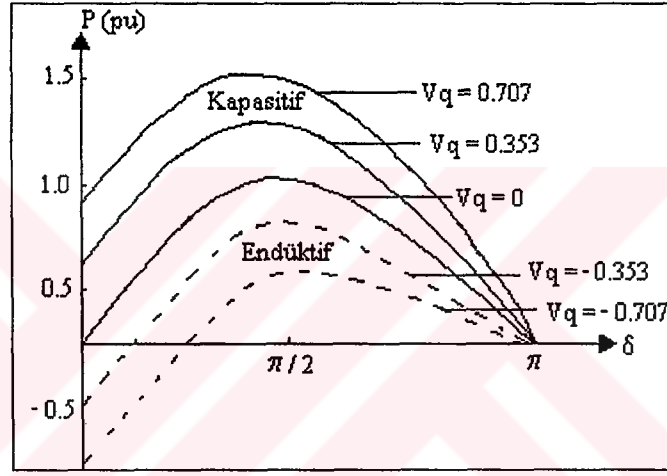
Şekil 5.16 SSSC'li güç sistemi devre şeması (a), gerilimlere ait fazör diyagramı (b)

SSSC'nin endüktif olarak çalışması durumunda endüktif hat empedansı gerilimi azalmakta ($V = V_{xmin}$) ve sisteme hat empedansının artırılması şeklinde etki etmektedir. Kapasitif olarak çalıştırılması durumunda hat empedansı gerilimi artmakta sistem empedansın kompanze edilmesi şeklinde etki göstermektedir. Verilen iki makinalı SSSC ile kompanze

edilen sistemden aktarılan aktif gücün enjekte edilen V_q gerilimi ve faz açısına göre değişiminin yazılması mümkündür.

$$P = \frac{V^2}{X} \sin \delta + \frac{V}{X} V_q \cos \frac{\delta}{2} \quad (5.21)$$

Bu durumda aktif güç pozitif V_q değerlerinde (kapasitif çalışma durumunda) kompanzasyonsuz duruma nazaran oldukça büyük bir oranda artacaktır. Endüktif çalışma durumunda ise aktarılan güç aynı oranda azalmaktadır. Aktarılan gücün farklı V_q değerleri için değişimi Şekil 5.17’de verilmiştir.



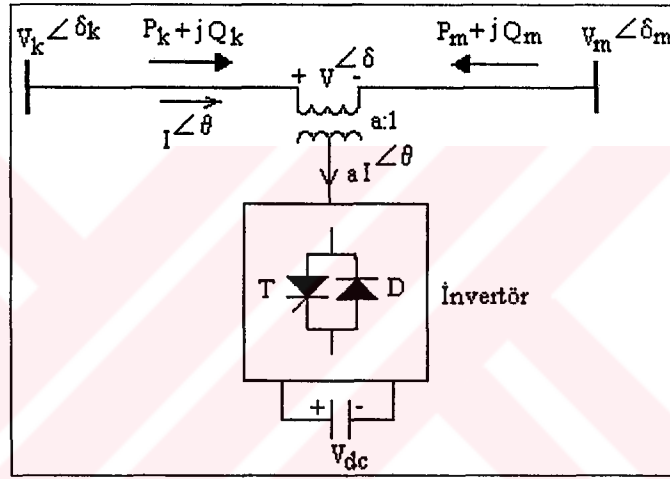
Şekil 5.17 SSSC ile kompanze edilen hattın eklenen gerilime göre aktif güç değişimi

Şekilden görüleceği üzere SSSC'nin kapasitif olarak çalıştırılması durumunda hattın aktarılan güç artmakta, endüktif çalışma durumunda ise azalmaktadır. Gerilim genliğine göre aktarılan gücün değişiminden yararlanarak SSSC'nin aynı güç kapasitesine sahip kontrol edilen seri kapasitöre göre daha geniş bir kontrol aralığına sahip olduğu söylenebilir. Fakat kullanılan yüksek gerilimli transformatör seri kapasitöre göre SSSC maliyetini arttırmakta ve empedansdan dolayı daha fazla güç kaybına neden olmaktadır. (Song ve diğ., 1999)

5.5.1 SSCC sürekli durum analizi ve kontrol tekniği

SSSC ile güç akışı kontrolü, gerilim ve faz açısı kararlılığının artırılması mümkündür. İletim hatlarında endüktif hat empedansı gerilim düşümüne ve güç faktörünün ($\cos\phi$)

azalmasına neden olmaktadır. Bu düşük hat sonu gerilimlerine, hattan aktarılan gücün azalmasına ve ayrıca birden fazla hatların bağlı olduğu sistemlerdeki hatların dengesiz yüklenmesine neden olmaktadır. SSSC ile seri kompanzasyon yapılarak bu problemlerin ortadan kaldırılması mümkündür. Kararlılık açısından SSSC elektromekanik osilasyonların bastırılmasında kullanılmaktadır. Seri kompanzator (SSSC) ile hat akımının doğrudan kontrolü mümkündür. Eklenen gerilim ve hat akımına bağlı olarak üretilen reaktif güç değişmektedir. Sistem yükü arttığında aktarılan reaktif güç artmaktadır. Bu yüzden SSSC ile hat akımının kontrolünde çekilen akımla enjekte edilen seri çıkış gerilimin doğru orantılı olarak değiştirilerek akım kontrolünün yapılması mümkündür. Şekil 5.18’de SSSC’nin iki baralı güç sistemine bağlantı şeması, akım ve gerilimleri verilmiştir.



Şekil 5.18 SSSC'nin güç sistemine bağlantı şeması

Kullanılan invertör üç fazlı yüksek akım ve gerilim kapasitesine sahip güç elektroniği anahtarlarına sahiptir. Sisteme eklenen seri gerilim harmoniklerini azaltmak için birden fazla invertör kullanılmaktadır. Verilen devre için aşağıdaki güç denklemlerinin yazılması mümkündür.

$$V_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{G_c}{C} V_{dc} - \frac{R I^2}{C V_{dc}} \quad (5.22)$$

$$P_k - V_k I \cos(\delta_k - \theta) = 0 \quad (5.23a)$$

$$Q_k - V_k I \sin(\delta_k - \theta) = 0 \quad (5.23b)$$

$$P_m - V_m I \cos(\delta_m - \theta) = 0 \quad (5.23c)$$

$$Q_m - V_m I \sin(\delta_m - \theta) = 0 \quad (5.23d)$$

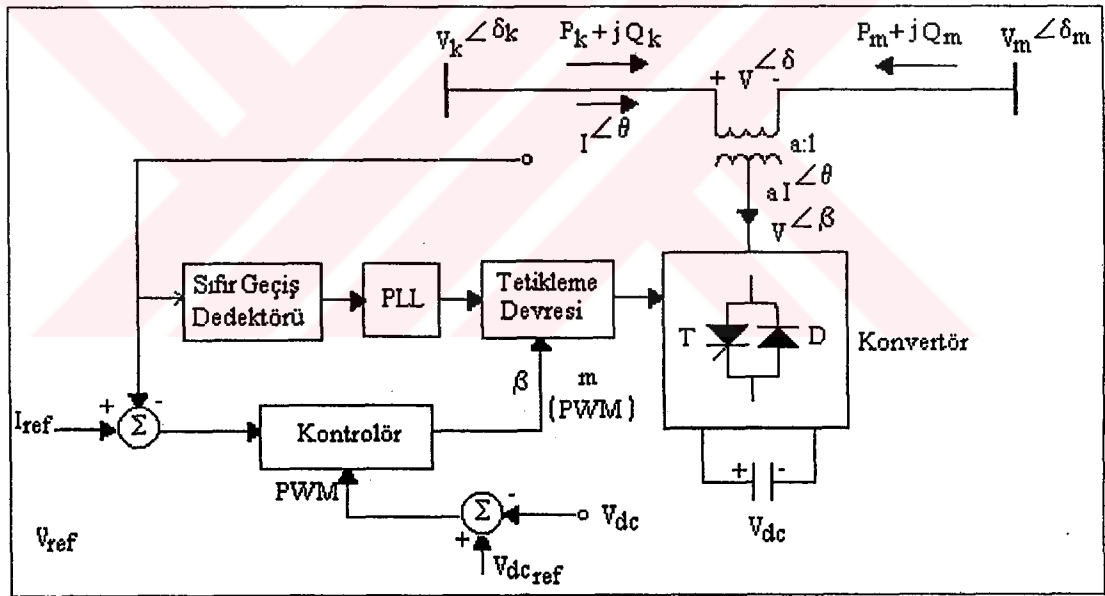
$$P - P_k + P_m = 0 \quad (5.23e)$$

$$Q - Q_k + Q_m = 0 \quad (5.23f)$$

$$P - V^2 G + k V_{dc} V_k G \cos(\delta_k - \beta) + k V_{dc} V B \sin(\delta_k - \beta) = 0 \quad (5.23g)$$

$$Q + V^2_k B - k V_{dc} V B \cos(\delta_k - \beta) + k V_{dc} V G \sin(\delta_k - \beta) = 0 \quad (5.23h)$$

Denklemlerde kullanılan değişkenler Şekil 5.18'de verilmiştir. Transformator empedansı $R+jX$ olup denklemlerde admitans modeli $Y=G+jB$ kullanılmaktadır. Burada k , invertör çıkış gerilimi ve DC gerilim arasında tanımlanan katsayıdır. Buna göre SSSC ile iletim hattı akımının kontrolüne ait devre şeması Şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5.19 SSSC akım kontrolü modeli

Kontrol sistemi ile güç sistemi arasındaki senkronizasyon sıfır geçiş dedektörü ve PLL ile gerçekleştirilir. AC sistem akımının sıfır başlangıç noktası tayin edilerek PLL ile bu noktalara göre tetikleme devresi için giriş sinyali elde edilir. DC gerilim β açısı ile kontrol edilmektedir. (Canizares ve diğ., 1999), (Canizares ve diğ., 1998)

Kullanılan kontrolör PI kontrolör olup doğrudan β açısını kontrol etmektedir. Faz açısının kontrolü ile çekilen veya aktarılan aktif güç kontrol edilmekte buda DC gerilim, buna bağlı

olarak invertör çıkış gerilimi ve eklenen seri gerilim büyüklüğünün kontrolü yapılmaktadır. Kullanılan bu PWM kontrolör modeli için sürekli durum modeli denklemleri kayıpların ihmal edilmesi durumunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I - I_{ref} = 0 \quad (5.24a)$$

$$V_{dc} - V_{dcref} = 0 \quad (5.24b)$$

$$g(x) = 0 \quad (5.24c)$$

Burada $g(x)$, Denklem 5.23 yerine kullanılmakta, x ise verilen değişkenleri ifade etmektedir. Eklenen seri gerilimin genlik ve faz açısının aktarılan aktif ve reaktif güce etkisini daha açık bir şekilde göstermek için iki baralı bir güç sistemine eklenen seri gerilimin sisteme aktardığı aktif ve reaktif güç ifadelerinin türetilmesinde fayda vardır. Şekil 5.16'da verilen devrede $V_q = rV_s e^{j\gamma}$ ile ifade edilerek, r gerilimlerin genliklere bağlı bir katsayı alınması durumunda SSSC görünür gücü aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$S = V_q I^* = r e^{j\gamma} V_s (V_q + V_s - V_r) / jX_s \quad (5.25)$$

Burada X_s kompanzatör empedansı, γ ise eklenen gerilimin faz açısıdır. Elde edilen denklemden yararlanarak aktif ve reaktif güç bileşenleri;

$$P = r b_s V_s V_r \sin(\delta + \gamma) - r b_s V_s^2 \sin\gamma \quad (5.26a)$$

$$Q = -r b_s V_s V_r \cos(\delta + \gamma) + r b_s V_s^2 \cos\gamma + r^2 b_s V_s^2 \quad (5.26b)$$

Burada $rV_s = V_q$ olduğundan eşitlikte yerine yazılarak genliğin ve faz açısının aktif ve reaktif güce etkisi daha açık olarak gösterilebilir.

$$P = b_s V_q V_r \sin(\delta + \gamma) - b_s V_q V_s \sin\gamma \quad (5.27a)$$

$$Q = -b_s V_q V_r \cos(\delta + \gamma) + b_s V_q V_s \cos\gamma + b_s V_q^2 \quad (5.27b)$$

Sonuç olarak elde edilen denklemlerden sisteme enjekte edilen seri gerilim vektörünün polaritesi, genliği ve faz açısının kontrolü ile aktif ve reaktif güç kontrollü olarak sistemden çekilebilmekte veya sisteme aktarılabilir. (Song ve diğ., 1999) Faz açısı γ aktif güç kayıplarını ve DC gerilim seviyesini karşılamak için sürekli durumda AC sistem

geriliminin faz açısından küçük tutularak sistemden aktif güç çekilmektedir. SSSC ile güç sistemlerinin kontrolünde dq kontrol sistemi geniş olarak kullanılmaktadır. Bu kontrol modunun en önemli özelliği değişken sayısının minimuma indirgeyerek daha basit bir kontrol sisteminin oluşturulmasına imkan sağlamasıdır.



BÖLÜM 6

BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ KONTROLÖRÜ (UPFC) VE FAZ KAYDIRICILARI

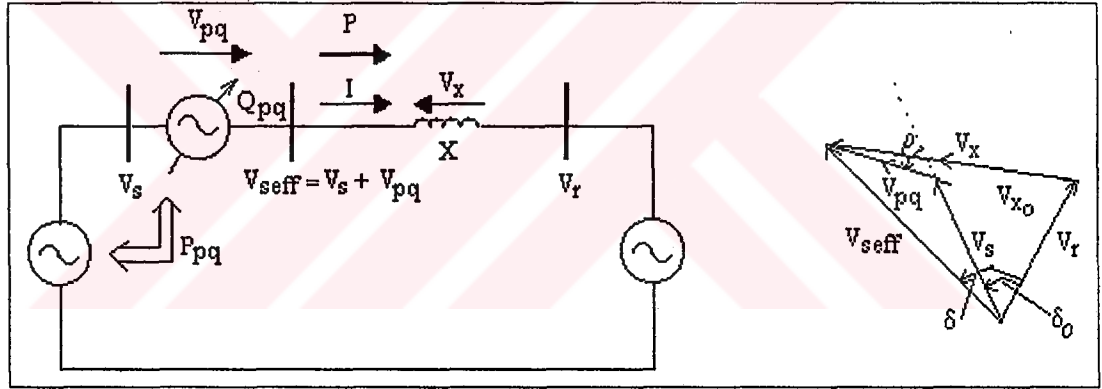
6.1 Birleşik Güç Akış Kontrolörü

AC iletim hatlarında aktarılan güç; hat empedansı, hattın başlangıç ve hat sonu gerilimlerinin büyüklükleri ve bu gerilimler arasındaki faz farkının bir fonksiyonudur. Geleneksel kompanzasyon teknikleri ve gerilim kontrolörleri bu parametreleri değiştirerek aktarılan gücün kontrolü için kullanılır. Sabit veya mekanik anahtarlamalı şönt ve seri reaktif güç kompanzatorları ile hattın empedans karakteristiği değiştirilerek istenen etkin empedans değeri elde edilerek gerekli güç talebi karşılanmaktadır. Bu mekanik kontrol sistemleri uygun sürekli durum çalışma karakteristiği sağlamakta fakat çok hızlı bir kontrol sağlayamamaktadır. Ayrıca sistem dinamiği açısından yetersiz kalmaktadırlar. Enerji politikalarının değişimi, fiyatların yükselmesi, nüfus artışı ve sistem yükünün mevcut kapasitenin üzerinde olması elektronik kontrollü hızlı reaktif güç kompanzatorları ve güç akış kontrolörlerinin geliştirilmesine yol açmıştır.

Bu kompanzator ve kontrolörlerde kapasitör ve reaktörler elektronik olarak anahtarlanmakta ve bunun dışında invertörler kullanılmaktadır. Örnek olarak Senkron Kompanzator DC gerilimin invertör kullanılarak AC gerilime dönüştürülmesi ile sisteme reaktif güç aktarmaktadır. Birleşik güç akış kontrolörü bir FACTS cihazı olup gerilim, faz açısı ve hat empedansı hızlı ve güvenli bir şekilde kontrol edilmektedir. Ayrıca hattan akan aktif ve reaktif gücün birbirinden bağımsız olarak kontrolüne imkan sağlamaktadır. Bu özellik UPFC'yi diğer kontrol sistemlerinden ayıran en üstün özelliklerinden biridir. (Huayuon ve diğ., 2002), (Schauder ve diğ., 1998), (Schauder ve diğ., 1997), (Uzunoviç ve diğ., 1998)

6.2 Birleşik Güç Akışı Kontrolörü Sürekli Durum Analizi

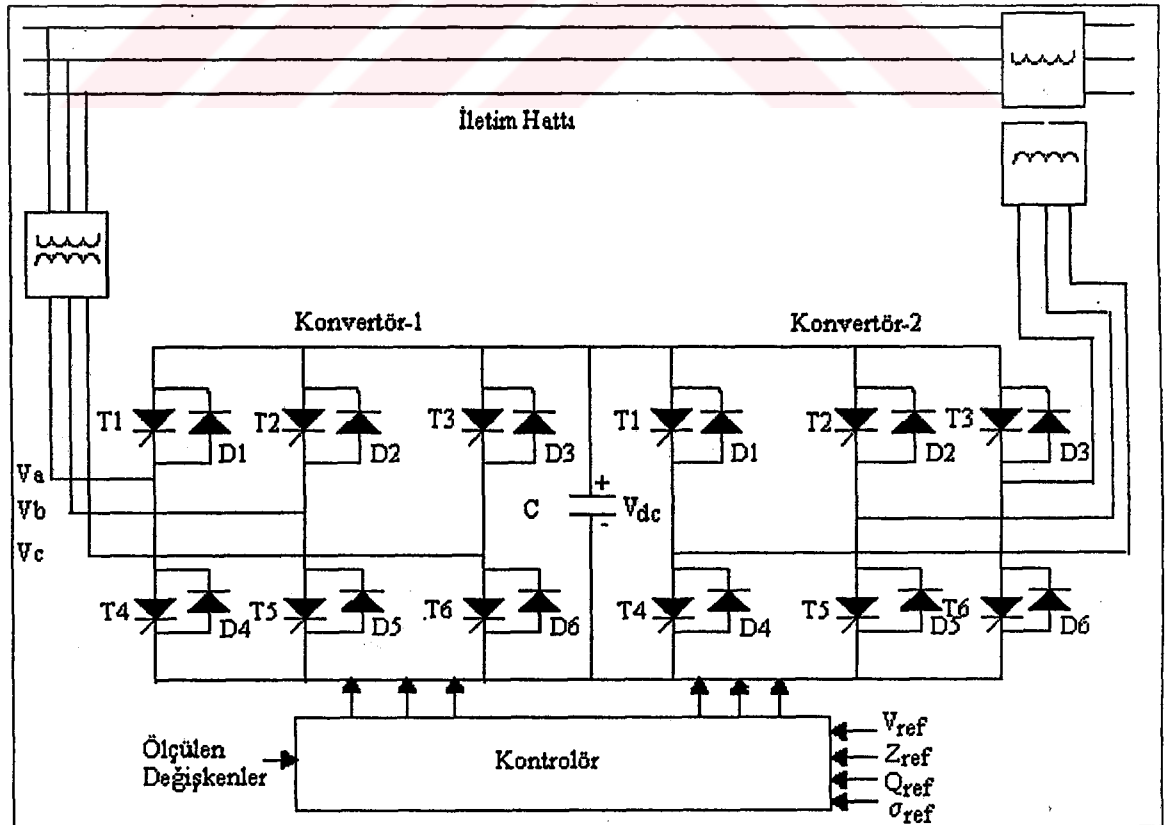
UPFC gerçek zamanlı kontrol ve AC iletim sisteminin dinamik kompanzasyonu için tasarlanmıştır. Verilen bu özelliklere dayanarak UPFC, temel frekansta kontrol edilebilen V_{pq} gerilim büyüklüğü ve ρ faz açısına sahip, iletim hattına seri olarak bağlanan bir senkron gerilim kaynağı (SVS) olarak tanımlanabilir. Bu durumda SVS ile sistemin aktif ve reaktif gücünün değiştirilmesi mümkündür. Daha önceden belirtildiği gibi sistemden reaktif güç çekerek veya sisteme reaktif güç aktararak reaktif gücün kontrol edilmesi mümkündür. Ayrıca hat sonu AC gerilimi ve faz açısı UPFC çıkış gerilimi ile kontrol edilebilmektedir. Hat sonu gerilimi hattın aktif gücü doğrudan etkilediği için UPFC ile gerilim kontrolü yapılarak sistemden akan aktif güç kontrol edilir. Şekil 6.1'de UPFC'nin senkron gerilim kaynağı modeli devre şeması ve sistem gerilimine olan etkisini gösteren fazör diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.1 UPFC'nin seri senkron gerilim kaynağı modeli

Fazör diyagramından görüleceği üzere hattın başlangıç gerilimi V_{seff} , V_{pq} geriliminin kontrolü ile değiştirilebilmektedir. Gerilim büyüklüğünün değişimi hat sonundaki gerilim ile arasındaki (δ) faz farkının değişmesine neden olmaktadır. Genel olarak UPFC (Unified Power Flow Controller) GTO yarı iletken güç elektroniği elemanlarının kullanıldığı iki konvertörden oluşmaktadır. Her iki konvertör birbirinden bağımsız olarak bağlı olduğu AC sistemden reaktif güç çekmekte veya sisteme reaktif güç enjekte etmektedir. Konvertörler için gerekli DC gerilim bağlı oldukları kapasitör tarafından sağlanmaktadır. İkinci konvertör sisteme ρ faz açılı kontrol edilebilir V_{pq} büyüklüğünde gerilim ekleyerek UPFC'nin temel özelliğini (etkisini) oluşturmaktadır. Sisteme eklenen bu AC gerilim senkron AC gerilim kaynağı gibi etki gösterir. UPFC ve AC sistem arasındaki aktif ve

reaktif gücün değişimine bağlı olarak hat akımı seri transformatörden akmaktadır. UPFC için temel devre şeması Şekil 6.2'de verilmiştir. AC uçtaki reaktif güc değişimi bağlı olduğu konvertör tarafından sağlanır. AC girişteki aktif güc DC hattın güc talebini karşılamak için 1. konvertör tarafından DC güce dönüştürülmektedir. Birinci konvertör, 2. konvertörün güc talebini karşılamak üzere AC sistemden aktif güc çekme veya sisteme güc enjekte etme amacıyla kullanılmaktadır. DC hattın gücü, gerilimin tekrar AC gerilime dönüştürülmesi ile AC güce dönüştürülür. Birinci konvertör ayrıca AC sistemden reaktif güc çekerek veya sisteme reaktif güc aktararak reaktif güc kompanzasyonu yapmaktadır. UPFC çalışma karakteristiğinden anlaşılacağı üzere paralel ve seri reaktif güc kompanzasyonu ile birlikte sisteme seri olarak gerilim enjekte etmesinden dolayı aynı anda faz açısı kontrolüde yapılmaktadır. (Song ve diğ., 1999), (Uzunoviç ve diğ., 1998) UPFC, Statcom ve Statik Senkron Seri Kapasitörün bir DC iletim hattı ile birleştirilmesi sonucu elde edilmektedir. Statik Senkron Seri Kapasitör sisteme seri bağlandığından sistem akımının kontrolüne imkan sağlar. Bu nedenle kontrol sistemlerinde seri bağlı bölüm için PI akım kontrolör modeli kullanılmaktadır. UPFC sürekli durum denklemleri Statcom ve SSSC denklemlerine kontrol denklemleri eklenerek elde edilir. UPFC temel devre şeması Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2 UPFC temel devre şeması

Gerilim regülasyonu kontrol edilebilen bir gerilimin sisteme seri olarak enjekte edilmesi ile gerçekleştirilir. UPFC çok fonksiyonlu bir FACTS cihazıdır. UPFC ile kontrol Şekil 6.1'de verilen iki makineli sistem için aktif ve reaktif gücün faz açısına göre değişimi incelenerek daha iyi şekilde açıklanabilir. Hat sonu aktif ve reaktif gücü aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$P-jQ_r=V_r \left(\frac{V_s + V_{pq} - V_r}{jX} \right)^* \quad (6.1)$$

Eğer $V_{pq}=0$ ise verilen denklem kompanzasyonsuz sistemi ifade etmektedir.

$$P-jQ_r=V_r \left(\frac{V_s - V_r}{jX} \right)^* \quad (6.2)$$

V_{pq} geriliminin sıfırdan farklı olduğu durumlar için toplam aktif ve reaktif güç aşağıdaki formda yazılabilir.

$$P-jQ_r=V_r \left(\frac{V_s - V_r}{jX} \right)^* + \frac{V_r V_{pq}^*}{-jX} \quad (6.3)$$

$$V_s=V e^{j\delta/2}=V (\cos\delta/2+j \sin\delta/2) \quad (6.4)$$

$$V_r=V e^{-j\delta/2}=V (\cos\delta/2-j \sin\delta/2) \quad (6.5)$$

$$V_{pq}=V e^{j(\rho+\delta/2)}=V_{pq}[\cos(\rho+\delta/2)+j\sin(\rho+\delta/2)] \quad (6.6)$$

Bu durumda aktif ve reaktif gücün faz açısına göre değişimi;

$$P(\delta,\rho)=P_o(\delta)+P_{pq}(\rho) = \frac{V^2}{X} \sin\delta - \frac{VV_{pq}}{X} \cos(\rho+\delta/2) \quad (6.7)$$

$$Q_r(\delta,\rho)=Q_{or}(\delta)+Q_{pq}(\rho) = \frac{V^2}{X} (1-\cos\delta) - \frac{VV_{pq}}{X} \sin(\rho+\delta/2) \quad (6.8)$$

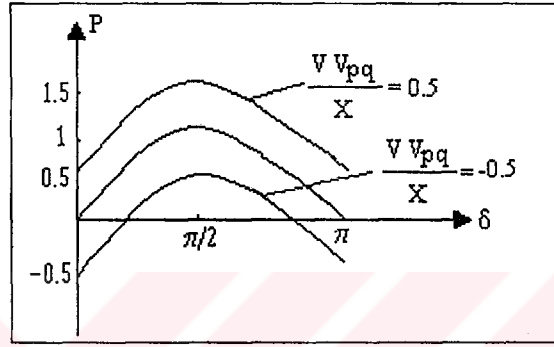
Burada $P_o(\delta)$ ve $Q_{or}(\delta)$ kompanzasyonsuz sistemin verilen δ açısında aktif ve reaktif gücünü göstermektedir. Herbir δ faz açısı için ρ açısı 0 ile 2π arasında değişmektedir.

Bundan dolayı $P_{pq}(\rho)$ ve $Q_{pq}(\rho)$ güçleri δ açısından bağımsız olarak $-VV_{pq}/X$ ile VV_{pq}/X aralığında kontrol edilmektedir. Aktif ve reaktif gücün kontrol aralıkları;

$$P_o(\delta) - VV_{pq}/X \leq P_o(\delta) \leq P_o(\delta) + VV_{pq}/X \quad (6.9)$$

$$Q_{or}(\delta) - VV_{pq}/X \leq Q_{or}(\delta) \leq Q_{or}(\delta) + VV_{pq}/X \quad (6.10)$$

şeklinde yazılabilir. Kayma açısının sıfır olması durumu için $VV_{pq}/X = \pm 0.5$ durumunda sistemin aktif gücünün δ faz açısına bağlı olarak değişimi Şekil 6.3'de verilmiştir



Şekil 6.3 UPFC ile kontrol edilen AC sistem aktif gücünün faz açısına göre değişimi

Sisteme enjekte edilen V_{pq} geriliminin değiştirilmesi ile sistemden aktarılan gücün %100 oranında değiştirilmesi mümkündür. (Song ve diğ., 1999)

Verilen ifadelerden yararlanarak UPFC gerçek zamanda sistem çalışma durumlarına göre ve yük talebine uygun aktif ve reaktif gücün, sisteme enjekte edilen gerilimin büyüklüğü ve açısı değiştirilerek kontrol edildiğini söylemek mümkündür. Akımın reaktif bileşeni ve buna karşı gelen reaktif güç iletim hattının herhangi bir noktasına enjekte edilen gerilimin uygun seçimi ile kontrol edilebilmektedir. Hat sonundaki reaktif güç talebi, hat geriliminin değişimine ve sürekli durumda sistemde kayıplara neden olduğundan sistem kontrolü açısından büyük öneme sahiptir.

6.3 UPFC ile Kontrol ve UPFC Dinamik Performansı

Uygun elektronik kontrol elemanları ile UPFC istenen büyüklüğe ve faz açısına sahip seri gerilimi çok hızlı bir şekilde kontrol edebilme özelliğine sahiptir. Geniş bir alanda aktif ve reaktif güç kontrolünün yanı sıra uygun çalışma noktaları arasında geçiş hızı yüksektir. Üç

fazlı sistemlerde değişkenler toplamının sıfır olmasından dolayı fazör yerine vektör terimi kullanılmaktadır. Güç kontrolü için verilen vektörlerin koordinat sisteminde p ve q eksenleri ile gösterimi daha faydalı olacaktır. Bu durumda p eksenı gerilim vektörü V ile çakışmaktadır. Bu koordinat sisteminde p eksenı akım bileşeni i_p , aktif güç bileşeni ile ve q eksenı akım bileşeni i_q ise reaktif güç bileşeni ile belirlenir. Dengeli sürekli çalışma durumunda gerilim ve akımın, p ve q eksenindeki bileşenleri sabit büyüklüktedir. Bu vektörel gösterim aktif ve reaktif akımların kontrolü için oldukça uygundur.

Konvertör kontrolörleri sisteme seri enjekte edilen gerilimi üretmek ve paralel koldan sistem için gerekli olan reaktif akımı çekmek amacıyla konvertörleri uygun şekilde çalıştırmaktadır. Bu kontrol ile konvertörler için uygun tetikleme sinyalleri belirlenir ve konvertör çıkış gerilimi referans gerilime bağlı olarak kontrol edilir. Sisteme paralel olarak bağlanan konvertör, çekilen aktif ve reaktif güç bileşenlerinin bağımsız olarak kontrolü için akım geri beslemeli kapalı döngü kontrolü altında çalıştırılmaktadır. Paralel bağlı koldan çekilen reaktif güç, kontrolde giriş sinyaline uygun şekilde cevap vermektedir. Bu koldan çekilen aktif güç DC hat için gerekli olan gerilimi karşılamak üzere ayrı bir döngü ile kontrol edilir. Bu aktif güç kontrol döngüsü iki konvertör arasında gerekli olan aktif güç dengesinden yararlanarak belirlenir. UPFC konvertörleri arasında herhangi bir reaktif güç akışı mevcut değildir. UPFC çalışma modu ile tanımlanan fonksiyonel çalışma kontrolü V_{pqref} ve i_{pqref} referans sinyallerine uygun seri ve paralel kompanzasyon için kullanılır. Fonksiyonel (etkili) çalışma modları ve kompanzasyon talepleri harici referans girişler tarafından belirlenir ve otomatik kontrol sistemi veya başka bir kontrol yoluyla özel çalışma durumu gerçekleştirilerek girilen dahili ve harici referans sinyallerine uygun olarak çalıştırılır. Herhangi bir kısıtlamaya sahip olmayan seri gerilimin aktarılması ve reaktif gücün DC bir hat ile birbirine bağlanmış iki konvertör ile kontrolü UPFC'nin birbirinden bağımsız olarak iki ayrı kontrol modun da çalışması ile gerçekleştirilmektedir.

6.3.1 Paralel konvertör kontrolü

Paralel konvertör sistemden paralel olarak çekilen akımın kontrolü için çalıştırılmaktadır. Çekilen bu akımın aktif bileşeni i_p iki konvertör arasında gerekli olan aktif güç dengesi (eşitliği) ile saptanır. Akımın reaktif bileşeni i_q ise istenilen endüktif veya kapasitif çalışma durumu için kullanılır. Paralel konvertörün reaktif güç kompanzasyonu kontrol modu Statik VAr kompanzatör kontrolü ile benzerdir. Reaktif güç kontrol modunda referans giriş

endüktif veya kapasitif VAR girişidir. Paralel konvertör kontrolünde, reaktif güç referansına uygun akım değeri belirlenerek bu akım için konvertör anahtarlarının tetikleme sinyalleri saptanır. Kapalı döngülü bu kontrolde paralel konvertör çıkış akımını belirlemek üzere akım geri besleme sinyali (döngüsü) kullanılır. Ayrıca bu geri besleme sinyali gerekli olan DC hat gerilimini saptamak içinde kullanılmaktadır. Gerilim kontrolü modunda ise konvertör reaktif akımı iletim hattı geriliminin referans gerilime eşit veya yakın bir değerinde kontrolü için regüle edilmektedir. Bu kontrolde ise gerilim geri besleme sinyali kullanılmaktadır.

6.3.2 Seri konvertör kontrolü

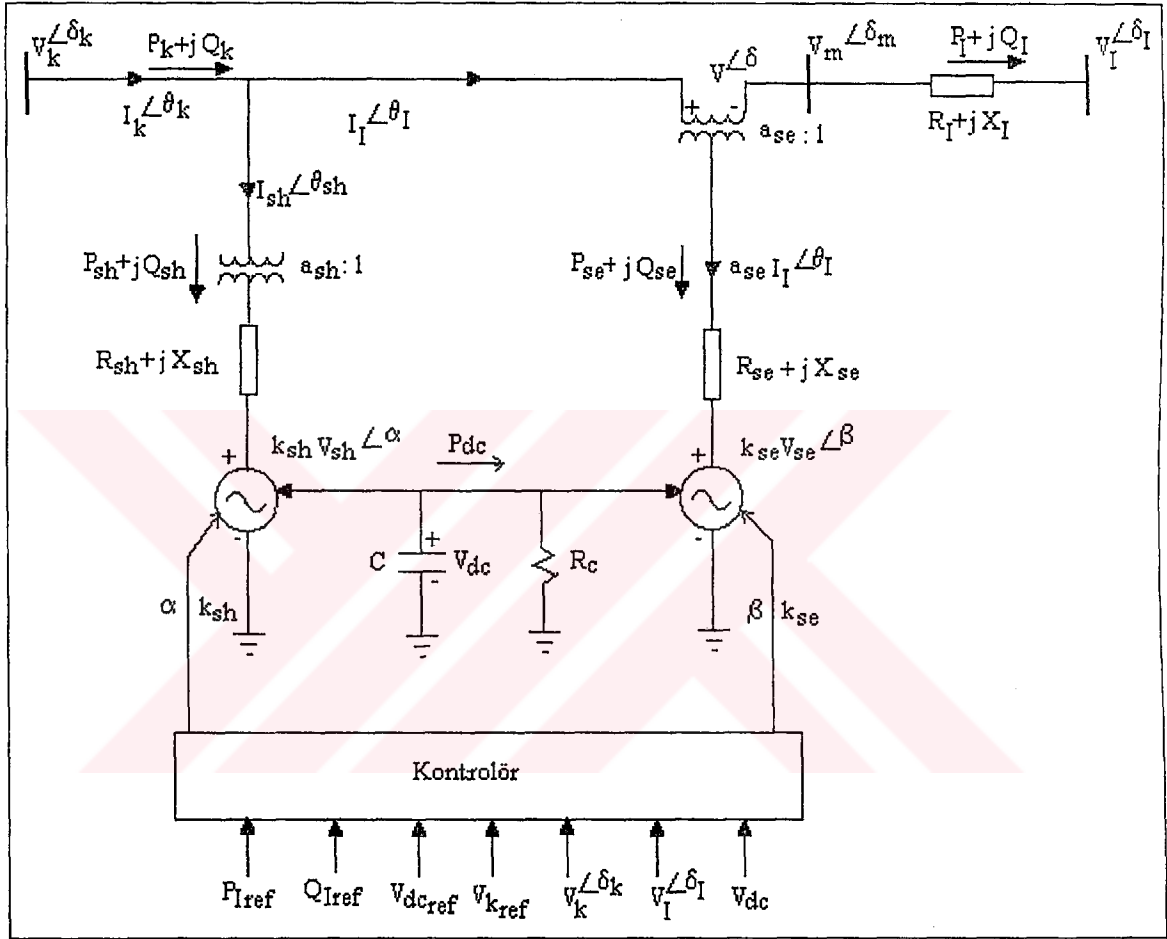
Seri konvertör, sisteme seri olarak ilave edilen V_{pq} geriliminin büyüklüğü ve faz açısını kontrol etmektedir. Bu gerilim ilavesi hattaki güç akışını değiştirmek üzere direk veya dolaylı olarak tasarlanır. Direk gerilim enjeksiyonu modunda seri konvertör referans girişler için gerekli olan V_{pq} gerilim vektörünü oluşturmaktadır. Doğrudan gerilim enjeksiyonunun özel durumlarından birisi eklenen gerilimin hat akımına dik olması ile seri reaktif güç kompanzasyonun sağlanmasıdır.

Hat empedansı kontrol modunda eklenen gerilim vektörü büyüklüğü hat akımı büyüklüğüne bağlı olarak kontrol edilmektedir. Bu durumda akıma göre gerilimdeki değişiklik sisteme seri reaktif empedans eklenmesi olarak etki etmektedir. Gerekli olan empedans genelde rezistif ve reaktif bileşenli olup referans girişe göre belirlenir.

Faz açısı kaydırma modunda eklenen gerilim vektörü V_{pq} , girişteki bara gerilimi vektörüne göre çıkıştaki bara gerilimi V_m 'nin referans açısına uygun şekilde kaydırılması ile kontrol edilmektedir.

Güç akış kontrolü modunda V_{pq} geriliminin büyüklüğü ve faz açısı hat akımı vektörünün kontrolü için ayarlanmaktadır. Böylece hatta istenilen aktif ve reaktif güç aktarılmış olur. Bu çalışma modunda enjekte edilen seri gerilim kapalı döngülü kontrol sistemi ile otomatik olarak kontrol edilir. Bu durumda UPFC'li iletim hattı yüksek empedanslı güç kaynağı olarak alınabilir. Ayrıca bu çalışma modu güç osilasyonlarının bastırılmasında da kullanılabilir. (Canizares ve diğ., 1999), (Song ve diğ., 1999)

UPFC'ye ait güç akış denklemleri ve gerilim, faz açısı, akım kontrolör modelleri; Statcom, Statik Senkron Seri Kapasitör denklemleri ve kontrolör modellerinden oluşur. Bunlara ek olarak yeni kontrol sistemi denklemleri ve değişkenleri eklenmektedir. Denklemlerin elde edilebilmesi için UPFC devre modelinin açık olarak oluşturulması gerekir. Şekil 6.4'de UPFC'nin sisteme bağlantı şeması ve eşdeğer devre modeli verilmiştir.



Şekil 6.4 UPFC için sürekli durum modeli devre şeması

Burada k_{sh} ve k_{se} sabitleri DC gerilim ve referans DC gerilim arasında tanımlanan katsayılardır. R_c direnci güç eşitliklerine sistem kayıplarını dahil etmek için kullanılır. Verilen devre için güç akış denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$V_{dc} = \frac{V_k I_{sh}}{C V_{dc}} \cos(\delta_k - \theta_{sh}) + \frac{V_m I_I}{C V_{dc}} \cos(\theta_m - \theta_I) - \frac{G_c}{C} V_{dc} - \frac{R_{sh}}{C} \frac{I_{sh}^2}{V_{dc}} - \frac{R_{se}}{C} \frac{I_I^2}{V_{dc}}$$

$$P_{sh} - V_k I_{sh} \cos(\delta_k - \theta_{sh}) = 0$$

$$Q_{sh} - V_k I_{sh} \sin(\delta_k - \theta_{sh}) = 0$$

$$P_{sh}-V_k^2 G_{sh}+k_{sh} V_{dc} V_k G_{sh} \cos(\delta_k-\alpha)+k_{sh} V_{dc} V_k B_{sh} \sin(\delta_k-\alpha)=0$$

$$Q_{sh}+V_k^2 B_{sh}-k_{sh} V_{dc} V_k B_{sh} \cos(\delta_k-\alpha)+k_{sh} V_{dc} V_k G_{sh} \sin(\delta_k-\alpha)=0$$

$$P_k-P_{sh}-V_k I_I \cos(\delta_k-\theta_I)=0$$

$$Q_k-Q_{sh}-V_k I_I \sin(\delta_k-\theta_I)=0$$

$$P_I-V_m I_I \cos(\delta_m-\theta_I)=0$$

$$Q_I-V_m I_I \sin(\delta_m-\theta_I)=0$$

$$P_k-P_I-P_{sh}-P_{se}=0$$

$$P_{se}-V^2 G_{se}+k_{se} V_{dc} V G_{se} \cos(\delta-\beta)+k_{se} V_{dc} V B_{se} \sin(\delta-\beta)=0$$

$$Q_{se}+V^2 B_{se}-k_{se} V_{dc} V B_{se} \cos(\delta-\beta)+k_{se} V_{dc} V G_{se} \sin(\delta-\beta)=0$$

$$I_k \cos(\theta_k)-I_{sh} \cos(\theta_{sh})-I_I \cos(\theta_I)=0$$

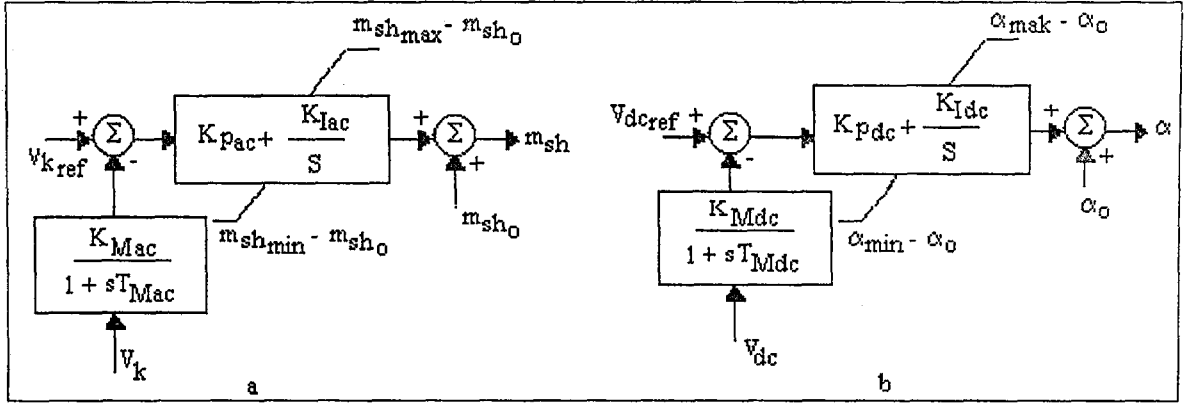
$$I_k \sin(\theta_k)-I_{sh} \sin(\theta_{sh})-I_I \sin(\theta_I)=0$$

$$P_k-V_k I_k \cos(\delta_k-\theta_k)=0$$

$$Q_k-V_k I_k \sin(\delta_k-\theta_k)=0$$

(6.10)

Verilen UPFC güç akış denklemleri; Statcom ve SSSC güç akış denklemleri ile her ikisinin fiziksel olarak birbirine bağlantısından oluşturulan denklemlerden oluşmaktadır. UPFC için paralel kola ait kontrol sistemi diyagramı Şekil 6.5’de verilmiştir. Paralel kontrolör diyagramı Statcom diyagramı ile aynıdır. Seri kontrolör ise invertör aktif ve reaktif güçlerinin birbirinden bağımsız bir şekilde kontrolü için “dq” eksenine dönüştürülmüş bir PQ kontrolördür. Bu kontrolörde her ne kadar akım kontrolü stratejisi kullanılsada “dq” eksenli PQ kontrolör performansı diğer PQ kontrolör performansından daha yüksektir.

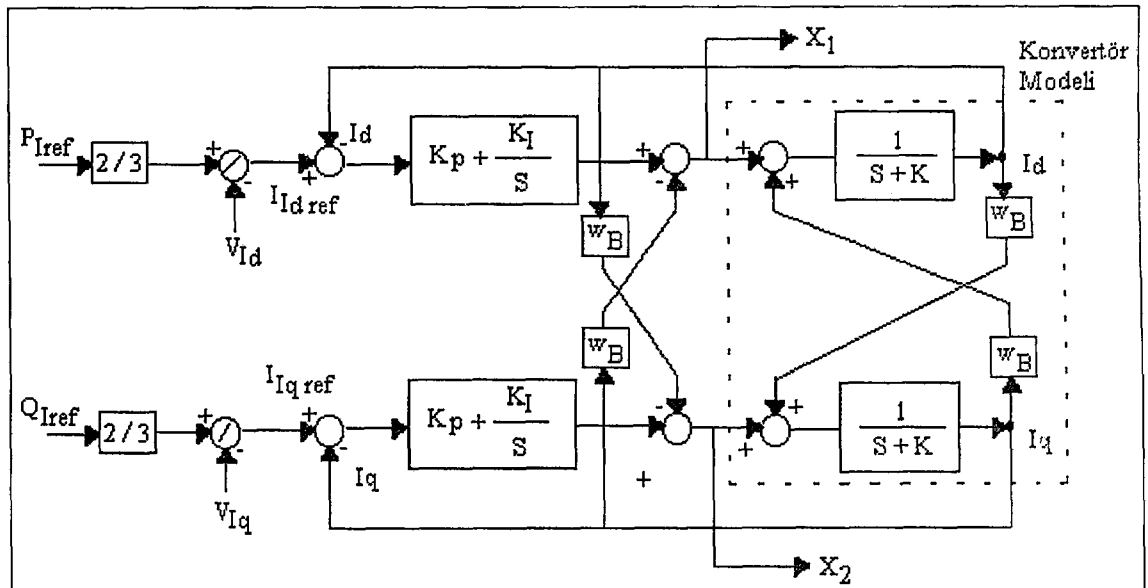


Şekil 6.5 UPFC'ye ait paralel kontrolör blok diyagramları

Verilen blok diyagramından görüleceği üzere paralel kolda kapalı döngülü gerilim geri beslemeli kontrol ile genlik modülasyon katsayısına göre sisteme bağlanılan bara gerilimi kontrol edilir. Gerilim kontrolü için gerekli olan DC gerilim kontrolü ise invertör çıkış gerilimi ile sistem gerilimi (V_k) arasındaki faz farkı (α) ile kontrol edilmektedir. Başlangıç durumunda modülasyon katsayısının değeri

$$m_o = \sqrt{\frac{8}{3}} \frac{V_{ref}}{V_{DCref}} \quad (7.11)$$

ifadesi ile belirlenir. Burada V_{ref} AC sistem, V_{DCref} ise DC sistem için referans gerilimlerdir. Seri konvertör için dq eksenli PQ kontrolör blok diyagramı Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6 UPFC seri konvertörü için kontrolör blok diyagramı

Kontrolör için kullanılan büyüklükler ve katsayılar arasındaki bağıntılar Denklem 6.12’de verilmiştir.

$$K = \frac{R_T W_B}{X_T}$$

$$R_T = R_I + R_{se}$$

$$X_T = X_I + X_{se}$$

$$V_{Id} = \sqrt{2}V_I$$

$$V_{kd} = \sqrt{2}V_k \cos(\delta_i - \delta_k)$$

$$V_{kq} = \sqrt{2}V_k \sin(\delta_i - \delta_k)$$

$$V_{ised} = V_{kd} - V_{Id} \frac{X_T}{W_B} X_1$$

$$V_{iseq} = V_{kq} \frac{X_T}{W_B} X_2$$

$$V_{ise} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_{ised}^2 + V_{iseq}^2}$$

$$m_{se} = \sqrt{\frac{8}{3}} \frac{V_{ise}}{V_{dc}}$$

$$\beta = \delta_I - \tan^{-1} \left(\frac{V_{iseq}}{V_{ised}} \right) \quad (6.12)$$

Verilen denklemlerde d indeksi değişkenlerin dq eksenindeki reel bileşenini, q ise imajiner bileşenini ifade etmektedir. Kullanılan bütün değişkenler Şekil 6.4’de gösterilmiştir. Burada W_B rad/sn cinsinden sistemin temel frekansını göstermektedir. Bütün değişkenler per-unit olarak verilmiştir. Verilen referans büyüklükler ve UPFC’ye ait güç denklemleri

göz önüne alınarak güç denklemlerinin $g(x)$ ile ifade edilmesi ile sürekli durum denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$V_k - V_{ref} = 0 \quad (6.13a)$$

$$V_{dc} - V_{dcref} = 0 \quad (6.13b)$$

$$P_{se} - P_{seref} = 0 \quad (6.13c)$$

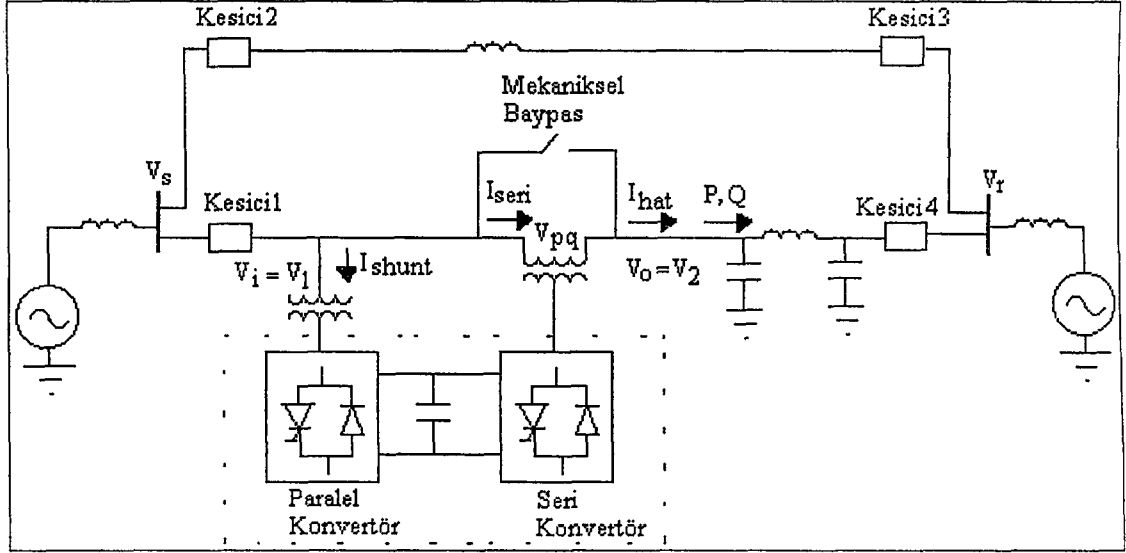
$$Q_{se} - Q_{seref} = 0 \quad (6.13d)$$

$$g(x) = 0 \quad (6.13e)$$

UPFC kompanzatöründe seri ve paralel konvertörler birbirinden bağımsız olarak, paralel konvertör Statcom ve seri konvertör ise SSSC gibi çalışmaktadır. (Canizares ve diğ., 1999), (Pacic ve diğ., 1997) Bu özellik herhangi bir beklenmedik olaylarda örneğin konvertörlerden birinin arızalanması durumunda diğerinin normal olarak çalışmasına olanak sağlamaktadır. Bu durumda konvertörler sistemden aktif güç çekme veya sisteme aktif güç aktarma özelliğine sahip olmadığından dolayı çalışma yalnızca reaktif güç akışı olacak şekilde gerçekleşir. Sisteme enjekte edilen seri gerilimin hat akımına dik olması gerektiğinden güç akış kontrolörü için yalnızca kontrol edilen reaktif gerilim kompanzasyonu veya reaktif empedans ayarının yapılması mümkündür. Daha önceden de belirtildiği gibi UPFC birden fazla çalışma modlu kontrol sistemine sahiptir. Bunlardan yalnızca otomatik güç akış kontrolü modunda hattan akan aktif ve reaktif güç birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmektedir.

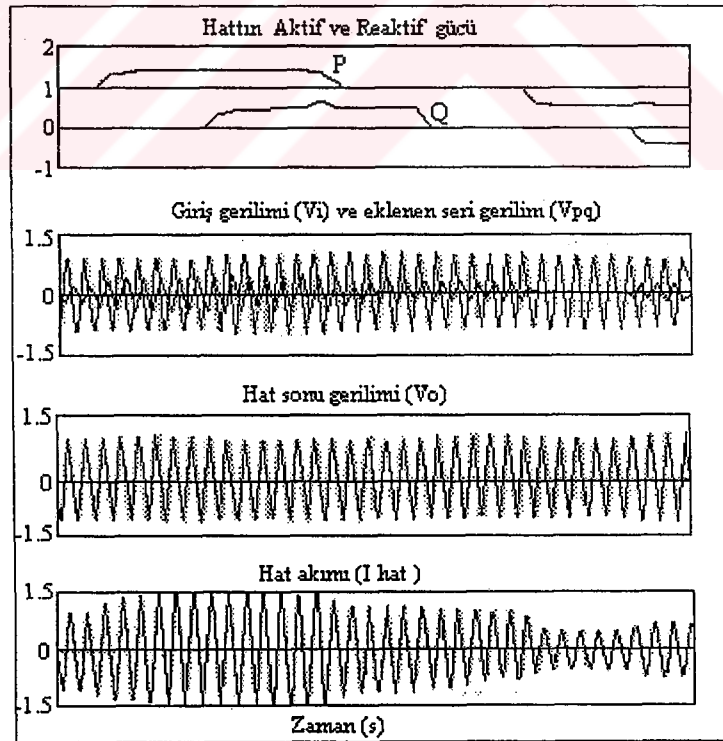
6.3.3 UPFC dinamik performansı

UPFC dinamik performansı akım ve gerilimin gerçek zamanlı dalga formları ile gösterilir. Basit iki baralı bir sistemde hat başına ve hat sonuna birer generatör yerleştirilerek paralel iki iletim hattı kullanılmıştır. Bu hatlardan biri UPFC ile kontrol edilmektedir. UPFC konvertörleri 48 darbeli (sekiz invertör) konvertör sisteminden oluşturulmuş ve bu yapı gerçek iletim hatlarında da kullanılmaktadır. UPFC performansı güç sisteminde oluşan osilasyonlarının bastırılması ve iletim hattı arızalarında güç akışının kontrolü için gösterilmektedir.



Şekil 6.7 UPFC'li basitleştirilmiş güç sistemi devre şeması

Bu kontrolde aktif ve reaktif güç verilen referans değerlerde tutulmaktadır. Şekil 6.8'de UPFC ile hat akımı, aktif ve reaktif güç ve hat sonu geriliminin değişimleri verilmiştir. Hatta enjekte edilen seri $V_{pq}(t)$ gerilimi çıkış geriliminin değişimi ve akımın dalga formları UPFC çalışmasını açık olarak göstermektedir.



Şekil 6.8 UPFC ile kontrol edilen hattın giriş, çıkış gerilimleri ve akımının değişimi

UPFC kontrolünde genellikle sinüzoidal PWM invertörler kullanılır. Bu kontrolde invertör sayısı arttıkça harmonikler azalmakta ve devre kayıpları minimuma indirgenmektedir. Eğer invertör SPWM (sinüzoidal) kontrolü altında çalıştırılırsa sistemdeki DC ve AC gerilimlerin temel bileşenleri arasında

$$V_{sh} = K(m_{a1}) V_{DC} \quad (6.14)$$

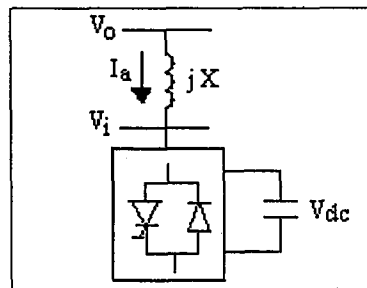
bağıntısı elde edilir. Burada m_{a1} invertörün genlik modülasyon oranıdır. $K(m_{a1})$ modülasyon katsayısına bağlı katsayıdır. Modülasyon katsayısı birden küçük olup $K(m_{a1}) = 0.612 m_{a1}$ bağıntısı ile belirlenir. Bir transformatör ile iletim sistemine bağlı invertörün tek fazı için devre şeması Şekil 6.9'da verilmiştir. Bu durumda AC sistem ile invertör arasındaki güç bağıntısı invertör çıkış gerilimi V_{sh} ve AC sistem gerilimi V_o 'a bağlı olarak

$$S_0 = \frac{V_o V_{sh}}{X} \sin \theta_1 - j \left(\frac{V_o V_{sh}}{X} \cos \theta_1 - \frac{V_o V_{sh}}{X} \right) \quad (6.15)$$

ifade edilir. Burada θ , verilen gerilimler arasındaki faz farkıdır. (Song ve diğ., 1999) Eğer konvertörler SPWM kontrolü ile çalışıyorsa bunların fonksiyonları birbirinden farklı olur. Seri konvertör ile genliği ve faz açısı ayarlanabilen V_{pq} gerilimini hattın başlangıç gerilimine ekleyerek hat sonu gerilimi kontrol edilir. Bu, DC hat geriliminin birinci konvertör ile istenen seviyede tutulması ile sağlanır. Hatta seri olarak eklenen gerilimin ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$V_{pq} = T_2 m_{a2} V_{dc} (\cos \theta_2 + j \sin \theta_2) / 2 \quad (6.16)$$

Burada T_2 seri transformatör dönüşüm oranı, m_{a2} ikinci invertörün modülasyon oranı ve θ_2 ise eklenen gerilim ve hat başı gerilimleri arasındaki faz farkıdır. Bu durumda ikinci invertör ile çıkış gerilimi yalnızca m_{a2} ve θ_2 değiştirilerek kontrol edilebilir.



Şekil 6.9 Paralel konvertörün tek fazı için devre şeması

UPFC paralel konvertörü sistemden aktif güç çekerek veya sisteme aktif güç aktararak DC gerilimin kontrolünün yanısıra konvertör çıkış geriliminin genliğinin ayarı ile paralel kompanzasyonda yapılmaktadır. V_{dc} ve V_{sh} gerilimleri sırasıyla θ_1 ve m_{a1} parametreleri ile kontrol edilmektedir. Fakat V_{sh} gerilimi reaktif gücün yanında aktif güç akışını da etkilemektedir. Buda V_{dc} geriliminin değişimine neden olmaktadır. Bu durumda DC gerilimi sabit değerde tutmak için θ_1 açısı değiştirilir. Yukarıdaki yaklaşımlardan yararlanarak birinci invertör için aşağıdaki çalışma karakteristikleri yazılabilir.

- Aktif güç iki yönlüdür. V_{sh} gerilimi V_o 'dan geri fazda ise sistemden aktif güç çekilir, eğer ileri fazda ise sisteme güç aktarılır.
- θ_1 faz açısının DC gerilimi sabit değerde tutmak için kullanılması durumunda $V_o > V_{sh}$ için sistemden reaktif güç çekilir ve m_{a1} azaltılarak çekilen bu güç kontrol edilir.
- θ_1 faz açısının DC gerilimi sabit değerde tutmak için kullanılması durumunda $V_o < V_{sh}$ için sisteme reaktif güç aktarılır ve m_{a1} artırılarak aktarılan bu güç kontrol edilir.

Bu durumda SPWM kontrollü UPFC ile iletim hattı uç gerilimi, gücü, m_{a1} , θ_1 ve m_{a2} , θ_2 regülasyonu ile kontrol edilebileceği sonucu çıkarılır. Ayrıca reaktif güç herbir kolda aktif güçten bağımsız olarak sistemden çekilmekte veya sisteme aktarılmakta ve bu iki konvertör arasında herhangi bir reaktif güç akışı oluşmamaktadır.

6.4 UPFC Temel Frekans Modeli

UPFC temel frekans modelini oluşturmak için sistemler arası güç dengesi eşitliklerinden yararlanır. Paralel konvertöre AC sistemden akan aktif güç transformator kayıplarının ihmal edildiği temel frekansta dengeli durum için Şekil 6.4'den yararlanarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$P_{sh} = 3 \frac{a_{sh} V_{sh} V_1}{X_{sh}} \sin \alpha \quad (6.17)$$

Burada a_{sh} transformatorün dönüşüm oranı, V_{sh} , V_1 sırasıyla konvertör çıkış gerilimi ve AC sistem gerilimi, X_{sh} ise transformator reaktansıdır. Bu gerilimler

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t + \theta) \quad (6.18a)$$

$$v_{sh} = \sqrt{2}V_{sh} \sin(\omega t + \theta - \alpha) \quad (6.18b)$$

şeklinde gösterilebilir. Eğer $\alpha > 0$ ise $p > 0$ olur ve konvertör gerilimi AC sistem geriliminden geri fazda olduğundan kapasitör şarj olacaktır. Eğer $\alpha < 0$ ise $p < 0$ olur ve konvertör gerilimi AC sistem geriliminden ileri fazda olduğundan kapasitör deşarj olur. Burada V_{sh} invertör çıkış geriliminin etkin değeri olup fourier analizinden

$$V_{sh} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_{sh} V_{dc} \quad (6.19)$$

gerilim ifadesi elde edilir. Burada m_{sh} paralel konvertörün genlik modülasyon oranını, V_{dc} DC iletim hattı geriliminin ortalama değerini göstermektedir. Seri kol için temel frekansta dengeli durumda transformator kayıplarının ihmal edilmesi ile güç ifadesinin aşağıdaki şekilde yazılması mümkündür. Paralel konvertörde olduğu gibi bu ifadeler daha önceden verilen Şekil 6.4 göz önüne alınarak elde edilir.

$$P_{se} = 3a_{se} I_{ac} V_{se} \cos \gamma \quad (6.20)$$

Burada a_{se} seri transformatorün dönüşüm oranı, I_{ac} kontrol edilen hat akımının etkin değeri, V_{se} invertör çıkış geriliminin etkin değeri ve γ akım ile invertör çıkış gerilimi arasındaki faz farkıdır.

$$i_{ac} = \sqrt{2} I_{ac} \sin(\omega t + \phi) \quad (6.21a)$$

$$v_{se} = \sqrt{2} V_{se} \sin(\omega t + \phi + \gamma) \quad (6.21b)$$

Verilen AC çıkış gerilimi etkin değerinin kapasitör gerilimi cinsinden ifadesi

$$V_{se} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_{se} V_{dc} \quad (6.22)$$

Burada m_{se} seri konvertörün genlik modülasyon oranı, V_{dc} DC iletim hattı geriliminin ortalama değerini göstermektedir. Bunun yanısıra enjekte edilen seri gerilimin aşağıdaki şekilde ifade edilmesi mümkündür.

$$V_1 - V_2 = \sqrt{2}V_{12} \sin(\omega t + \varphi) \quad (6.23a)$$

$$V_{se} = \sqrt{2}V_{se} \sin(\omega t + \varphi + \beta) \quad (6.23b)$$

$V_1 - V_2 = V_{dif}$ olarak ifade edilirse, $I_{ac} = V_{dif} / X_{se}$ ve $\gamma = \beta + 90^\circ$ eşitlikleri kullanılarak UPFC seri bileşeni için aşağıdaki güç eşitliği elde edilir.

$$P_{se} = 3 \frac{a_{se} V_{se} V_{dif}}{X_{se}} \cos \beta \quad (6.24)$$

Eğer seri ve paralel konvertör kayıpları kapasitöre paralel bağlı R_{loss} direnci ile ifade edilirse konvertörler arasındaki aktif güç eşitliği

$$P_{sh} = \frac{V_{dc}^2}{R_{loss}} + V_{dc} \left(C \frac{dV_{dc}}{dt} \right) + P_{se} \quad (6.25)$$

elde edilir. Bu eşitlikte büyüklüklerin daha önceden elde edilen ifadeleri yerine yazılması ile DC gerilimin değişimi lineer olmayan diferansiyel denklem ile aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{k a_{sh} m_{sh} V_{ac}}{C X_{sh}} \sin \alpha - \frac{k a_{se} m_{se} I_{ac}}{C} \cos \gamma - \frac{V_{dc}}{R_{loss} C} \quad (6.26)$$

Burada $k = \frac{3}{2\sqrt{2}}$ olup buna alternatif olarak diferansiyel denklem

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{k a_{sh} m_{sh} V_{ac}}{C X_{sh}} \sin \alpha - \frac{k a_{se} m_{se} I_{ac}}{C} \sin \beta - \frac{V_{dc}}{R_{loss} C} \quad (6.27)$$

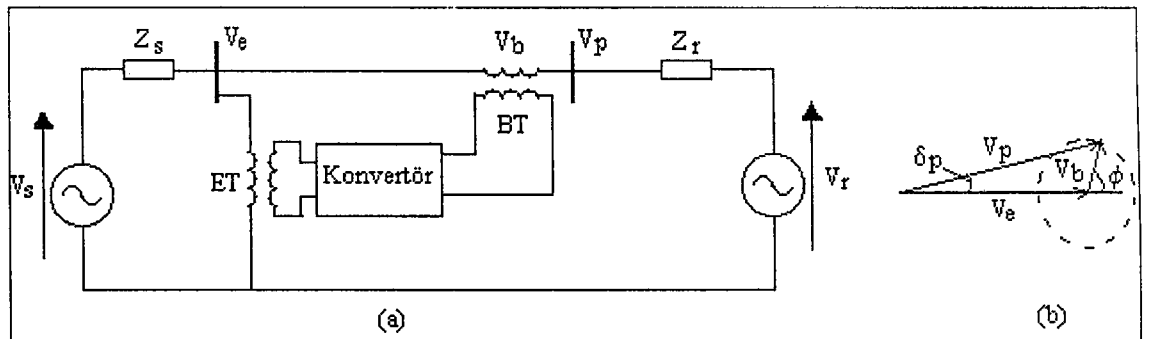
şeklinde yazılabilir. (Uzunoviç ve diğ., 1998) UPFC ile AC sistemlerin kontrolünde konvertör çıkış gerilimleri Denklem 6.19 ve 6.22, DC kapasitör gerilimi ise Denklem 6.26 kullanılarak hesaplanır. Seri bileşen için verilen γ faz açısı hat akımının temel bileşeni izlenerek saptanır. Eğer alternatif 6.27 denklemi kullanılırsa hat akımının izlenmesine gerek yoktur. Hat akımı doğrudan kontrol ediliyorsa Denklem 6.26'nın kullanılması daha avantajlıdır.

6.5 Faz Kaydırıcıları

Elektrikli güç sistemlerinde gerilim veya faz açısı regülasyonu için güç dönüştürmeleri geniş olarak kullanılır. Faz kaydırıcı yüksüz veya yük altındaki güç sistemlerinde gerilim ve/veya faz açısı regülasyonu için bir veya birden fazla güç dönüştürmeleri kullanılarak gerçekleştirilir. Yariletken kontrollü faz kaydırıcılar sürekli durum güç akışı ve gerilim regülasyonunun yanı sıra güç kalitesini artırma, dinamik gerilim kontrolü ve geçici kararlılığın artırılmasında kullanılmaktadır. (Yong ve diğ., 1999) Faz kaydırıcı enerji sistemlerinde iki bara arasına yerleştirilerek birinci transformatör ile sistem gerilimi konvertör vasıtası ile farklı genlikli ve/veya faz açılı konvertör çıkış gerilimi ikinci transformatör ile sisteme aktarılır. Faz kaydırıcı genel olarak aşağıdaki devre elemanlarından oluşmaktadır.

- Uyarıcı Transformatör (ET)
- Ekleme Transformatörü (BT)
- Konvertör devresi

Sisteme seri olarak eklenen gerilimin genlik ve/veya faz açısı konvertör ile kontrol edilmektedir. Şekil 6.10'da faz kaydırıcının güç sistemine bağlantı şeması ve gerilimlere ait fazör diyagramı verilmiştir.

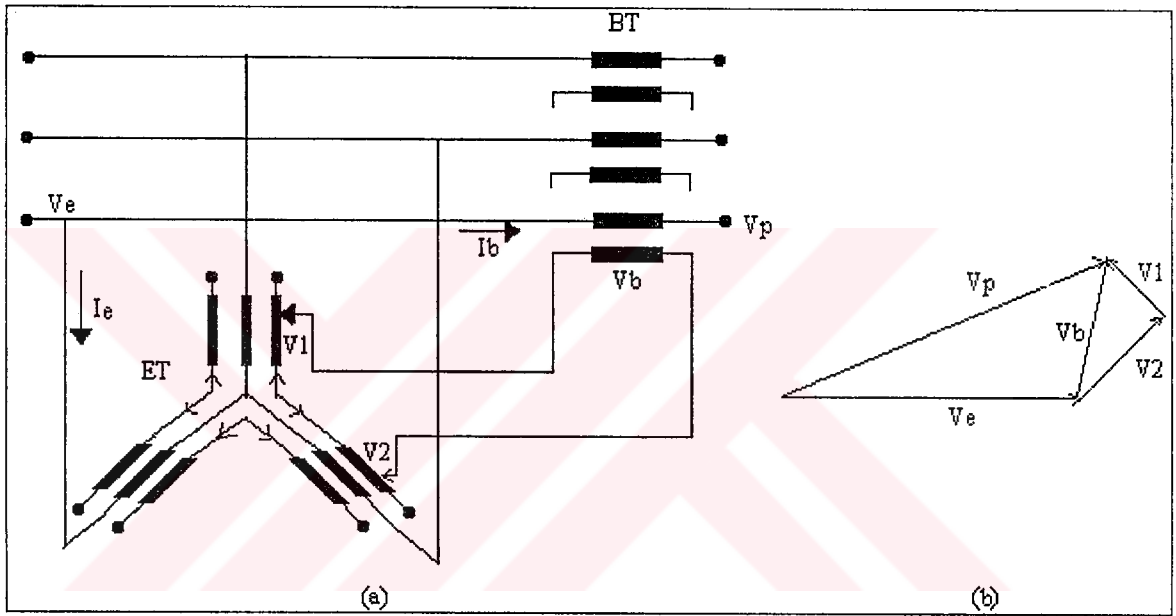


Şekil 6.10 Faz kaydırıcı bağlantı şeması (a), çıkış gerilimi fazör diyagramı (b)

Fazör diyagramında çıkış geriliminin eklenen seri gerilim V_b 'ye göre değişimi verilmiştir. Daire çıkış geriliminin büyüklüğü ve faz açısının eklenen seri gerilim büyüklüğüne ve faz açısına göre değişimini göstermektedir. V_b geriliminin genliği ve/veya faz açısı çıkış gerilimi ve transfer edilen aktif güç kontrolü için kullanılır. Aktarılan aktif güç

$$P=(|V_s||V_r|/X_{er}) \sin(\delta_s-\delta_r \pm \delta_p) \quad (6.28)$$

ifadesi ile belirlenir. Burada X_{er} toplam eşdeğer reaktansı, δ_s ve δ_r ise sırasıyla V_s ve V_r gerilimlerinin faz açılarıdır. Elde edilen (6.28) denkleminde görüldüğü gibi aktarılan güç kontrolü için temel değişken δ_p faz açısıdır. Faz kaydırıcısı ile ayarlanan δ_p faz açısının değişim aralığı konvertör devresinin karakteristiğine bağlıdır. Geleneksel faz kaydırıcılarda faz açısı $\pm 30^\circ$ aralığında değiştirilmektedir. Geleneksel faz kaydırıcı devre şeması ve fazör diyagramı Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.11 Mekanik anahtarlamalı faz kaydırıcı şeması (a), fazör diyagramı (b)

Geleneksel faz kaydırıcılar mekaniksel olarak anahtarlanmakta ve konvertör kullanılmamaktadır. (İbrahim, 1994) V_b geriliminin genlik ve faz açısı mekanik anahtarlar ile ayarlanmaktadır. Mekaniksel anahtarlamalı faz kaydırıcıların dez avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Mekaniksel anahtarlardan dolayı sistem cevabı oldukça yavaştır.
- Çalışma ömrü sınırlı olup periyodik olarak sürekli bakım gerektirmektedir.

Sistem cevabının yavaş olması yalnızca sürekli durum güç akışı ve gerilim regülasyonu için kullanımına neden olmaktadır.

6.5.1 Statik faz kaydırıcı sürekli durum modeli

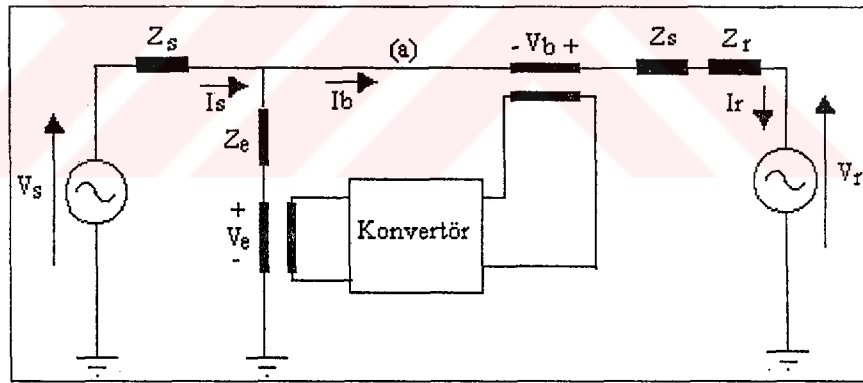
Faz kaydırıcı temel devre şeması Şekil 6.10 ve faz kaydırıcının tek fazı için sürekli durum devre modeli Şekil 6.12'de verilmiştir. Burada Z_e ve Z_b sırasıyla ET ve BT trafolarının empedanslarıdır. V_b gerilimi BT transformatörü ile eklenen seri gerilimdir. İşlemlerin basitliği açısından aşağıdaki varsayımlar yapılmaktadır.

- ET ve BT transformatörleri ideal kabul edilerek Z_b ve Z_e empedansları ihmal edilir.
- Konvertör kayıpları ihmal edilmekte ve reaktif güç sistemle değişmemektedir.

Bu varsayımlardan yararlanarak aşağıdaki gerilim eşitliği yazılabilir.

$$V_b = k V_e e^{j\phi} \quad (6.29)$$

Burada $k = |V_b|/|V_e|$ ve ϕ , V_b ile V_e gerilimleri arasındaki faz farkıdır.



Şekil 6.12 Faz kaydırıcı tek faz devre modeli

Faz kaydırıcı devrede sistemden güç çekmemekte veya sisteme güç aktarmamaktadır.

$$S_e + S_b = 0 \quad (6.30a)$$

$$V_b I_b^* = V_e I_e^* \quad (6.30b)$$

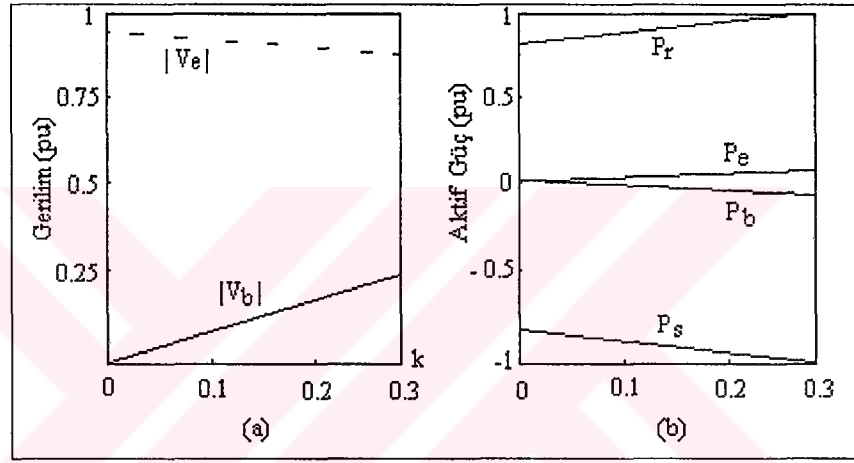
$$Q_b = Q_e \quad (6.30c)$$

$$P_b = P_e \quad (6.30d)$$

Verilen (6.29) ve (6.30) denklemlerinden yararlanarak akımlar arasındaki ilişki

$$I_e = k I_b e^{-j\phi} \quad (6.31)$$

Şeklinde yazılır. Statik faz kaydırıcı ile AC sistem arasında herhangi bir reaktif güç akışı yoktur. Hattın tam ortasına yerleştirilmesi durumunda hattın giriş gerilimi ve hat sonu gerilimi per-unit olarak $|V_s|=|V_r|=1$ ve aralarındaki faz farkının 40° olduğu durum göz önüne alınarak $X_s=X_r=0.4$ pu için gerilim ve aktif gücün k gerilim genlikleri oranına göre değişimi Şekil 6.13’de verilmiştir.



Şekil 6.13 Faz kaydırıcısının gerilim ve aktif güce etkisinin grafiksel olarak değişimi

Sisteme ait gerilim ve akım eşitlikleri

$$I_s = I_b + I_e \quad (6.32a)$$

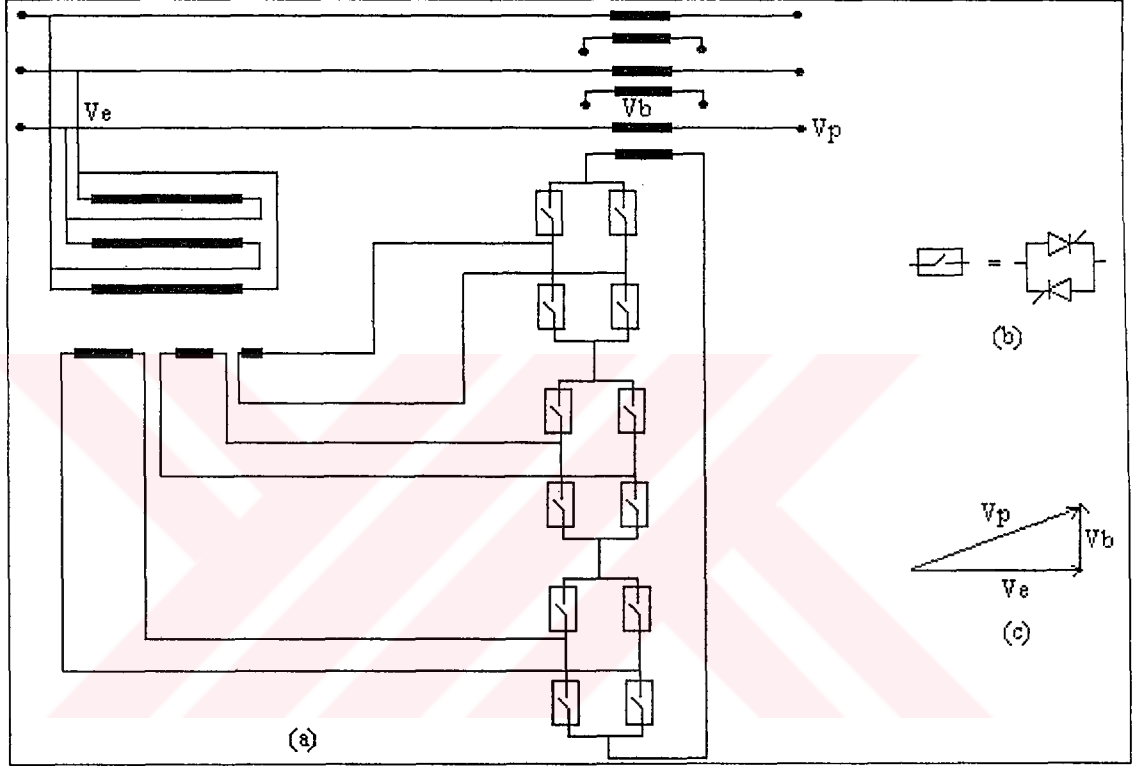
$$I_r = I_b \quad (6.32b)$$

$$V_s - jX_s I_s - V_e = 0 \quad (6.32c)$$

$$V_e + V_b - jX_r I_r - V_r = 0 \quad (6.32d)$$

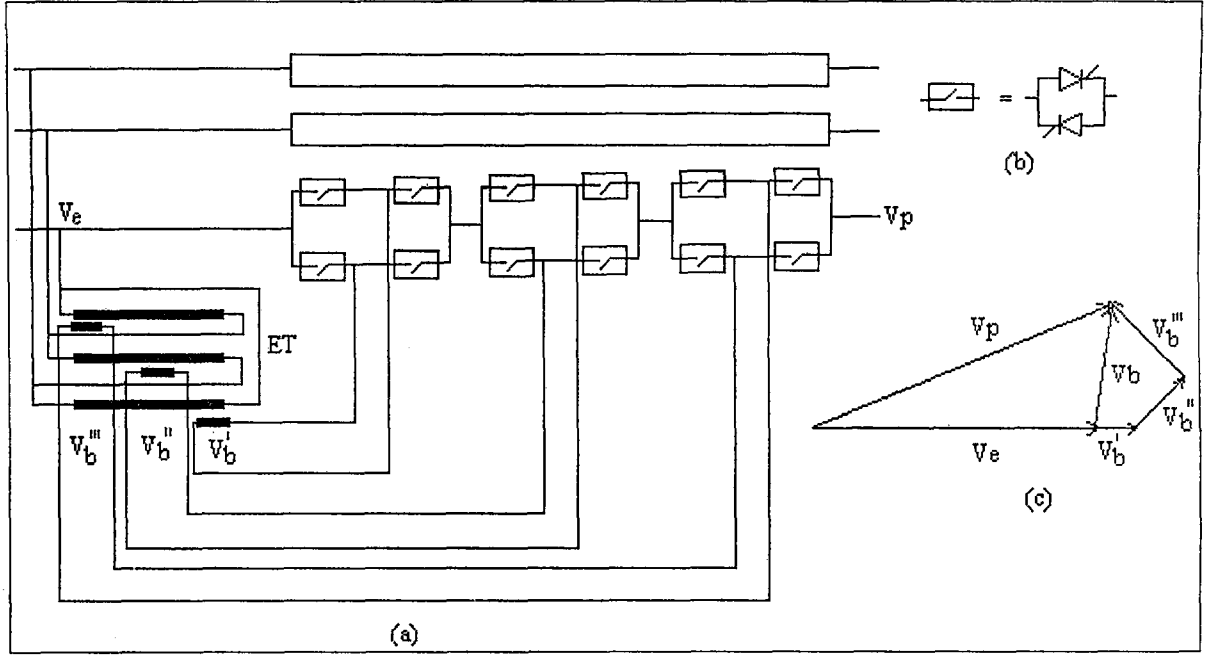
şeklinde yazılır. Şekil 6.13’de verilen gerilim ve aktif güç değişiminden görüleceği üzere k ’nın 0-0.3 aralığında değişiminde eklenen seri gerilim 0-0.26 pu, buna bağlı olarak V_e gerilimi 0.94-0.87 pu aralıklarında değişmektedir. Eklenen gerilim büyüklüğünün artması ile aktarılan aktif güç 0.8 den 1.05’e yükselmektedir. Aktif güçteki bu artış hat sonu reaktif güç talebini arttırmaktadır. Eğer reaktif güç talebi faz kaydırıcı tarafından karşılanmaz ise

hattaki aktif güç transferi arttırılamamaktadır. Şekil 6.14'de çok kademeli, kontrol edilen AC-AC konvertörlü faz kaydırıcısı devre şeması verilmiştir. Seri gerilim sistem gerilimine dik olarak eklenmektedir. ET transformatörünün sekonder sargı sayısı her bir faz için kullanılan köprü devresi sayısına eşittir. Her bir faz için kullanılan sargıların sarım sayıları birbirine eşit veya farklı olabilir. Verilen sistem için sekonder sargıların sarımı oranları $1/3$ 'tür. Bu düzenleme ile $3^N=27$ farklı adımda gerilim seviyesi elde edilmektedir.



Şekil 6.14 Çok kademeli Çıkış gerilimli faz kaydırıcısı devre şeması (a), Tristör anahtarları (b), çıkış gerilimi için fazör diyagramı (c)

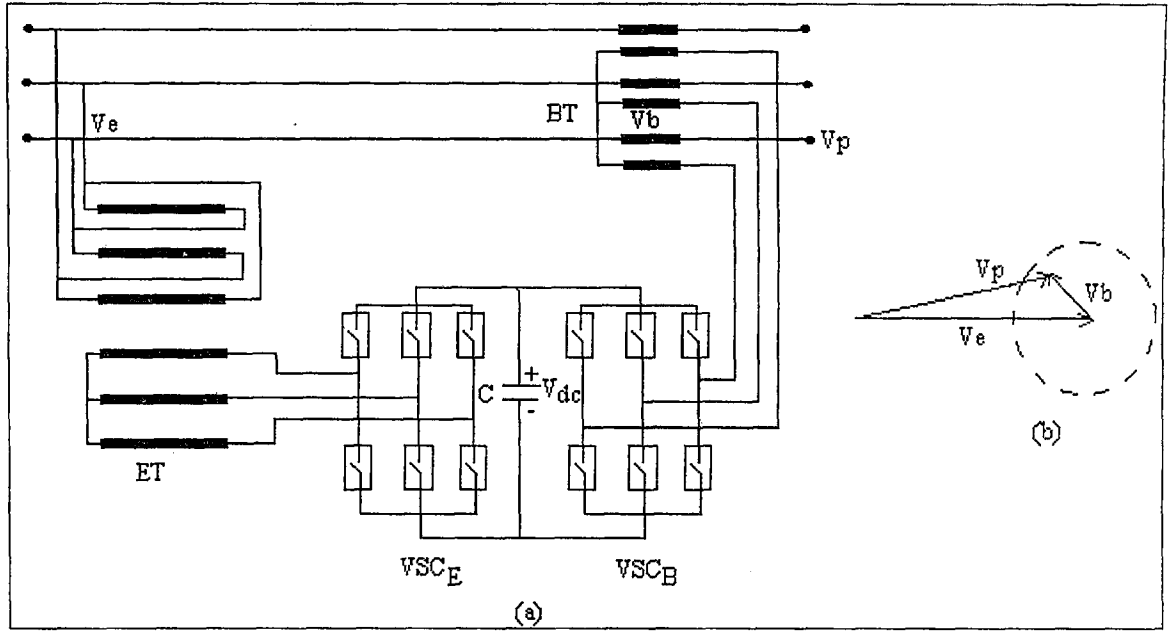
Şekilden görüleceği üzere her bir faz için kullanılan köprü devrelerinin çalıştırılması veya kesimde tutulması ile farklı genlikte sistem geriliminden 90° ileri veya geri fazda çıkış gerilimi elde edilir. Bağlantılar aynı faza ait olduğu için burada faz açısı kontrolü yapılamamaktadır. Transformatör empedansının endüktif ve değerinin çok küçük olması nedeniyle I_e ve I_b akımları aynı fazda olduğundan V_b çıkış gerilimi ile V_e gerilimi arasındaki faz farkı yaklaşık olarak 90° dir. V_e geriliminin polaritesi değiştirilerek ileri veya geri fazda tutulur. Çıkış geriliminin faz açısı kontrolü ET transformatörünün çıkış gerilimi diğer fazlardan alınan gerilimlerin toplamı alınarak yapılmaktadır. Buna ait devre şeması Şekil 6.15'de verilmiştir.



Şekil 6.15 Faz açısı kontrol edilen faz kaydırıcı devre şeması(a), anahtarlama devresi (b), gerilimler için fazör diyagramı (c)

Verilen şekilde AC-AC köprü konvertörleri direk olarak AC sisteme bağlanmıştır. Eklenen seri gerilim üç bileşenden oluşmaktadır. Bu gerilimler ET transformatörlerinden elde edilmektedir. ET transformatörünün primer sargıları hem üçgen hemde yıldız olarak bağlanabilir. Fazör diyagramından görüldüğü gibi V_b geriliminin genlik ve faz açısı farklı adımlarda kontrol edilebilmektedir. (Nyati ve diğ., 1995), (Stevenson ve diğ., 1982)

Hem genlik hem de faz açısı kontrolü için AC-DC-AC PWM konvertörler kullanılmaktadır. İki konvertörden oluşan bu yapıda her ikisinde üç fazlı tam kontrollü konvertör olup biri doğrultucu diğeri ise invertör olarak çalıştırılmaktadır. Herbir konvertör anahtarları birbirine paralel zıt yönlü bağlanmış tristör ve diyottan oluşur. Bu yapıya ait devre şeması Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.16 PWM kontrollü faz kaydırıcı devre şeması (a), Gerilimlere ait fazör diyagramı

İnvertör ile enjekte edilen seri gerilimin genlik ve faz açısı birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmektedir. Doğrultucu ve çıkışına bağlı olan kapasitör ile invertör için gerekli olan DC gerilim sağlanır. Bunun yanısıra doğrultucu ile sistemin reaktif güç kompanzasyonu ve buna bağlı olarak V_e geriliminin büyüklüğü kontrol edilir. Gerilim kaynaklı konvertörlü statik faz kaydırıcı hattın aktif ve reaktif gücünü bağımsız olarak kontrol etmektedir. Ayrıca bu yapı paralel, seri kompanzator ve paralel/seri aktif güç filtresi olarak kullanılabilir. Hat sonu reaktif güç talebine göre sistemden reaktif güç çekilir veya sisteme reaktif güç aktarılır. Statik faz kaydırıcı ile hızlı gerilim enjeksiyonu güç akışının dinamik olarak kontrolünde ve elektromekanik osilasyonların bastırılmasında kullanılabilir. PWM kontrollü faz kaydırıcısının en önemli dezavantajı aşırı akımlara karşı herhangi bir koruyucu düzeneğin bulunmamasıdır. (Baker ve diğ., 1982), (Guth ve diğ., 1982)

BÖLÜM 7

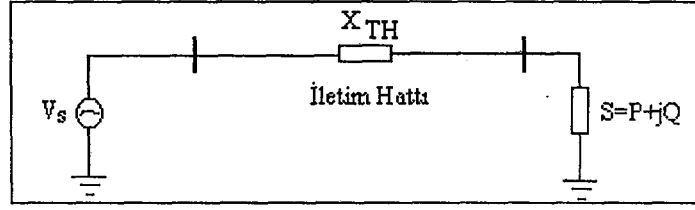
FACTS ELEMANLARI KULLANILAN GÜÇ AKIŞ SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde FACTS cihazlarının farklı enerji sistemi problemlerine uygulaması incelenecektir. Çalışmaların tamamı Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak gerilim ve akım kontrolünün FACTS cihazlarıyla nasıl yapılacağı incelenmiştir. Daha sonra FACTS cihazlarının değişken yüklü enerji sisteminde ki etkisi incelenmiştir. SVC ve TCSC'nin enerji sisteminde güç akışına etkisi başka bir uygulama olarak alınmıştır. Son olarak Statik Kompanzator (Statcom) kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu Matlab kullanılarak incelenmiştir.

7.1 SVC ve TCSC Kullanılarak Enerji İletim Sistemlerinde Gerilim ve Akım Kontrolü

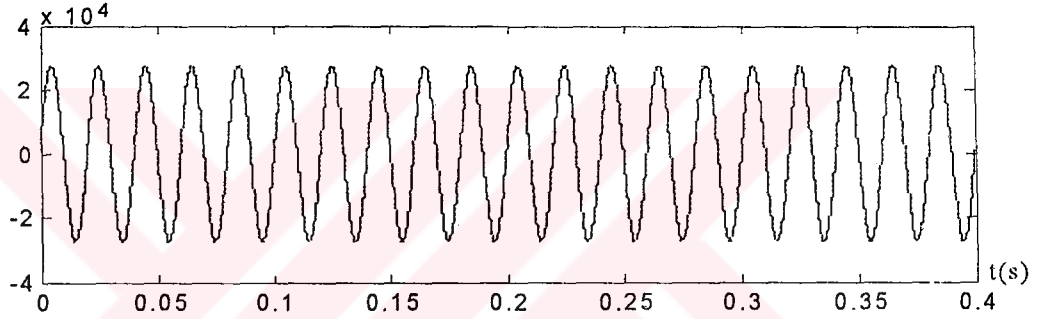
İlk olarak FACTS cihazlarından Statik VAr Kompanzator (SVC) ve Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) gibi paralel ve seri kompanzatorların güç sistemlerinde gerilim ve akım kontrolü ile yük akışına olan etkileri incelenmiştir. Matlab/Simulink programı kullanılarak endüktif yüklü iki baralı bir iletim hattında SVC ile reaktif güç kompanzasyonu yapılarak yük geriliminin ve TCSC ile hat empedansı kompanze edilerek yük akımının kontrolü yapılmıştır.

Gerilim kaynağı ve endüktif yükten oluşan iki baralı bir enerji iletim hattında SVC ve TCSC kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu ve hat empedansının kontrol edilmesiyle yük gerilimi ve akımının kontrolünün simülasyonu Matlab/Simulink programı kullanılarak yapılmıştır. Her iki kontrol için referans ve kontrol edilen sinyaller aynı büyüklükte alınarak PID kontrolör parametreleri birbirine eşit seçilmiştir. Kompanzasyonun yapılmadığı durum için üç fazlı endüktif yüklü güç sisteminin tek faz devre şeması Şekil 7.1'de verilmiştir.

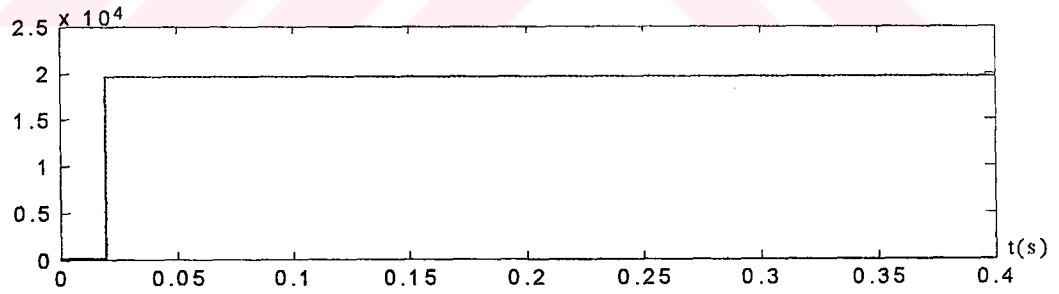


Şekil 7.1 İki baralı iletim hattı tek faz devre şeması

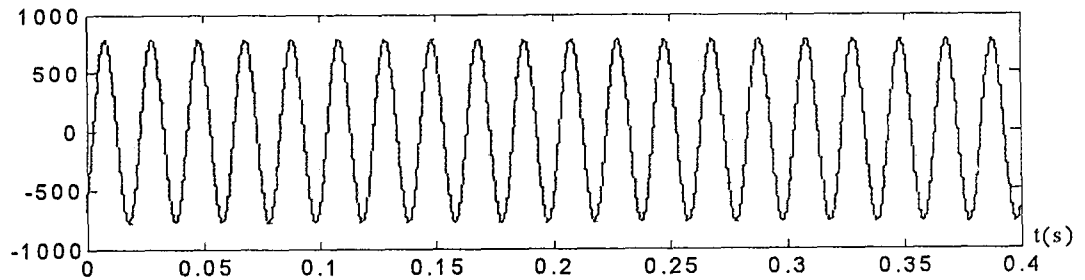
Verilen sistemde hat gerilimi $V_S=34.5$ kV, $P=50$ MW, $Q=30$ MVar olan 70 km'lik dağınık parametrelili hattın empedansı $Z_{TH}=0.8+j19.8 \Omega$ alınarak hat kapasitansı ihmal edilmiştir. Sistemde herhangi bir kontrol yapılmadığı durum için hat sonu gerilimi ve akımı ve bunlardaki toplam harmonik bozulmaların zamana göre değişimi Şekil 7.2'de verilmiştir.



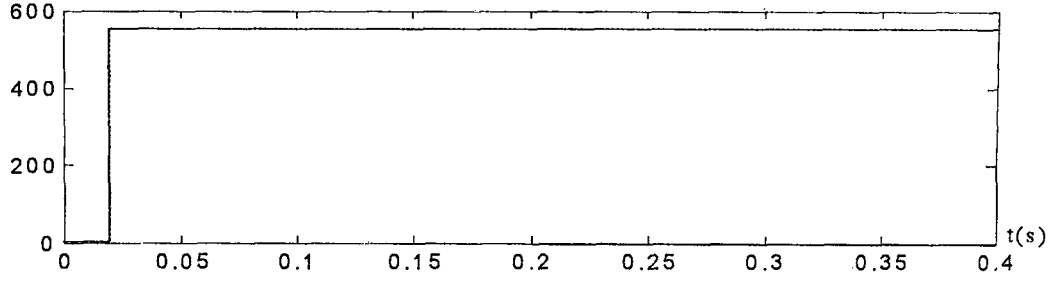
Şekil 7.2-a. Hat sonu (yük) geriliminin değişimi [V]



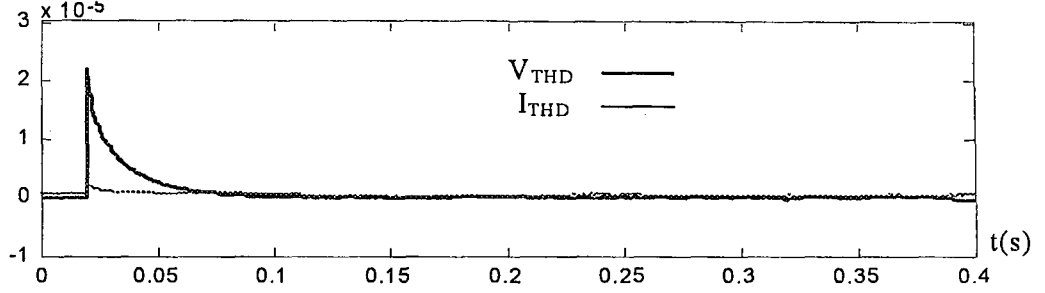
Şekil 7.2-b. Hat sonu (yük) geriliminin etkin değerinin değişimi [V]



Şekil 7.2-c. Hat sonu (yük) akımının değişimi [A]



Şekil 7.2-d. Hat sonu (yük) akımının etkin değerinin değişimi [A]



Şekil 7.2-e. Yük gerilimi ve akımındaki toplam harmonik bozulmanın değişimi

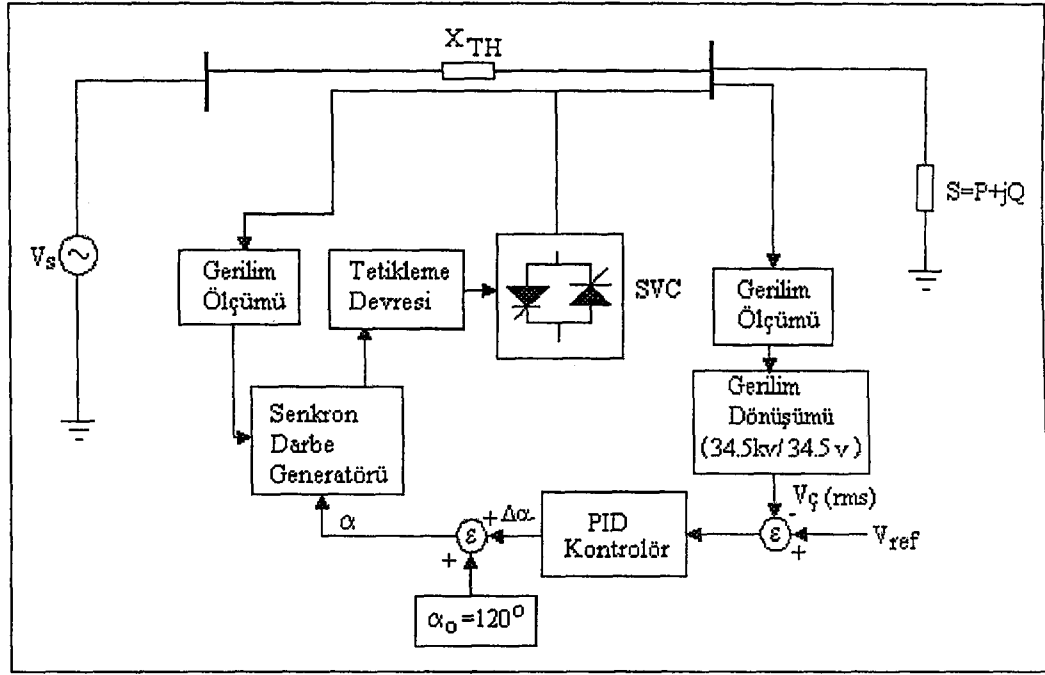
Elde edilen simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi hattın endüktif empedansı hat sonu gerilimini azaltmakta, hat üzerinde kaynak geriliminin % 40'ı değerinde bir gerilim düşümüne ve aktif ve reaktif güç kaybına neden olmaktadır. Hattın endüktif reaktansı ve hat akımının reaktif bileşeni azaltılarak çıkış gerilimi ile aktarılan aktif gücün artırılması mümkündür. Herhangi bir sinyal için toplam harmonik bozulma sinyaldeki harmonik bileşenlere bağlı olarak

$$THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{30} V_n^2} \quad (7.1)$$

ifadesi ile belirlenmektedir. Şekil 7.2-e'den görüldüğü gibi yük gerilimi ve akımındaki harmonik bileşenler ihmal edilecek kadar küçük büyüklüktedir.

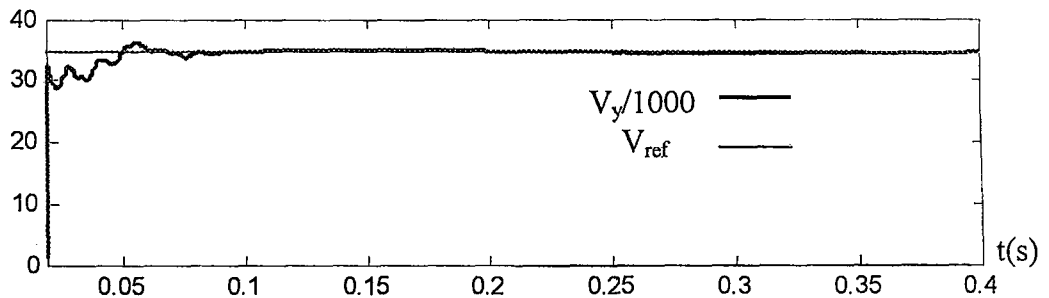
7.1.1 SVC ile reaktif güç kompanzasyonu yapılarak gerilim kontrolü

Şekil 7.1'de verilen endüktif karakterli statik yüklü güç sisteminde yük gerilimi, SVC ile reaktif güç kompanzasyonu yapılarak kontrol edilmiştir. Kontrol devresine ait tek faz devre şeması Şekil 7.3'de verilmiştir.

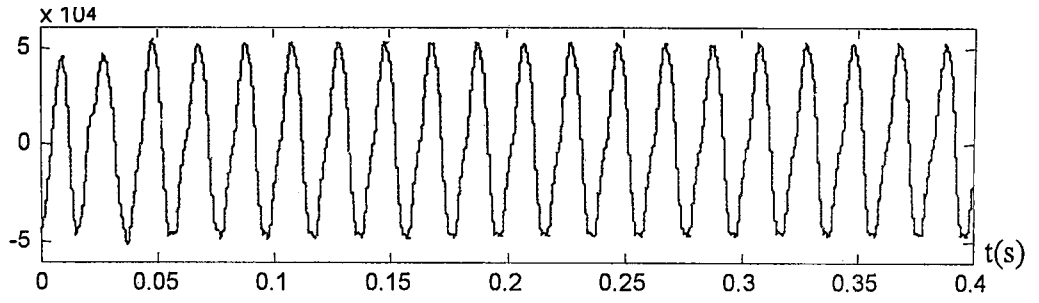


Şekil 7.3 SVC ile reaktif güç kompanzasyonu devre şeması

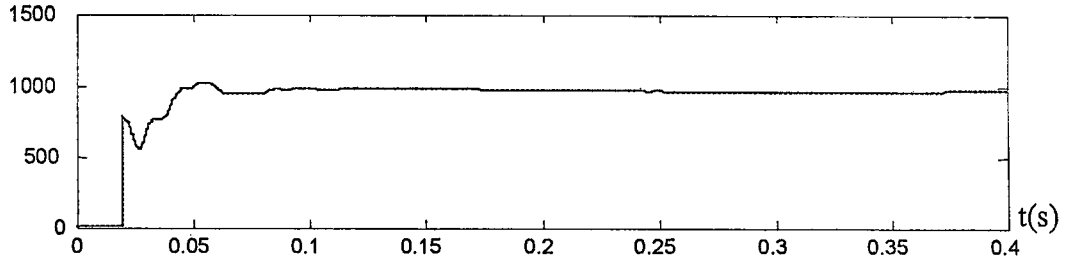
Sisteme SVC ile aktarılan maksimum kapasitif güç $Q_{SVC}=37.5$ MVar olarak alınmıştır. Buna karşılık gelen SVC kapasitör reaktansı değeri $X_C=31.8 \Omega$ eşittir. Kullanılan SVC sürekli kapasitif olarak çalıştırıldığından $X_L=9.4 \Omega$ alınarak SVC'nin endüktif çalışma aralığı kapasitif çalışma aralığından küçük tutulmuştur. Bu değerlerde SVC için rezonans tetikleme açısı $\alpha_{rez}=126.1^\circ$ olmaktadır. Tetikleme açısının belirlenmesinde kullanılan PID kontrolör için $K_p=0.2$, $K_I=50$ ve $K_D=0.0005$ değerleri alınmıştır. SVC tristörlerinin tetiklenmesinde Senkron Darbe Genaratörü kullanılarak senkronizasyon yapılmıştır. Yapılan simülasyon ile elde edilen sonuçlar Şekil 7.4'de verilmiştir.



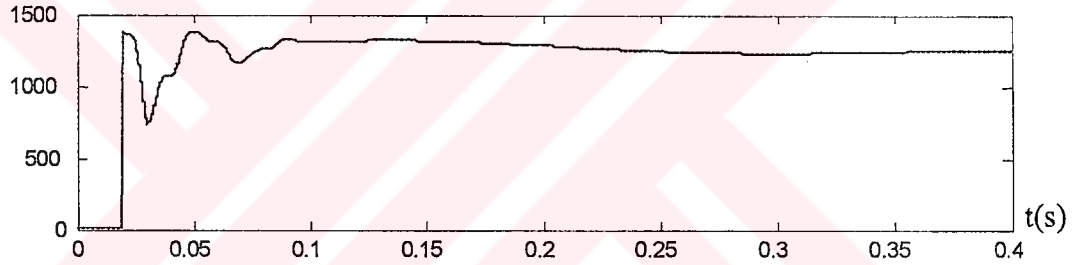
Şekil 7.4-a Yük geriliminin (rms) ve referans gerilimin değışimi [V]



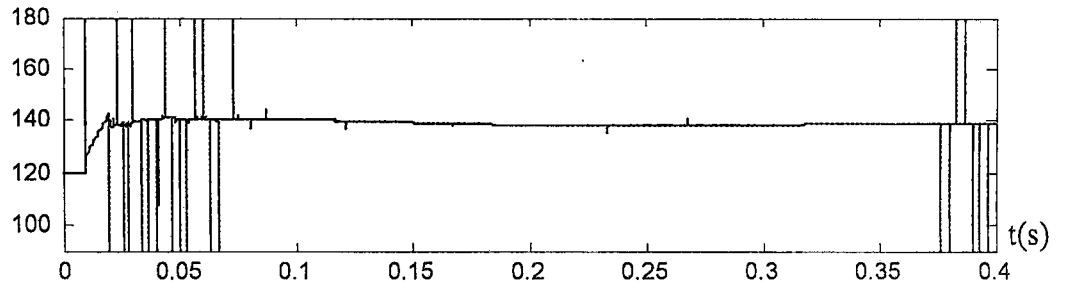
Şekil 7.4-b Yük geriliminin değişimi [V]



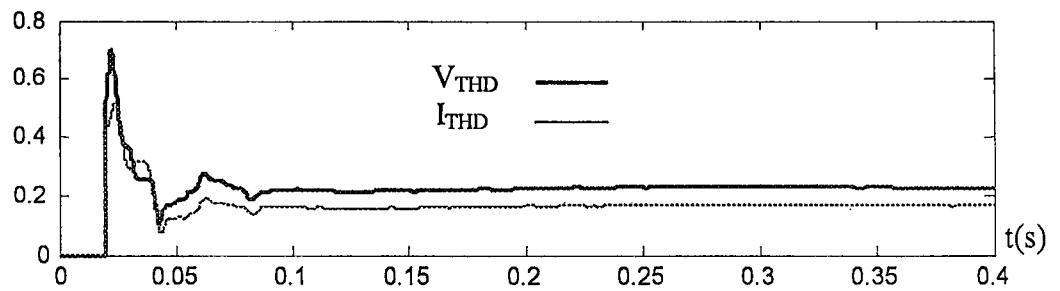
Şekil 7.4-c Yük akımının (rms) değişimi [A]



Şekil 7.4-d SVC akımının (rms) değişimi [A]



Şekil 7.4-e Tetikleme (α) açısının değişimi [derece]

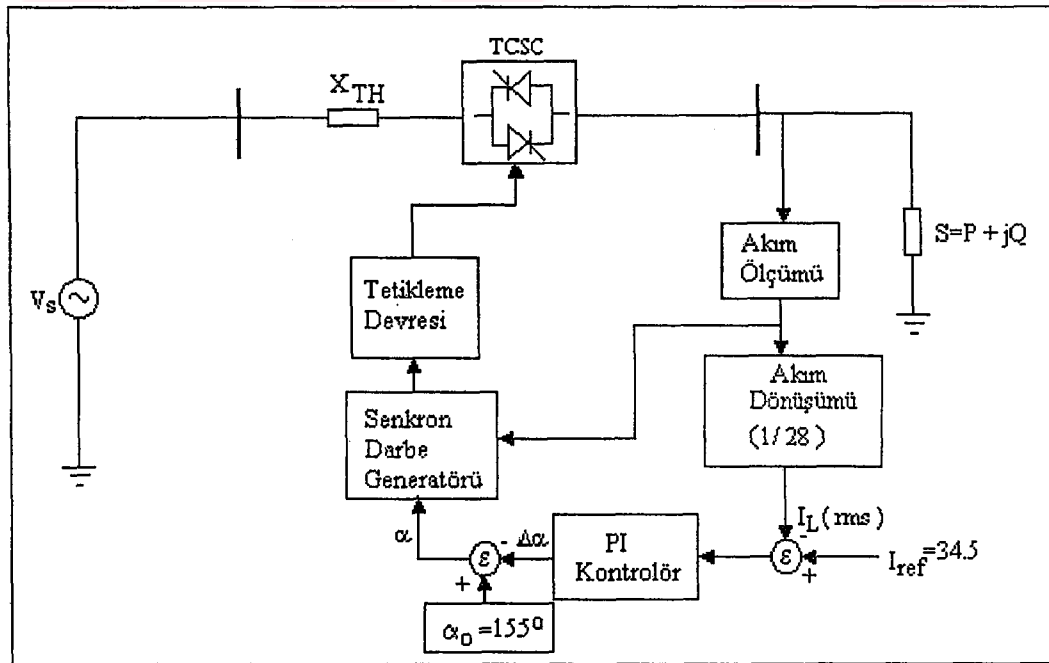


Şekil 7.4-f Yük gerimi ve akımındaki toplam harmonik bozulmanın değişimi

Şekil 7.4’de verilen simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi SVC ile sistemden kapasitif reaktif güç çekilerek, kaynaktan çekilen toplam reaktif güç kompanze edilmekte ve hat akımının reaktif bileşeni azalmaktadır. Akımın reaktif bileşeninin azalması hat empedansı üzerindeki gerilim düşümünün ve reaktif güç kaybının azalmasını sağlamaktadır. TCR tristörlerinin tetiklenmesi nedeniyle yük akımı ve geriliminde oluşan toplam harmonik bozulmalar SVC’siz sisteme nazaran daha büyüktür. Yük akımı ve gerilimi değerleri kontrolsüz sistem değerlerine göre yaklaşık olarak %40 oranında artmıştır. Akım ve gerilimdeki artış yüke aktarılan görünür gücün artmasına neden olmuştur.

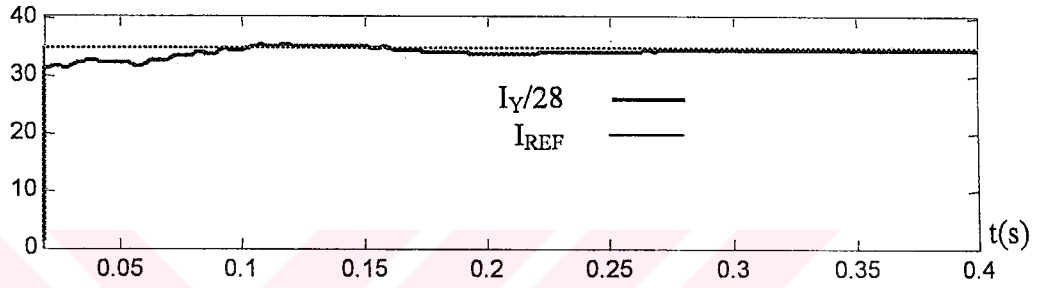
7.1.2 Enerji iletim hatlarında TCSC ile seri kompanzasyon yapılarak hat sonu akım ve geriliminin kontrolü

Daha önce de belirtildiği gibi enerji iletim hatlarında hattın seri endüktif reaktansı ve hattın rezistif direnci hat üzerinde gerilim düşümüne ve aktif/reaktif güç kaybına neden olmaktadır. Seri kompanzasyon, hat reaktansının etkisini kompanze ederek gerilim düşümünü azaltmak ve hattan transfer edilen gücü arttırmak amacı ile yapılmaktadır. Şekil 7.1’de verilen devrede hat reaktansının TCSC kullanarak kompanzasyonu ile yük gerilimi ve akımının kontrol edildiği devre şeması Şekil 7.5’de verilmiştir.

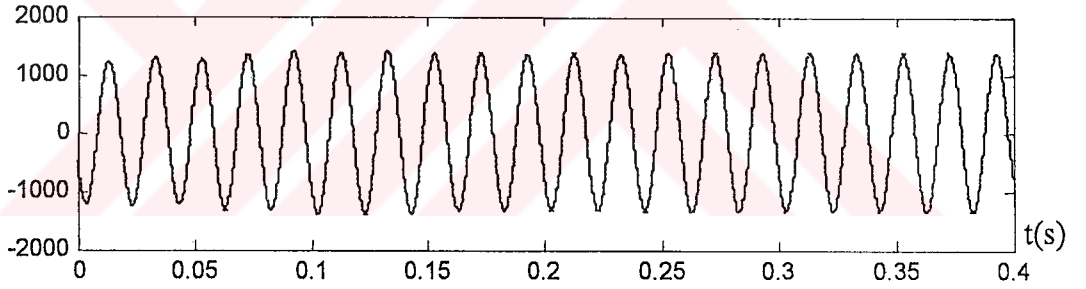


Şekil 7.5 TCSC ile seri kompanzasyon devre şeması

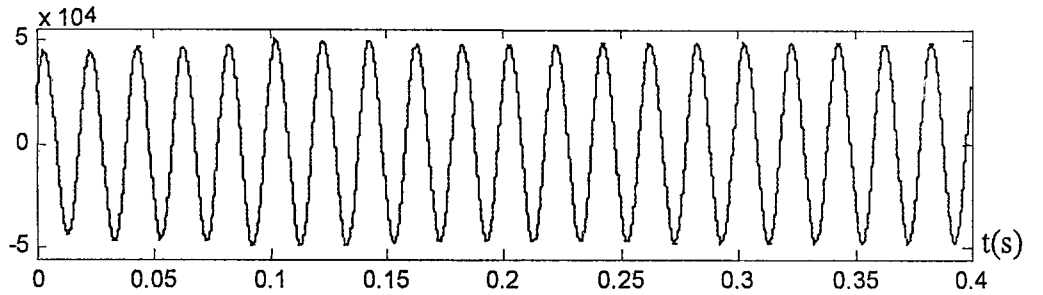
Verilen sistemde TCSC kapasitör reaktansı hattın seri reaktansına eşit olacak şekilde $X_C=18.7 \Omega$ olarak alınmıştır. TCSC sürekli kapasitif olarak çalıştırıldığından $X_L=8.7 \Omega$ alınarak TCSC'nin endüktif çalışma aralığı kapasitif çalışma aralığından küçük tutulmuştur. Bu değerler için TCSC rezonans tetikleme açısı $\alpha_{rez}=130^\circ$ olmaktadır. Tetikleme açısının kontrolünde kullanılan PID kontrolör için $K_p=7$, $K_I=50$ ve $K_D=0.0005$ değerleri alınmıştır. Senkron Darbe Genaratörü ile tetikleme devresi ve güç devresi arasındaki senkronizasyon yapılmıştır. TCSC ile seri kompanzasyon sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 7.6'da verilmiştir.



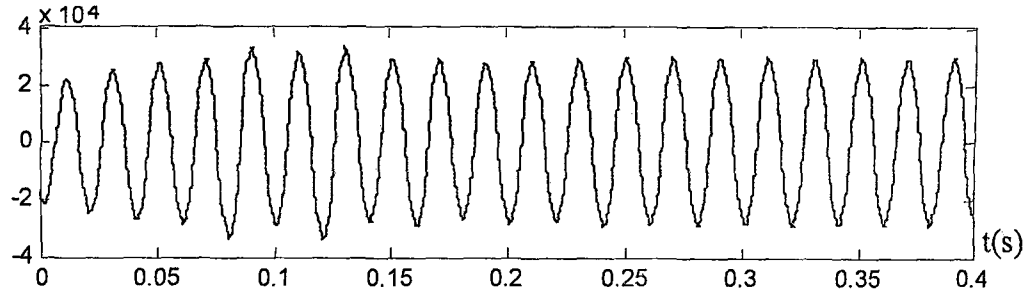
Şekil 7.6-a Yük akımının (rms) ve referans akımın değişimi [A]



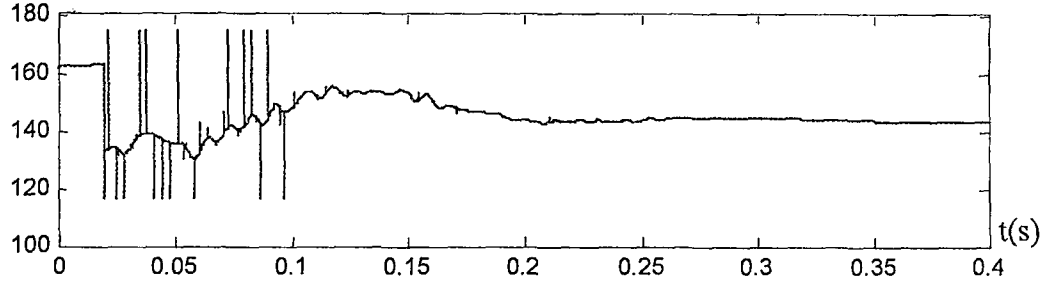
Şekil 7.6-b Yük akımının değişimi [A]



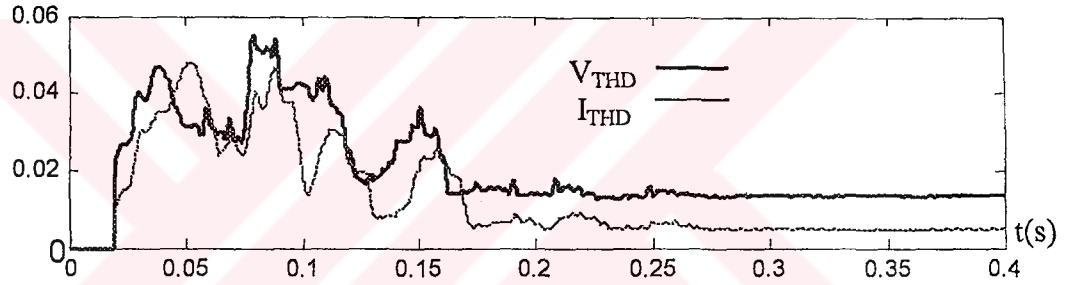
Şekil 7.6-c Yük geriliminin değişimi [V]



Şekil 7.6-d TCSC geriliminin değişimi [V]



Şekil 7.6-e Tetikleme açısının değişimi [derece]



Şekil 7.6-f Yük gerilimi ve akımındaki toplam harmonik bozulmanın değişimi

Şekil 7.6'dan görüldüğü gibi TCSC ile yapılan seri kompanzasyon ile hat reaktansı üzerindeki gerilim düşümü olan TCSC gerilimi ile kompanse edilerek hatsonu gerilimi istenilen gerilim seviyesine çıkarılmıştır. Hattın seri reaktansının azalması yük akımının artışına neden olmaktadır. Hat sonu akımı ve geriliminin artması sonucunda iletim hattından aktarılan aktif güç artmakta ve hat kayıpları azalmaktadır. TCSC ile yük akımının kontrolünün yanı sıra doğrudan gerilim kontrolünün yapılması da mümkündür. Yapılan seri kompanzasyonda yük akımı ve gerilimindeki anahtarlama ile oluşan toplam harmonik bozulmaların oldukça küçük değerde olduğu görülmektedir. Yapılan kontrolde senkronizasyon yük akımına göre yapılmıştır. Senkronizasyonun yük gerilimine göre yapılması da mümkündür. Kontrolün daha kararlı (düşük osilasyonlu) olması için kontrol sinyali (yük akımı) belirli oranda küçültülerek uygun tetikleme açısı belirlenmiştir. Tristörlerin belirlenen tetikleme açıları 90-180° aralığında sınırlanmıştır.

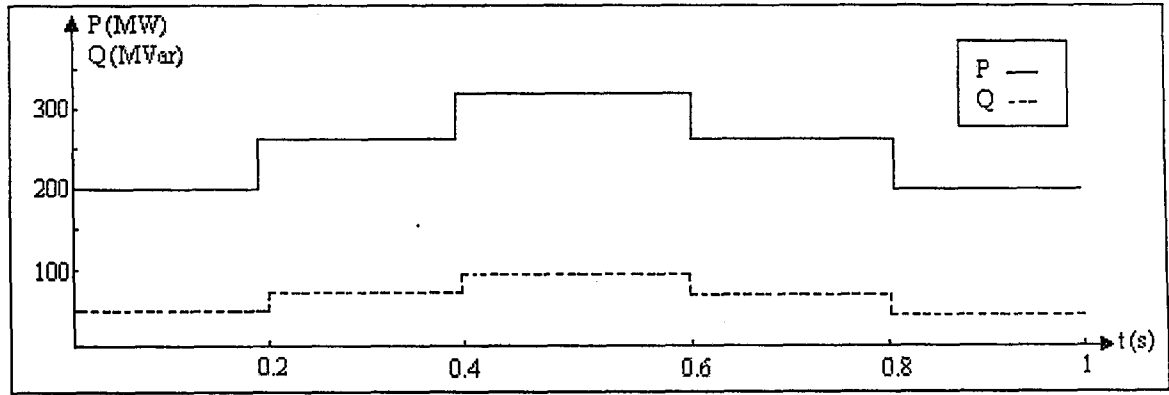
7.2 Değişken Yüklü Güç Sistemlerinde SVC ve TCSC Performansının İncelenmesi

Enerji iletim sistemlerinde yük dinamik karakterli olup zamanın bir fonksiyonu olarak sürekli değişmektedir. Yükü zamanla değişen güç sisteminde gerilim ve güç akışının kontrolü büyük bir öneme sahiptir. Bu bölümde yükü zamanla kademeli olarak değişen iletim hattında hat sonu gerilimi, SVC ile reaktif güç kompanzasyonu ve TCSC ile hat empedansının seri kompanzasyonu yapılarak kontrol edilmiştir. İletim hattı olarak tek faz devre şeması Şekil 7.1'de verilen güç sistemi kullanılarak yalnızca aktif ve reaktif güç değiştirilmiştir. Zamanla kademeli olarak değişen statik yük modeli, beş adet statik yük anahtarlanarak oluşturulmuştur. Yükün aktif ve reaktif gücünün zamana göre değişimi Tablo 7.1'de verilmiştir.

Tablo 7.1 Aktif ve reaktif gücün belirli zaman aralıklarındaki değerleri

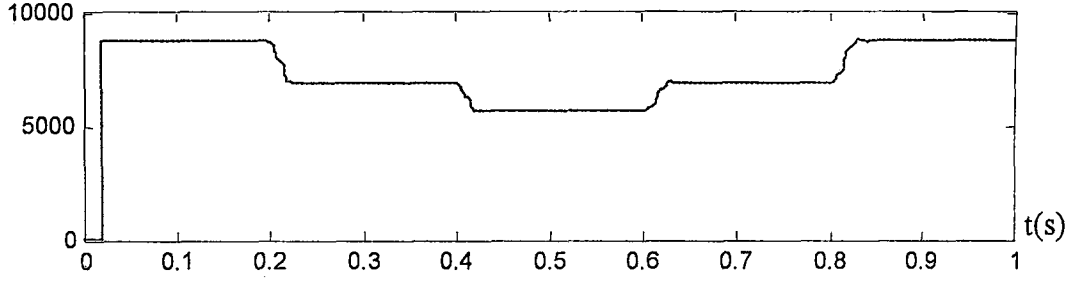
Zaman (s)	0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1
P (MW)	200	260	320	260	200
Q (Mvar)	50	70	90	70	50

Oluşturulan zamana göre simetrik ve kademeli olarak değişen endüktif yükün aktif ve reaktif gücünün grafiksel olarak gösterimi ise Şekil 7.7'de verilmiştir.

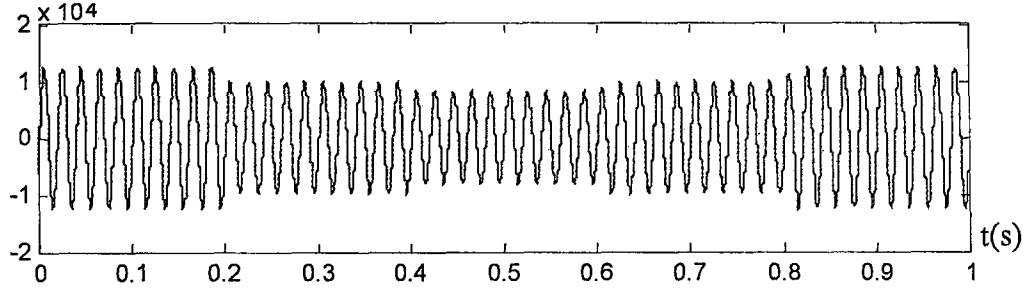


Şekil 7.7 Toplam aktif ve reaktif gücün değişimi

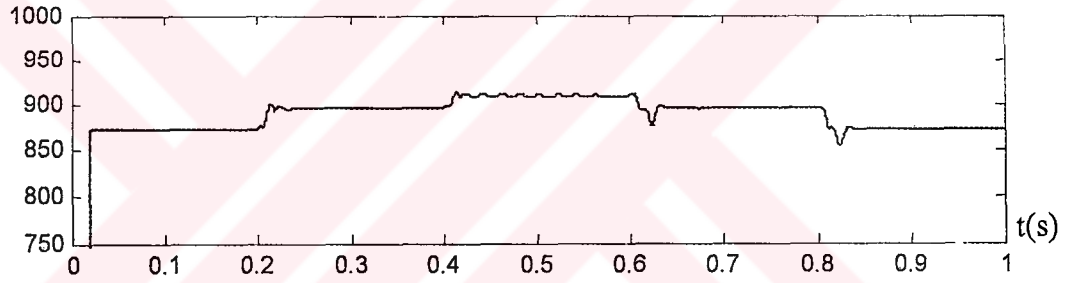
Verilen sistemde kompanzasyonsuz durum için yük gerilimi ve akımının değişimi Şekil 7.8'de verilmiştir.



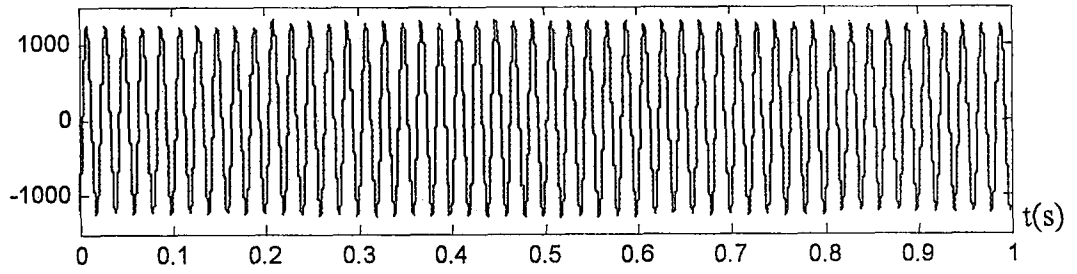
Şekil 7.8-a Yük geriliminin (rms) değişimi [V]



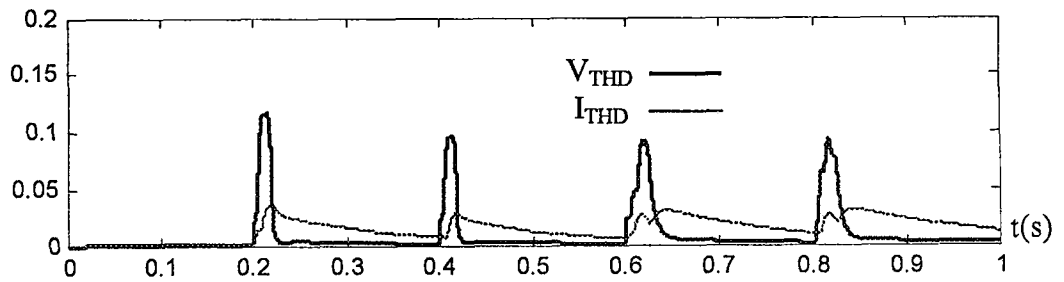
Şekil 7.8-b Yük geriliminin değişimi [V]



Şekil 7.8-c Yük akımının (rms) değişimi [A]



Şekil 7.8-d Yük akımının değişimi [A]

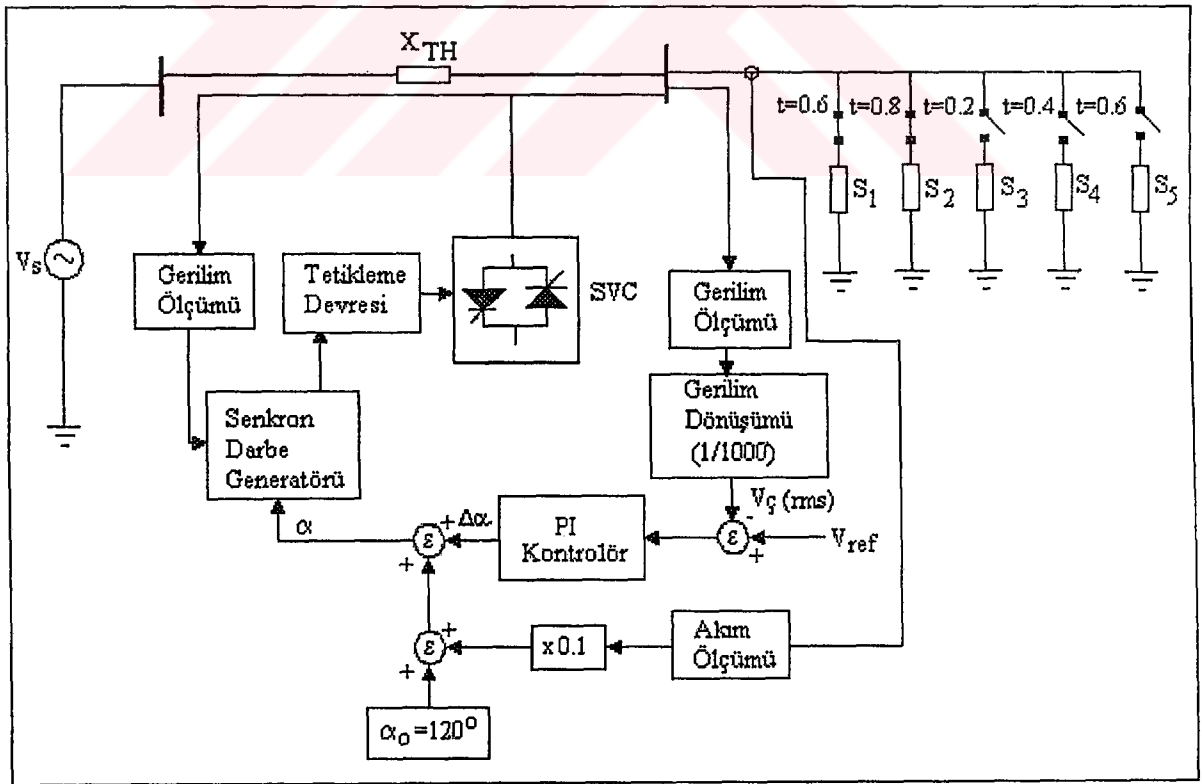


Şekil 7.8-e Yük akımı ve gerilimindeki toplam harmonik bozulmanın değişimi

Şekil 7.8'deki Akım ve gerilim değişimlerinden görüleceği üzere yükteki artış hat sonu geriliminin azalmasına neden olmaktadır. Sistem akım ve geriliminde, anahtarlama anlarında küçük oranda bozulmalar oluşmaktadır, diğer durumlarda ise bozulma ihmal edilecek kadar küçük değerdedir. Çekilen akımının artışı, hat üzerindeki gerilim düşümünün kaynak geriliminin %80'ine kadar çıkmasına neden olmaktadır. Hat üzerindeki gerilim düşümünün artması, güç kayıplarının artmasına ve yüke aktarılan gücün ve hat sonu geriliminin azalmasına neden olmaktadır.

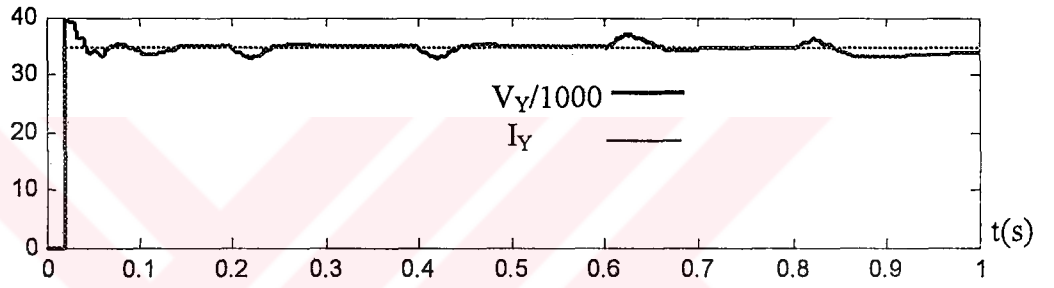
7.2.1 SVC ile reaktif güç kompanzasyonu yapılarak değişken yüklü güç sistemlerinde gerilim kontrolü

Değişken yüklü güç sisteminde SVC performansını incelemek amacıyla Şekil 7.1'de verilen sistemde Şekil 7.7'deki gibi değişen yük modeli kullanılması durumunda paralel reaktif güç kompanzasyonu yapılarak yük gerilimi kontrol edilmiştir. Kontrol devresine ait tek faz devre şeması Şekil 7.9'da verilmiştir.

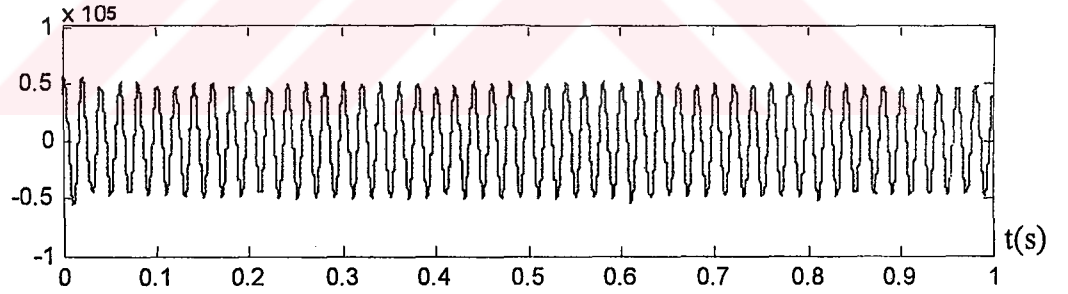


Şekil 7.9 Değişken yüklü güç sisteminde SVC ile reaktif güç kompanzasyonu devre şeması

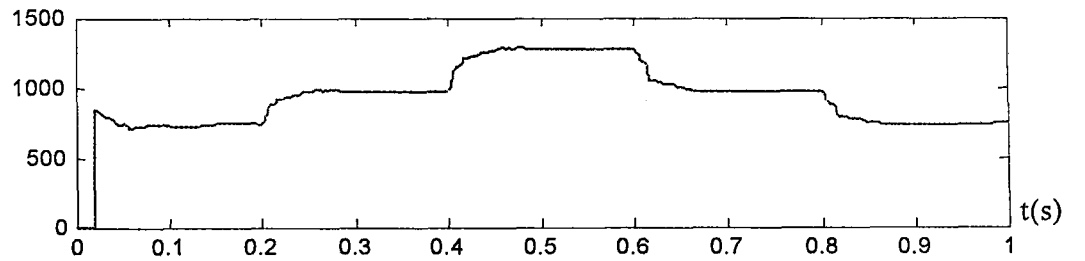
Sistemde statik yüklerin bağlı olduğu anahtarlar verilen zamanlarda konum değiştirmektedir. Yük değişiminde uygun tetikleme açısına kısa bir sürede ulaşılabilmesi için PI kontrolör katsayılarının büyük değerde tutulması gerekmektedir. Fakat bu durum gerilimde büyük değerli osilasyonlara neden olmaktadır. Bu nedenle PI kontrolör katsayıları küçük değerde tutulmuştur. Yük artışı çekilen akımın artmasına neden olduğundan akım belirli bir oranda ($\times 0.1$) tristörlerin tetikleme açısına yansıtılmıştır. Tetikleme açısı $115^\circ \leq \alpha_{SVC} \leq 180^\circ$ sınırlarında tutularak SVC'nin kapasitif reaktansının $5.3 \leq X_{SVC} \leq 45$ aralığında kontrolü yapılmıştır. Rezonans tetikleme açısı $\alpha_{res}=112^\circ$ de tutularak SVC'nin kapasitif çalışma aralığı arttırılmıştır. PI kontrolör katsayıları $K_p=2$ ve $K_I=50$ olarak alınmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 7.10'da verilmiştir.



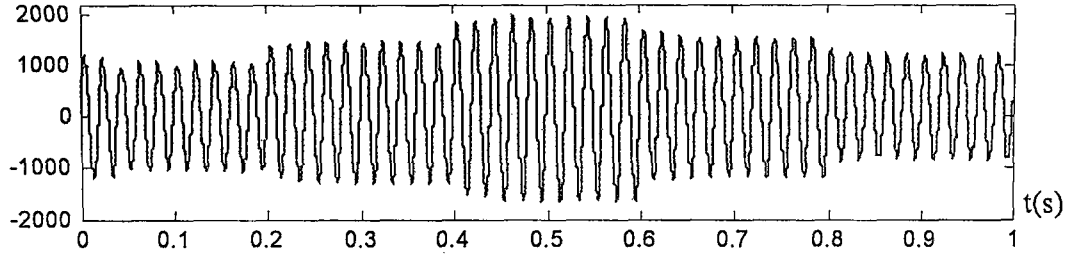
Şekil 7.10-a Yük geriliminin (rms) ve referans gerilimin değişimi [V]



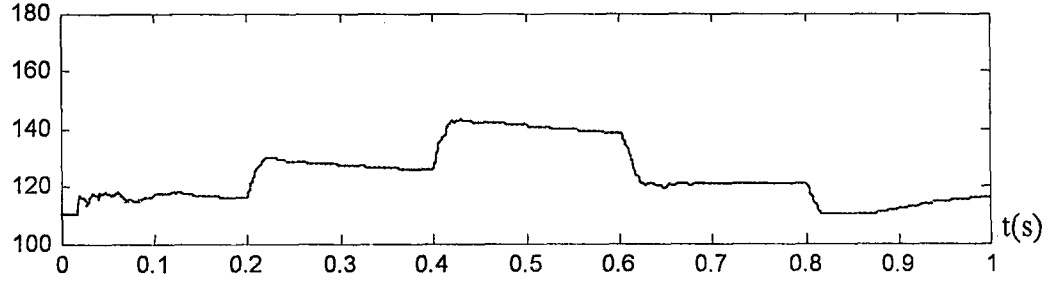
Şekil 7.10-b Yük geriliminin değişimi [V]



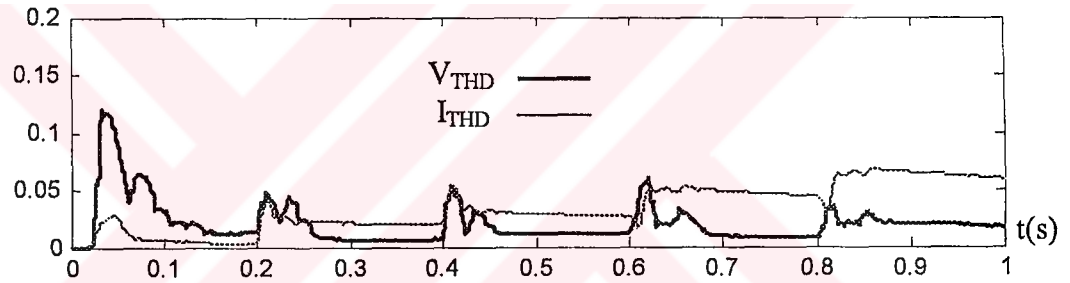
Şekil 7.10-c Yük akımının (rms) değişimi [A]



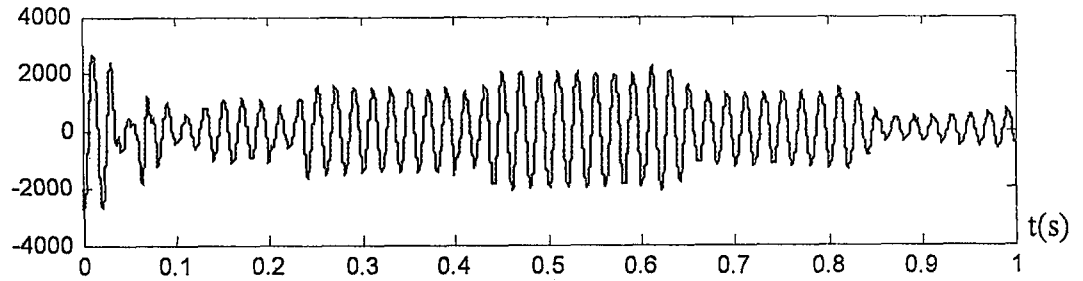
Şekil 7.10-d Yük akımının değişimi



Şekil 7.10-e Tetikleme açısının değişimi [derece]



Şekil 7.10-f Akım ve gerilimdeki toplam harmonik bozulmanın değişimi

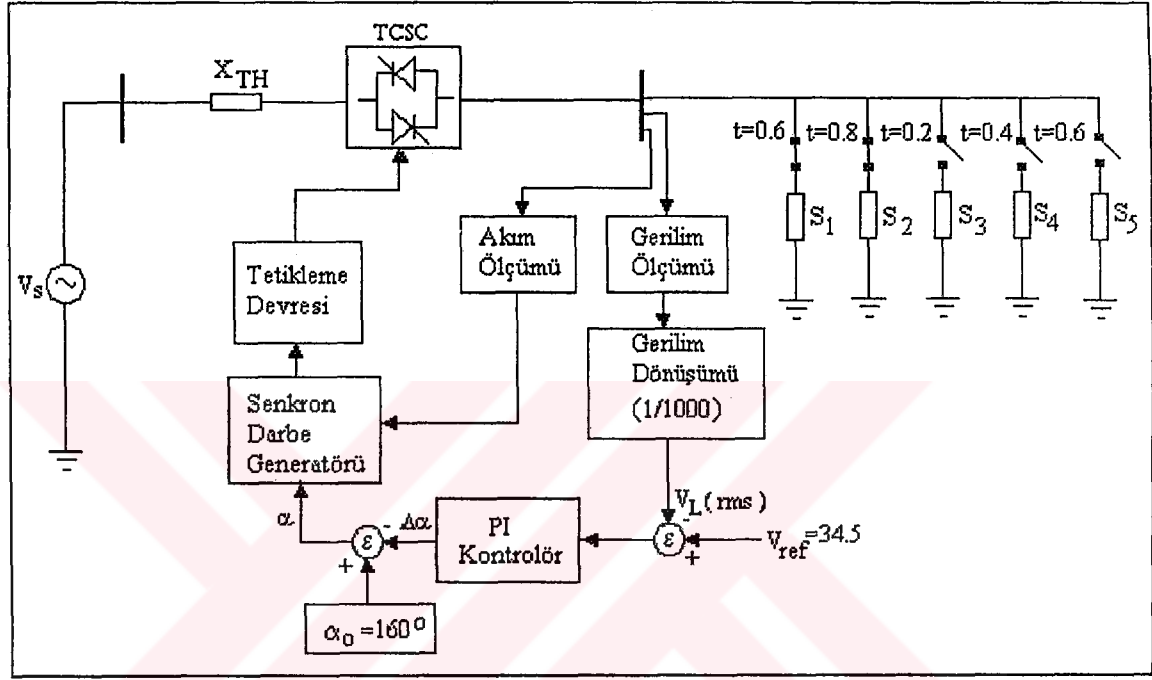


Şekil 7.10-g SVC akımının değişimi [A]

Yük artışı ile çıkış geriliminin azalması sonucunda SVC tristörlerinin tetikleme açısı arttırılarak SVC akımı ve reaktif gücü artmakta ve hat sonu (yük) gerilimi referans gerilim seviyesinde kontrol edilmektedir.

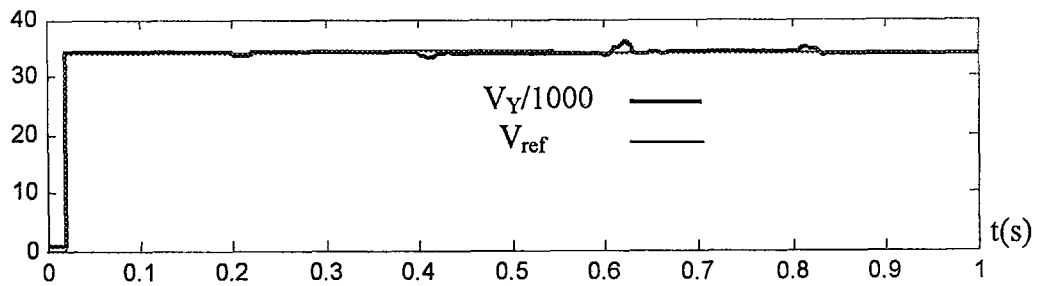
7.2.2 TCSC ile seri kompanzasyon yapılarak değişken yüklü güç sistemlerinde gerilim kontrolü

Şekil 7.1'de verilen sistemde zamana göre değişimi Şekil 7.7'de verilen değişken yük kullanılması durumunda hat sonu (yük) gerilimi TCSC ile seri kompanzasyon yapılarak kontrol edilmiştir. TCSC ile kontrol devresine ait tek faz devre şeması Şekil 7.11'de verilmiştir.

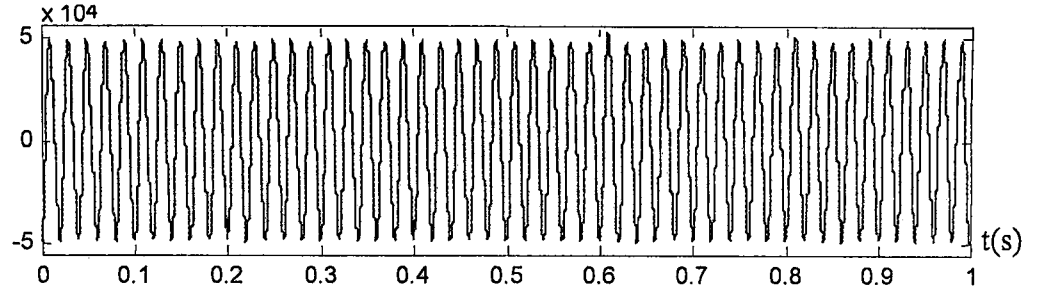


Şekil 7.11 TCSC ile seri kompanzasyon devre şeması

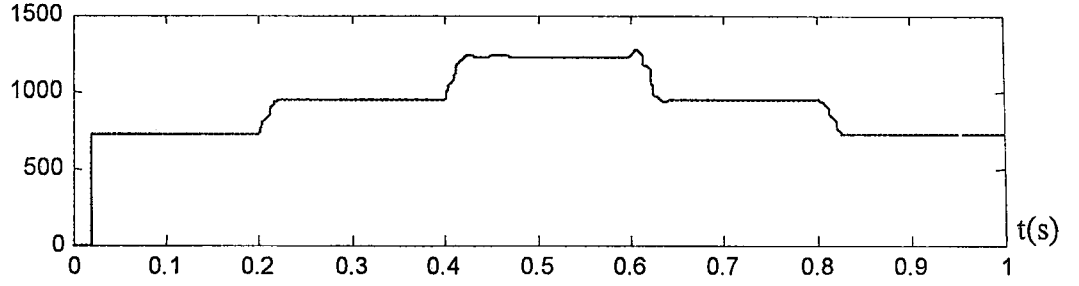
TCSC ile hattın endüktif reaktansının maksimum %120 oranında kompanzasyonu yapılarak yük (hat sonu) gerilimi kontrol edilmiştir. Tetikleme açısı $150^{\circ} \leq \alpha_{TCSC} \leq 180^{\circ}$ sınırlarında tutularak TCSC'nin kapasitif reaktansı $21.2 \leq X_{TCSC} \leq 25.4$ aralığında kontrolü yapılmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 7.12'de verilmiştir.



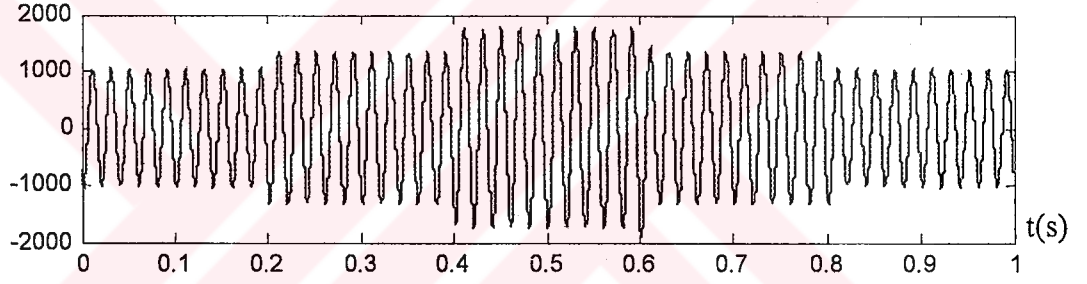
Şekil 7.12-a Yük geriliminin (rms) ve referans gerilimin değişimi [V]



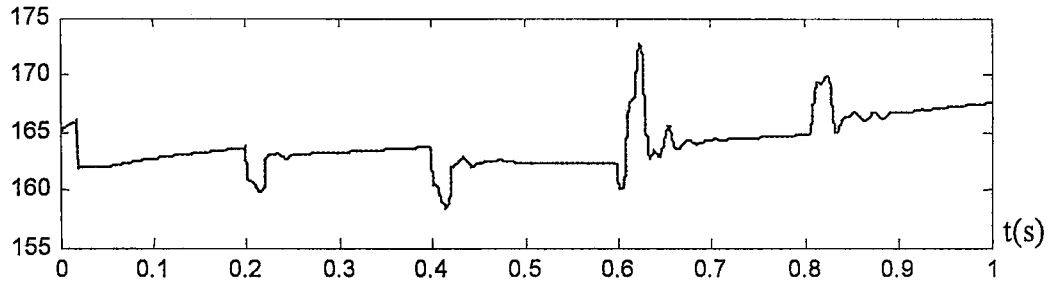
Şekil 7.12-b Yük geriliminin değişimi [V]



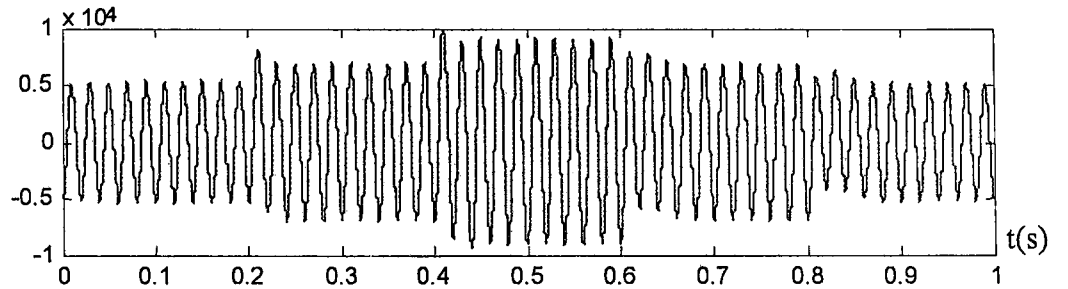
Şekil 7.12-c Yük akımının (rms) değişimi [A]



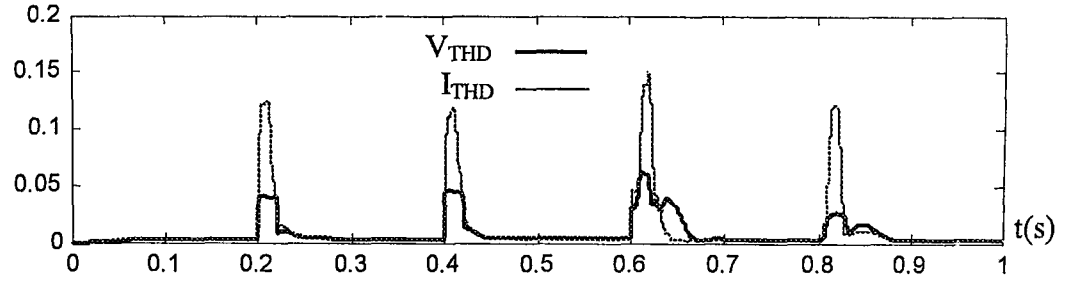
Şekil 7.12-d Yük akımının değişimi [A]



Şekil 7.12-e Tetikleme açısının değişimi [derece]



Şekil 7.12-f TCSC geriliminin değişimi [V]

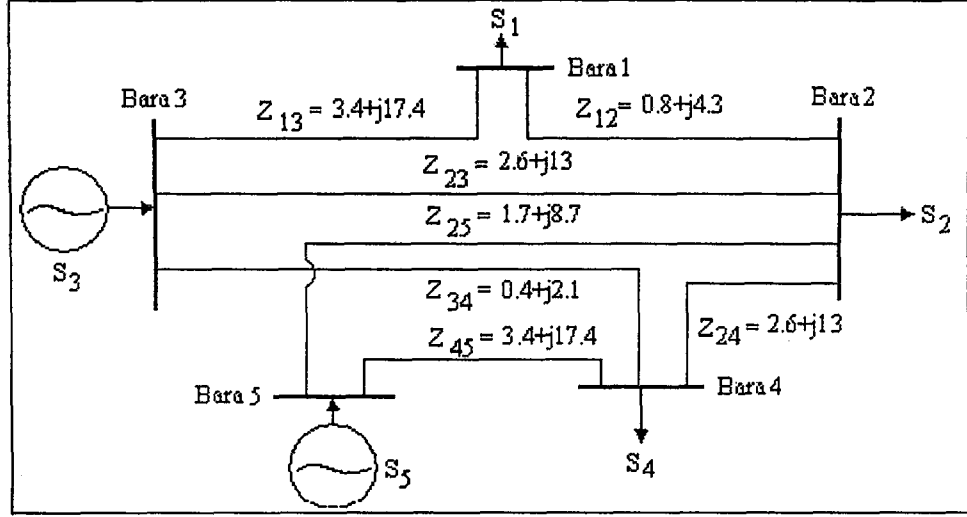


Şekil 7.12-g Akım ve gerilimdeki toplam harmonik bozulmanın değişimi

Hattın seri endüktif reaktansı üzerindeki gerilim düşümü yük artışına bağlı olarak arttığından TCSC gerilimi de artmakta ve aralarındaki faz farkı 180° olduğundan hattaki gerilim düşümü kompanse edilmektedir. Böylece hat üzerindeki reaktif güç kayıpları azalarak yüke aktarılan aktif güç artmakta ve yük akımı ve geriliminin artması nedeniyle aktif güç artmaktadır.

7.3 SVC ve TCSC'nin Enerji İletim Sistemlerinde Güç Akışına Etkisinin İncelenmesi

Günümüzde güç sistemleri oldukça karmaşık yapıya sahip olup binlerce bara ve yüzlerce generatörden oluşabilmektedir. Değişen enerji talebine bağlı olarak bu sistemlerde kontrol edilebilirlik, sistem kapasitesinin artırılması ve hızlı güç akışı kontrolü, sistem güvenliği ve yük bakımından son derece önemlidir. Yük değişimi sistem geriliminin değişimine, iletim hatlarının aşırı yüklenmesine ve sistemde dengesiz yük akışına neden olabilmektedir. Burada ortaya çıkan problemlerin azaltılmasına FACTS teknolojisi yardımcı olabilir. Yeni hat yapımı veya mevcut hatların yenilenmesi günümüzde en ekonomik senaryo olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat FACTS teknolojisi faz açısının, empedansın, gerilim ve akımın değiştirilmesi sonucu mevcut hatların kullanılabilir kapasitesinin artırılması ve güç kontrolü için yeni seçenekler meydana getirmiştir. Bu bölümde 5 baralı bir güç sisteminde SVC ve TCSC'nin güç transferine ve sistem gerilimine etkisi incelenmiştir. TCSC ile seri kompanzasyonda %70 oranında hat empedansının kompanzasyonu, paralel kompanzasyonda ise yükün endüktif reaktif gücünün %100 oranında kompanzasyonu yapılmıştır. Matlab/Simulink programı kullanılarak kompanse edilen beş baralı, yedi iletim hattından oluşan güç sisteminin tek faz devre şeması Şekil 7.13'de verilmiştir.



Şekil 7.13 Beş iletim sisteminin tek faz devre şeması

Verilen sistemde 3 ve 5. baralara farklı güçte 66 kV'lik generatör, 1,2 ve 4. baralara ise farklı güçte endüktif statik yükler bağlanmıştır. Generatör görünür güçleri ile yüklerin aktif ve reaktif güç bileşenleri Tablo 7.2'de verilmiştir.

Tablo 7.2 Yük ve Generatör güçleri

Bara Sırası	P (MW)	Q (MVar)	S (MVA)
Bara1	45	20	49.2
Bara2	40	15	42.7
Bara3	-	-	125
Bara4	60	20	63.2
Bara5	-	-	60

Sistemde herhangi bir kompanzasyonun yapılmadığı durum için elde edilen bara gerilimleri, generatör çıkış güçleri, bara gerilimlerinin faz açıları ve yüke aktarılan görünür güç değerleri Tablo 7.3'de verilmiştir.

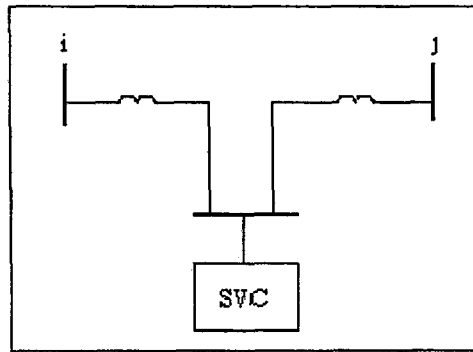
Tablo 7.3 Kompanzasyonsuz durum için bara gerilimleri, faz açısı ve görünür güç değerleri

Sistem Değişkenleri	Bara 1	Bara 2	Bara 3	Bara 4	Bara 5
Gerilim (kV)	57.56	58.49	60.68	59.67	61.01
Faz Açısı (δ)	-9.46	-8.22	-5.27	-6.81	-4.7
Görünür Güç (MVA)	36.93	33.08	80.5	51.1	39

Tablo 7.3'den görüldüğü gibi hat empedansları üzerindeki gerilim düşümü ve aktif/reaktif güç kayıpları, sırasıyla yük bara gerilimlerinin ve yüke aktarılan gücün azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca generatörlerin yüklenmesi çıkış gerilimlerini belirli bir oranda düşürmektedir.

7.3.1 SVC'nin enerji iletim sistemlerinde güç akışına etkisinin incelenmesi

Güç sistemlerinde SVC, aktif gücü sıfıra eşit PV bara olarak alınmaktadır. SVC'nin bağlanması durumunda sistem reaktansı değişmektedir. Hattın ortasına bağlanması durumu için SVC modeli Şekil 7.14'de verilmiştir.



Şekil 7.14. SVC'nin hatta bağlantı şeması

Bu durum için sistemin güç akışı denklemleri,

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^n |U_i||U_j| (G_{ij(svc)} \cos \delta_{ij} + B_{ij(svc)} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (7.2a)$$

$$Q_{Gi}-Q_{Di}-\sum_{j=1}^n |U_i||U_j| (G_{ij(svc)}\sin\delta_{ij}-B_{ij(svc)} \cos\delta_{ij})=0 \quad (7.2b)$$

$$P_{SVC}=0 \quad (7.2c)$$

$$|U_i|_{\min} \leq |U_i| \leq |U_i|_{\max} \quad (7.2d)$$

$$S_{ij} \leq S_{ij \max} \quad (7.2e)$$

şeklinde yazılabilir. Burada P_{Gi} ve Q_{Gi} i. baradan aktarılan aktif ve reaktif güç, P_{Di} ve Q_{Di} i. bara için gerekli olan aktif ve reaktif güç, U_i ve U_j sırasıyla i. ve j. bara gerilimleri, G_{ij} (svc) ve B_{ij} (svc) sistem bara admitans matrisi ij elamanının aktif ve reaktif bileşeni fonksiyonları, n sistemdeki bara sayısı, S_{ij} hattın görünür gücü, $S_{ij \max}$ hattın termal limiti, U_{\min} ve U_{\max} i. bara geriliminin minimum ve maksimum gerilim limitleridir. 1., 2. ve 4. baralarına ayrı ayrı SVC bağlanarak yük reaktif gücünün %100 oranında kompanzasyonu için bara gerilimlerinin Tablo 7.2'de verilen kompanzasyonsuz durumdaki değerlere göre değişimi Tablo 7.4'de verilmiştir.

Tablo 7.4. SVC ile reaktif güç kompanzasyonu durumunda bara gerilimindeki değişimler

SVC Yeri	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅
Normal Durum	57.56 (kV)	58.49 (kV)	60.68 (kV)	59.67 (kV)	61.01 (kV)
1.Bara	%4.37	%3	%1.84	%1.99	%1.83
2.Bara	%3.1	%3.45	%1.82	%2.07	%2
4.Bara	%2.2	%2.22	%2.2	%2.96	%1.72

Her bir yük için ayrı ayrı yapılan SVC ile reaktif güç kompanzasyonu bara gerilimlerinde artışa neden olmaktadır. Tablo 7.3'den yararlanarak sistem gerilimi açısından SVC'nin en uygun yerinin 1. bara olduğunu söylemek mümkündür. SVC ile reaktif güç kompanzasyonunun yük akışına etkisini göstermek amacıyla generatör ve yüklerin görünür güçlerinin kompanzasyonsuz duruma göre % olarak değişimi Tablo 7.5'de verilmiştir.

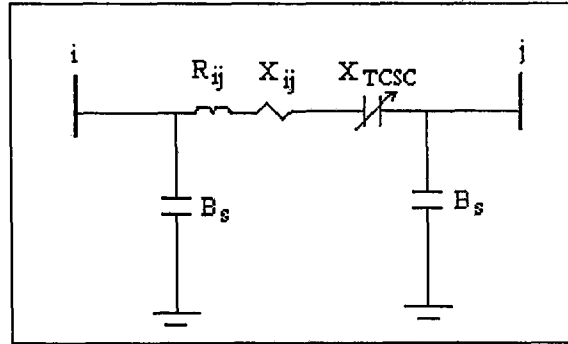
Tablo 7.5 SVC ile reaktif güç kompanzasyonu durumunda görünür güçlerdeki değişimler

SVC Yeri	Yük görünür gücündeki değişim (%)			Generatör güçlerindeki değişim (%)	
	S ₁	S ₂	S ₄	S ₃	S ₅
Normal Durum	36.93 (MVA)	33.08 (MVA)	51.1 (MVA)	80.5 (MVA)	39 (MVA)
1. Bara	%0.16	%6.3	%0.74	%8.6	%1.16
2. Bara	%6.5	%0.36	%4	%8	%0.8
4. Bara	%4.5	%4.5	%0.5	%7.5	%0.06

Yük akımının reaktif bileşeninin SVC akımı ile kompanse edilmesi ve yük gerilimindeki artış hattaki reaktif güç kayıplarının azalmasına ve yüke aktarılan aktif ve reaktif gücün artmasına neden olmaktadır.

7.3.2 TCSC'nin enerji iletim sistemlerinde güç akışına etkisinin incelenmesi

TCSC'nin hatta seri bağlanması ile hat reaktansı belirli sınırlarda değiştirilebilmektedir. Genel olarak TCSC reaktansı $-0.5X_h$ ile $0.5X_h$ aralığında değiştirilmektedir. Burada X_h hattın seri endüktif reaktansını göstermektedir. TCSC'nin sisteme bağlantı şeması Şekil 7.15'de verilmiştir.



Şekil 7.15. TCSC'nin hatta bağlantı şeması

TCSC'nin sisteme bağlanması durumu için sistemin güç akış denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^n |U_i||U_j| (G_{ij(TCSC)} \cos \delta_{ij} + B_{ij(TCSC)} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (7.3a)$$

$$Q_{Gi}-Q_{Di}-\sum_{j=1}^n |U_i||U_j| (G_{ij(TCSC)}\sin\delta_{ij}-B_{ij(TCSC)}\cos\delta_{ij})=0 \quad (7.3b)$$

$$|U_i|_{\min} \leq |U_i| \leq |U_i|_{\max} \quad (7.3c)$$

$$S_{ij} \leq S_{ij \max} \quad (7.3d)$$

Burada $G_{ij(TCSC)}$ ve $B_{ij(TCSC)}$ sistem bara admitans matrisi ij elamanının aktif ve reaktif bileşeni fonksiyonlarıdır.

Tek faz devre şeması Şekil 7.13’de verilen güç sisteminde iletim hattı kapasitansları ihmal edilen endüktif karakterli dağıtık parametrelili iletim hatlarının ayrı ayrı hat empedanslarının %70 oranında seri kompanzasyonu TCSC kullanılarak yapılmıştır. Generatör ve yük bara gerilimlerinin kompanzasyonsuz duruma göre % olarak değişimleri Tablo 7.6’da verilmiştir.

Tablo 7.6 TCSC ile seri kompanzasyon durumunda bara gerilimlerdeki değişimler

TCSC Yeri	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅
Normal Durum	57.56 (kV)	58.49 (kV)	60.68 (kV)	59.67 (kV)	61.01 (kV)
Z ₁₂	%0.8	%0.1	%0.2	%0.23	%0.14
Z ₂₄	%0.24	%0.32	-%0.03	-%0.11	%0.11
Z ₁₃	%1.12	%0.66	%0.01	%0.13	%0.34
Z ₂₃	%0.74	%0.87	-%0.19	%0.33	%0.57
Z ₃₄	%0.22	%0.29	-%0.03	%1.69	%0.3
Z ₂₅	%0.27	%0.27	%0.34	%0.41	%0.04
Z ₄₅	%0.83	%0.94	%0.41	%0.4	-%0.5

Seri kompanzasyon yapılması durumunda generatör çıkışındaki ve yük tarafından çekilen görünür güçlerin değişimleri Tablo 7.7’de verilmiştir.

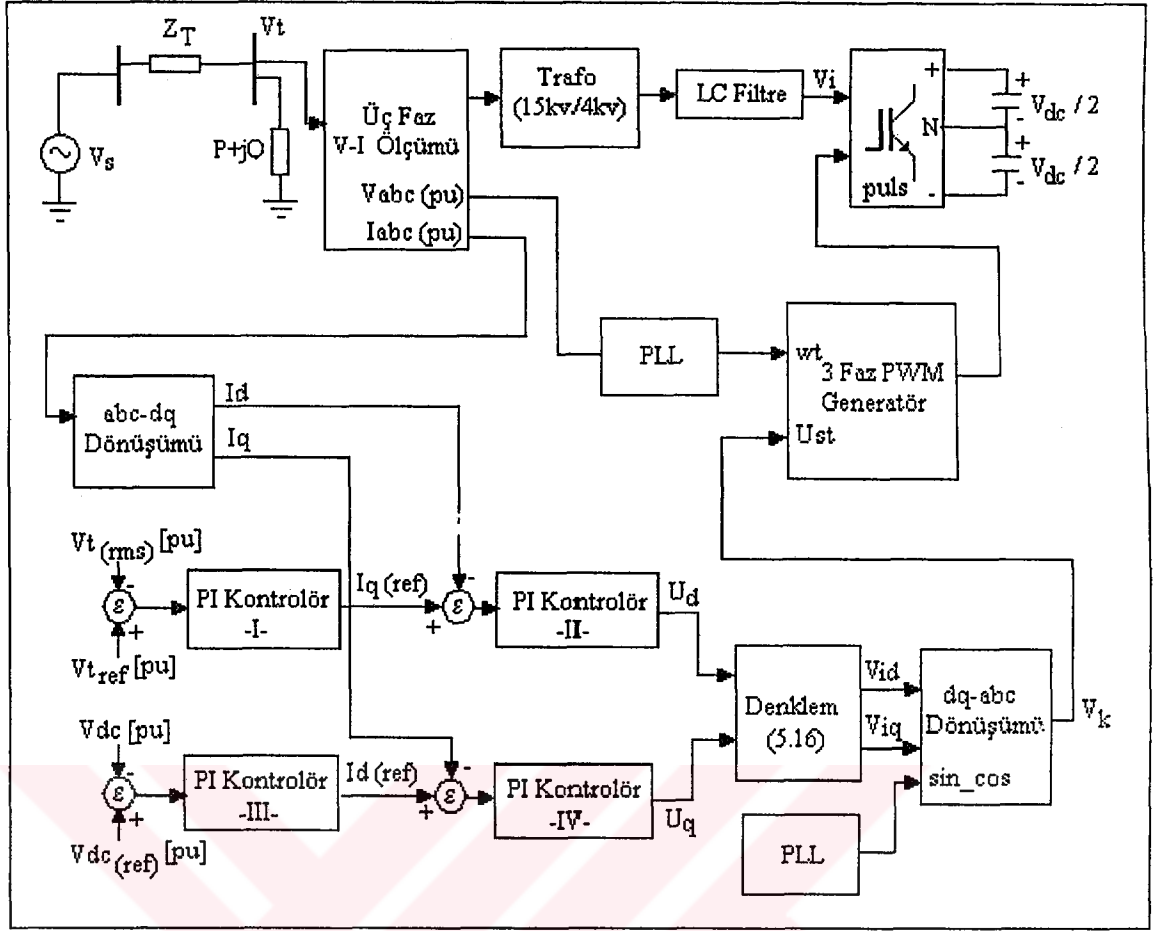
Tablo 7.7 TCSC ile Seri kompanzasyon durumunda görünür güçlerdeki değişimler

TCSC Yeri	Yük görünür gücündeki değişim (%)			Generatör güçlerindeki değişim (%)	
	S ₁	S ₂	S ₄	S ₃	S ₅
Normal Durum	36.93 (MVA)	33.08 (MVA)	51.1 (MVA)	80.5 (MVA)	39 (MVA)
Z ₁₂	%2.86	%0.46	%0.47	%7.5	%1.4
Z ₂₄	%0.62	%0.95	-%0.04	%8	-%1.4
Z ₁₃	%2.47	%1.5	%0.22	%10.2	-%3.4
Z ₂₃	%1.7	%1.9	%0.56	%10.9	-%5.3
Z ₃₄	%0.62	%3.63	%1.3	%9.6	-%3.3
Z ₂₅	%1.9	%2.1	%0.8	%2.8	%11.4
Z ₄₅	%0.82	%0.9	%0.75	%5.1	%6.4

Simülasyon sonuçları, TCSC ile hat empedansının kompanzasyonu yapılarak belirli oranda bara gerilimlerinin, yüke aktarılan aktif/reaktif güçlerin, sistemdeki güç akışının büyüklüğünün ve yönünün kontrol edilebileceğini göstermektedir. Yüke aktarılan aktif güç hattın seri empedansı kompanze edilerek artırılmıştır. Bunun dışında TCSC ile seri kompanzasyon yapılarak hattın akan gücün kontrolü, iletim hatlarının güç transfer kapasitesinin artırılması ve hattın aşırı yüklenmesinin önlenmesi mümkündür.

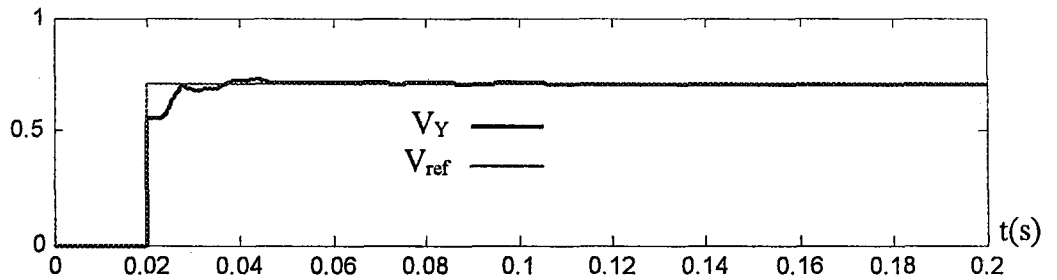
7.4 Statik Kompanzator (Statcom) Kullanılarak Reaktif Güç Kompanzasyonu

Bu bölümde, Matlab/Simulink programı kullanılarak endüktif yüklü, dağıtık parametrelili 75 km uzunluğundaki bir iletim hattında Statik Kompanzator (Statcom) kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu ile çıkış (yük) gerilimi kontrol edilmiştir. Kaynak gerilimi 15 kV olan $P=5$ MW ve $Q=2.5$ MVAR endüktif yüklü, eşdeğer empedansı $Z_T=0.9+j21.9$ değerindeki bir iletim hattında ± 4 MVAR'lık bir Statcom kullanılmıştır. DC gerilimin ve invertör çıkış geriliminin kontrol edilmesi ile Statcom kapasitif olarak çalıştırılıp sisteme kapasitif güç aktararak çıkış gerilimi kontrol edilmiştir. İntertör çıkış gerilimi AC sistem geriliminden 10° geride tutularak invertör ve transformatör kayıpları karşılanmıştır. İntertör anahtarlama frekansı $f_s=2$ kHz, DC gerilim 6 kV ve $C=1000$ μ F olarak seçilmiştir. Çıkış gerilimindeki harmoniklerin sisteme aktarılması filtre kullanılarak önlenmiştir. Statcom kullanılarak gerilim kontrolü yapılan devrenin tek fazına ait şema Şekil 7.16'da verilmiştir.

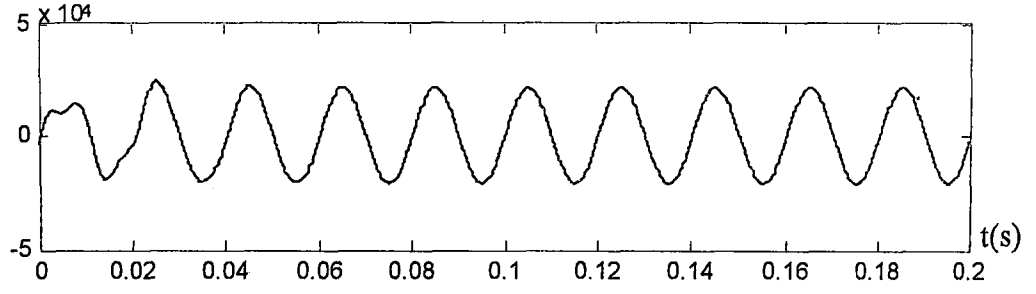


Şekil 7.16 Statcom ile reaktif güç kompanzasyonuna ait tek faz devre şeması

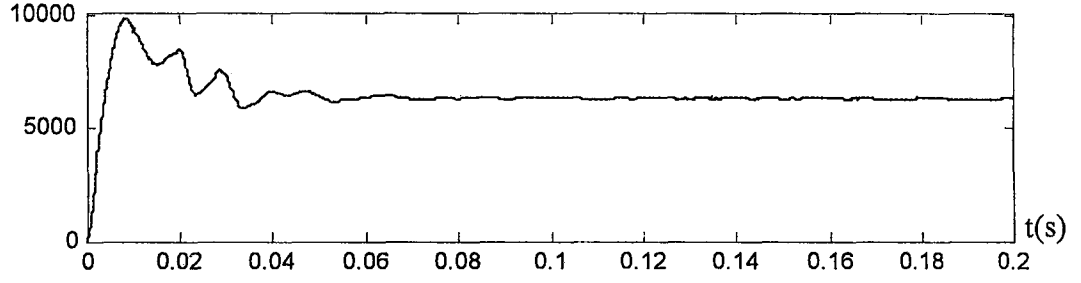
Verilen devrede kapasitör DC gerilimi ve invertör çıkış geriliminin kontrolü için akımın ve geriliminin aktif ve reaktif bileşenlerinden yararlanılmıştır. Park dönüşümü kullanılarak akımın aktif ve reaktif bileşenleri elde edilmiştir. I_d aktif bileşeni ile DC gerilimin kontrolü için V_q gerilim bileşeni kontrol edilmiş ve I_q reaktif bileşeni kullanılarak invertör çıkış geriliminin kontrolü için de V_d gerilim bileşeni kontrol edilmiştir. Sistemdeki AC ve DC akım/gerilim değerlerinin değişimleri per-unit olarak Şekil 7.17’de verilmiştir.



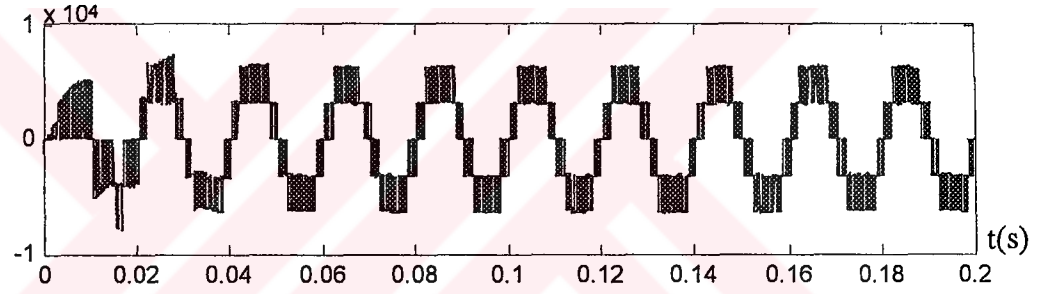
Şekil 7.17-a. V_{ref} ve V_y gerilimlerinin etkin değeri [pu]



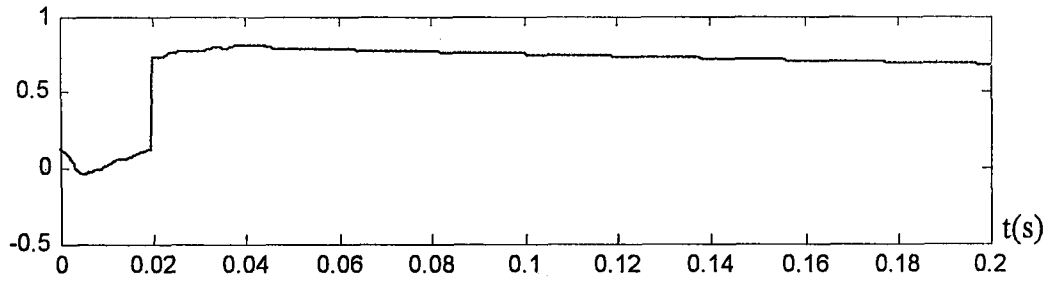
Şekil 7.17-b. Yük ($V_y=V_t$) gerilimi [pu]



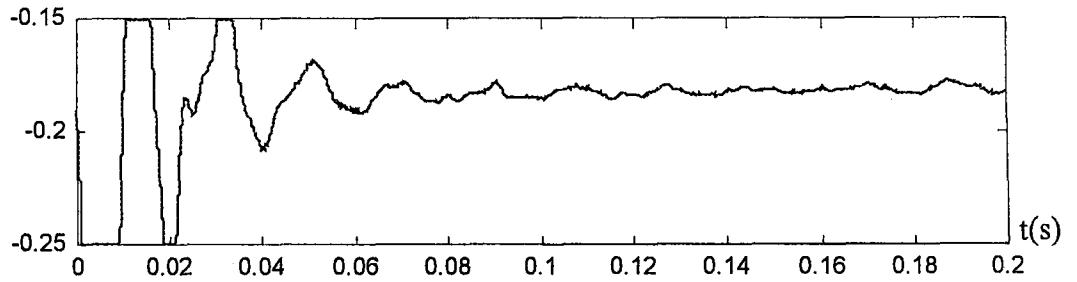
Şekil 7.17-c. V_{dc} geriliminin değişimi [V]



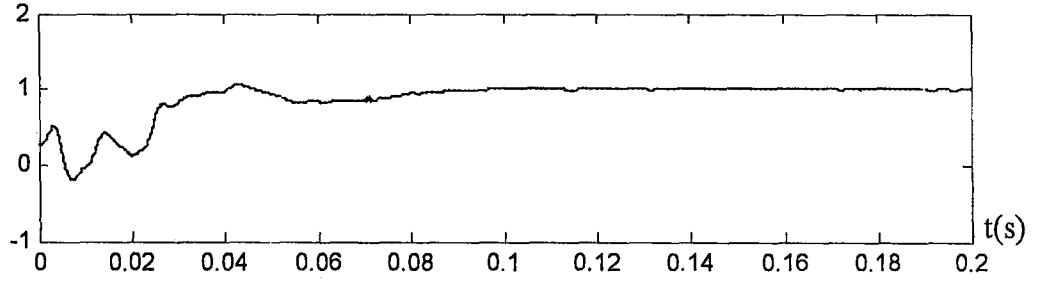
Şekil 7.17-d. İnvörtör çıkış (V_i) gerilimi [V]



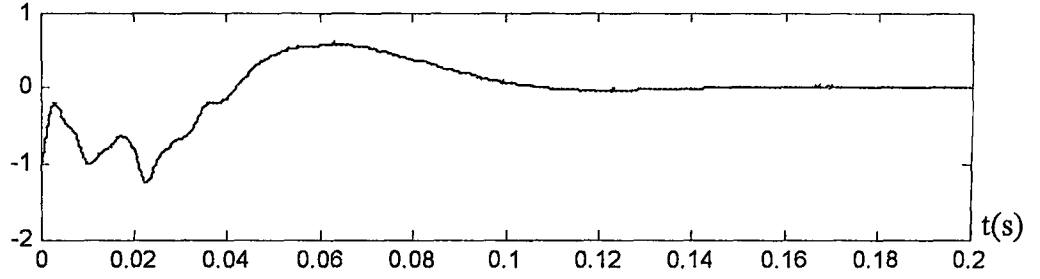
Şekil 7.17-e. V_{id} geriliminin değişimi [pu]



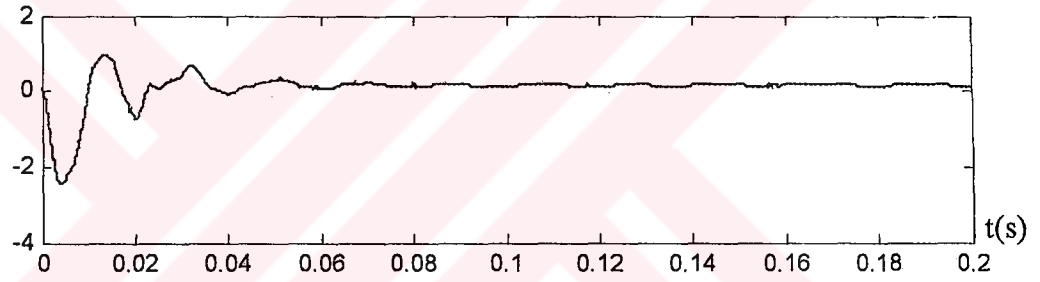
Şekil 7.17-f. V_{iq} geriliminin değişimi [pu]



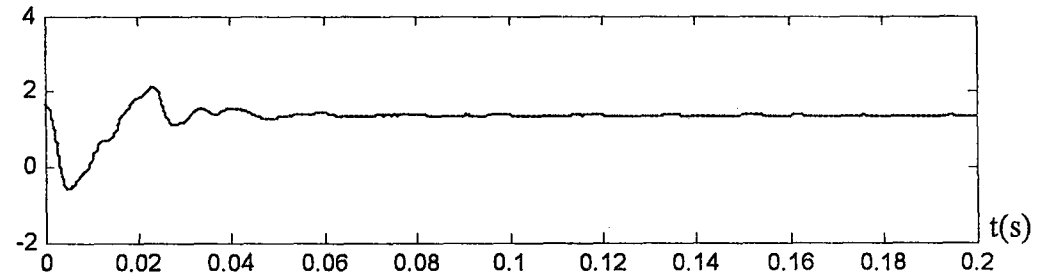
Şekil 7.17-g. V_{td} geriliminin değişimi [pu]



Şekil 7.17-h. V_{tq} geriliminin değişimi [pu]



Şekil 7.17-j. I_d akımının değişimi [pu]



Şekil 7.17-k. I_q akımının değişimi [pu]

Statcom dinamik denklemlerinden yararlanarak kontrol devresi oluşturulmuş ve sistem değişkenleri PWM kontrol tekniği ile belirlenen sınırlarda kontrol edilmiştir. PWM kontrol, Matlab/Simulink Power System Toolbox kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan Statcom uygulamaları sonuçları ile uyumludur. Dolayısıyla Statcom Matlab/Simulink modelinin geçerli bir model olduğunu söylemek mümkündür.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, enerji iletim sistemlerindeki akım, gerilim, faz açısı ve aktif/reaktif güç akışına FACTS cihazlarının etkisi incelenmiştir. Günümüzde mevcut iletim hatlarının beslediği elektriksel yükler genellikle endüktif karakterli olup zamanla değişen karakteristiğe sahiptirler. Yük değişimi çekilen akımın, yük geriliminin, hattaki gerilim düşümünün ve güç kayıplarının değişmesine neden olmaktadır.

SVC'nin güç sistemlerinde akım, gerilim ve aktif /reaktif güç akışına etkisini incelemek amacıyla Matlab/Simulink programı kullanılarak sabit ve kademeli olarak zamanla değişen endüktif yüklü enerji iletim sisteminde SVC ile reaktif güç kompanzasyonu yapılarak yük gerilimi kontrol edilmiştir. Birden fazla generatör ve yükten oluşan iletim sistemlerinde her bir yükün endüktif gücünün SVC kullanılarak %100'lük kompanzasyonu durumunda sistem bara gerilimlerinin değişimi ve yüke aktarılan gücün değişimi incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, güç sistemlerinde sabit veya kademeli olarak değişen yük durumlarında SVC kullanılarak çıkış geriliminin belirlenen limitlerde kontrol edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca yük baralarına bağlanan SVC reaktif güçleri değiştirilerek iletim hatlarından aktarılan gücün ve bara gerilimlerinin kontrol edilebilmesinin mümkün olacağı da görülmektedir.

Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC), enerji iletim sistemlerinde hattın seri reaktansının kontrol edilmesi ile hattan aktarılan aktif/reaktif güç akışının, hat üzerindeki gerilim düşümünün ve hat sonu gerilimi faz açısının kontrolü amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada TCSC empedansı (X_{TCSC}), $X_{hat}-1.2 X_{hat}$ aralığında değiştirilerek hattın maksimum %120'lik seri kompanzasyonu yapılmak suretiyle sabit ve zamanla değişen endüktif yüklü iletim sisteminde yük akımı ve gerilimi kontrol edilmiştir. Bunun yanı sıra beş baralı, yedi iletim hattından oluşan iletim sisteminde hatların seri empedansı ayrı ayrı %70 oranında kompanze edilerek bara gerilimleri ve yüke aktarılan gücün kompanzasyonsuz duruma göre değişimi Matlab/Simulink ortamında incelenmiştir. İletim

hatlarının endüktif seri reaktansının belirli oranda kompanzasyonu yapılarak sistemdeki güç akışının kontrol edilebileceğinin söylenmesi mümkündür.

İnvertör temelli FACTS cihazları, bağlı bulunduğu sistemden çekilen akımın yönünün veya büyüklüğünün değiştirilmesi ile endüktif veya kapasitif olarak çalışan güç akış kontrolörleridir. Bu çalışmada invertör temelli FACTS cihazlarından Statik Kompanzator (Statcom) kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu ile hat sonu geriliminin kontrolü yapılmıştır. Statcom dinamik denklemlerinden yararlanarak kontrol devresi oluşturulmuş ve sistem değişkenleri PWM kontrol tekniği ile belirlenen sınırlarda kontrol edilmiştir. PWM kontrol, Matlab/Simulink Power System Toolbox kullanılarak yapılmıştır. Sisteme aktarılan harmonik bileşenlerini azaltmak amacıyla üç seviyeli (three level) invertör ve ayrıca pasif filtre kullanılmıştır.

Statik yük durumları için FACTS cihazlarının dinamik analizi yapılmıştır. Enerji iletim sistemlerinde yükün zamanla değişmesi nedeniyle, FACTS cihazlarının zamanla Gauss eğrisi şeklinde değişen yük modeli veya aktif ve reaktif gücün frekans ve gerilimle değiştiği dinamik yük modelleri kullanılarak dinamik performans analizlerinin yapılması mümkündür.

Birden fazla generatör ve yükten oluşan karmaşık güç sistemlerinde güç akış analizi, gerilim kontrolü ve hattan aktarılan güç kapasitesinin artırılması konularında önemli problemler bulunmaktadır. Bu nedenle gelecekte birleşik güç akış kontrolörü kullanılarak bu sistemlerde oluşan problemlerin çözülmesine veya bunların etkilerinin minimuma indirilebilmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdulla M., Selameh Z., "The Effect of SVC's Elements and Power System's Parameters on Harmonics Magnification : An Experimental Study" , Electric Machines and Power Systems, 27:613-622, Francis, 1999.
- Baker R., Guth G., Egli W., and Eglin P., "Control Algorithm for a static phase shifting transformer to enhance transient and dynamic stability of large power system", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 101 (9), pp. 3532-3542, 1982.
- Canizares C. A., "Power Flow and Transient Stability Models of FACTS Controllers for Voltage Stability and Angular Stability Studies", IEE / PES WM Panel, Singapore, January 2000.
- Canizares C. A., Corsi S., Pozzi M., "Modeling and Implementation of TCR and VSI Based FACTS Controllers" University of Waterloo, pp. 1-32, September 1999
- Canizares A. C., Berizza A., Maranino P., "Using FACTS Controllers to Maximize Available Transfer Capability", Bulk Power System Dynamics and Control IV, Santarino, Greece, August, 1998.
- Canizares C. A., Uzunovic E., Reeve J., and Johnson B. K., "Transient Stability Models of Shunt and Series Static Synchronous Compensators", Submitted for publication in IEEE Trans. Power Delivery and available upon request, December 1998.
- Chang C. S., and Huang J. S., "Optimal multiobjective SVC planning for voltage stability enhancement", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 2, pp. 203-209, 1998.
- Ekonayake J. B., Jenkins N., "A three-level Advanced Static VAR Compensator", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996
- Faur Zeno T., "Effects of FACTS devices on Static Voltage Collapse Phenomena", University of Waterloo, pp. 12-35,40-43, 52-54, Ontario, Canada, 1996

- Gotham D.J., and Heydt G.T., "Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 1, pp. 60-65, 1998.
- Guth G., Baker R., and Eglin P., "Static thyristor controller regulating transformer for AC-Transmission", AC and DC Transmission Conference Record, London, pp.69-72, 1982.
- Gyugyi L., "Solid-State Synchronous Voltage Sources for Dynamic Compensation and Real-Time Control of AC Transmission Lines", Emerging Practices in Technology, IEEE- Transmission Lines, IEEE Standards Press, Piscataway, USA, 1993
- Hingorani N. G., and Gyugyi L., "Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission system", IEEE Press, New York, 1999
- Hingorani N.G., "Flexible AC Transmission, System, IEEE Spectrum, pp.40-45, April 1993
- Huayuon Chen, Yuyi Wang, Rujing Zhav, "Transient stability enhancement via coordinated excitation and UPFC control" Electrical Power and Energy Systems 24 (2002), pp.19-29, 2002.
- Huang G. M., Ping Y., "The Impacts of TCSC and SVC on Power System Load Curtailment", IEEE Winter Conference, 2001
- Ibrahim M. A., and Stacom F. P., "Phase angle regulating transformer protection", IEEE Transactions on Power Delivery, 9,(1), pp.394-402, 1994
- Karady George G, "New Technologies in FACTS and Distribution Engineering", Future Research Directions for Complex Interactive Electric Networks NFS/DOE/EPRI Sponsored Workshop, Nov 16-17, 2000.
- Larsen E. V., Sanchez-Gasca J. J., Chov J. H., "Concepts for desing of FACTS controllers to damo. Power Swings, IEEE Trans. Power System, vol.12, no.1, pp. 364-371, Jan. 1997.
- Li F., Li B., and Zheng X., "Coordination of power flow control in large power systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, No. 4, pp. 776-781, November 2001.

- Mithulananthan N., Canizares C. A., Reeve J., "Hopf Bifurcation Control in Power Systems Using Power System Stabilizers and Static Var Compensators" North American Power Symposium (NAPS), San Luis Obispo, California, October 1999.
- Nyati S., Eitzmann M., Kappenman J., Van Hause D., Mohan N., and Edris A., "Design issues for a simple core transformer thyristor controlled phase-angle regulator", IEEE Transactions on Power Delivery, 10 (4), pp. 2013-2019, 1995
- Papic I., Zunko P., and Povh D., "Basic Control Unified Power Flow Controller", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 12, No.4, pp. 1734-1739, November 1997.
- Preedavichit P., and Srivastava S.C., "Optimal reactive power dispatch considering FACTS devices", Electric Power Systems Research, Vol. 46, pp. 251-257, 1998.
- Rico J. J., Acha E., Miller J.J., "Harmonic Domain Modeling of Three phase Thyristor-Controlled Reactors by Means of Switching Vectors and Discrete Convolutions", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 11, No.3, July 1996
- Rossi Del A., Canizares A. C., Quintana V., Dona V., "Stability Improvement Using TCSC in Radial Power Systems", NAPS-2000, Waterloo, on October 2000.
- Sadikovic R.P., Glavič M., "Effect of FACTS devices on steady state voltage stability", 1.st Balkan Power Conference, Slavonig, September 2001.
- Sahoo N. C., Panigrahi B. K., Dash P. K., Panda G., "Application of multivariable feedback linearization scheme for STATCOM control", Electric Power systems Research vol, 62, pp. 81-91, 2002
- Schauder C. D., Gyugyi L., Lund M. R., Hamai D. M., Rietman T.R., Torgerson D. R., and Edris A., "Operation of the Unified Power Flow Controller (UPFC) Under Practical Constraints", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp. 630-639, April 1998
- Schauder C. D., Gyugyi L., Lund M. R., Stacey E., Kovalsky L., Keri A., Mehraban A., and Edris A., "AEP UPFC Project: Installation, Commissioning and Operation of the ± 160 MVA Statcom", IEEE/PES paper PE-515-PWRD-O-12-1997

- Song Y. H., and Johns A. T., "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", The Institution of Electrical Engineers, pp. 30-55, 237-241, 243-259, 268-295, London, United Kingdom, 1999
- Stevenson W. D., "Elements of power system analysis" McGraw Hill, New York, 4. th edn, pp. 214-216, 1982.
- Sybille G., Huy H. L., "Digital Simulation of Power Systems and Power Electronics using the Matlab/Simulink Power System Blockset", IEEE Power Engineering Society-Winter Meeting 2000 Special Technical Session, 2000.
- Thukaram D., and Lomi A., "Selection of static VAR compensator location and size for system voltage stability improvement", Electric Power Systems Research, Vol. 54, pp. 139-150, 2000
- Uzunovic E., Canizares C. A., Reeve J., "Fundamental Frequency Model of Unified Power Symposium (NAPS), Cleveland", Ohio, pp. 294-299, October 1998
- Uzunovic E., Canizares C. A., Jeeve J., "Fundamental Frequency Model of Static Synchronous Compensator, North American Power Symposium (NAPS), pp. 49-54, October 1997
- Uzunovic E., Canizares C. A., and Reeve J., "Fundamental Frequency Model of Static Synchronous Compensator", Proc. NAPS, Laramie, Wyoming, pp.49-54, October 1997.
- Yalçınöz T., Erbaş H., Yücel İ., "Esnek Alternatif Akım İletim Sistemlerinde Kullanılan Elemanlar", Kaynak Elektrik, 2001/Kasım.
- Yalçınöz T., Erbaş H., Yücel İ., "Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri ve Uygulama Alanları", Kaynak Elektrik, 2001/Kasım.
- Yan O., Chanan S., "Improvement of Total Transfer Capability Using TCSC and SVC", IEEE Power Engineering Soc: Summer Meeting, Vol 2, pp. 944-948, 2001.