

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Güç Kalitesi ve güç kal. Kont.

Yüksek Lisans Tezi

Engin Pehlivan Türk

2005

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE VE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Yer No (DDC): R152/423

Kayıt No

2574

Geldiği Yer

Fen Bilim. Enst.

Tarih

18.05.2005

Fiyat

6.10.-

Fatura No

-

Ayniyat No

1/7

Ek

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

XI-101

**GÜÇ KALİTESİ ve
GÜÇ KALİTESİ KONTROLÖRLERİ**

Elektrik Müh. Engin PEHLİVANTÜRK

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. M. Salih TACİ

Y. Doç. Dr. Ömer Gül

Prof. Dr. A. Kanyılmaz

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. ELEKTRİK ENERJİSİNDE KALİTE	1
1.1 Kalitesiz Elektriğin Maliyeti	5
2. GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİ.....	11
2.1 Güç Kalitesi Problemlerinin Sınıflandırılması	11
2.1.1 Frekans Olayları	11
2.1.2 Gerilim Olayları.....	11
2.1.3 Dalga Şekli Olayları	12
2.2 Güç Kalitesi Problemlerinin Kaynakları	12
2.3 Güç Kalitesi Problemleri Nelerdir?	15
2.3.1 Geçici Olaylar.....	15
2.3.2 Kısa Süreli Gerilim Değişimleri.....	15
2.3.3 Uzun Süreli Gerilim Değişimleri.....	16
2.4 Harmonikler, Nedenleri ve Etkileri	17
2.4.1 Harmonikleri Oluşturan Donanım Tipleri	19
2.4.2 Teorik Esaslar – Harmoniklerin Oluşumu.....	19
3. GÜÇ AKIŞ KONTROLÜNÜN TEMELLERİ (FACTS)	22
3.1 Aktif ve Reaktif Güç Akışı Kontrolü	22
3.2 Tristör Tabanlı FACTS Kontrolörleri	25
3.3 GTO Tabanlı FACTS Kontrolörleri	28
3.4 Statik Var Kompanzatör (SVC).....	30
4. TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KOMPAZASYON (TCSC)	32
5. VSC ve TEMEL ÇALIŞMA PRENSİPLERİ	37
5.1 Giriş	37
5.2 Yüksek Güç Gate Turn-Off Yarı İletken Cihazlar	37
5.3 VSC' nin Temel İşletim Prensipleri	38

5.3.1	Temel Devre Konfigürasyonu	38
5.3.2	İşletim Sistemi ve Temel İlişkiler.....	40
5.3.3	Harmoniklerin Azaltılması	44
5.3.4	12 Darbeli Konvertör.....	44
5.3.5	Darbe Genişlik Modülasyonlu (PWM) Konvertör	45
6.	STATİK SENKRON KOMPANZATÖR (STATCOM).....	48
6.1	STATCOM'un Yapısı Ve Temel İşletim Prensipleri	48
6.1.1	STATCOM Kontrol Sistemi.....	57
6.1.2	Test Sistemi	57
6.1.3	İşletim Sistemi	58
6.2	Gerilim Dalgalanmalarının D-STATCOM İle Düzeltilmesi	60
6.2.1	Harmoniklerin Elimine Edilmesi.....	62
6.3	STATCOM Uygulamaları	62
6.3.1	Giriş	62
6.3.2	ABB, Güç Kalite Filtresi (PQF)	63
6.3.3	Siemens Power Combitioner Paralel (Sipcon P/dSTATCOM).....	64
6.3.4	ALSTOM T&D (150 MVar STATCOM).....	65
7.	STATİK SENKRON SERİ KOMPANZATÖR (SSSC).....	66
7.1	SSSC Elemanlarının Nominal Değerleri	69
8.	DİNAMİK GERİLİM DÜZENLEYİCİ (DVR)	70
8.1	Giriş	70
8.2	Gerilim Dalgalanmasının DVR İle Düzeltilmesi	71
8.2.1	Sıfır Aktif Güç İlavesi (ZAPI).....	72
8.2.2	Minimum Görünür Güç İlavesi (MAPI).....	73
8.3	DVR Uygulamaları.....	73
8.3.1	Siemens Sipcon S-DVR	73
8.3.1.1	Aseas Brown Boveri (ABB)	74
8.4	DVR Kurulumunun Ekonomik Önemi.....	75
9.	BİRLEŞTİRİLMİŞ GÜÇ AKIŞ KONTROLÖRÜ (UPFC)	77
9.1	Giriş	77
9.2	UPFC' in Yapısı Ve Çalışma Prensipleri	77
9.3	İnverterin Yapısı ve Çalışma Prensipleri.....	79
9.4	UPFC' in Kontrolü	81
10.	GÜÇ KALİTESİ KONTROLÖRLERİNİN UYGULAMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI	84
10.1	Giriş	84
10.2	STATCOM ve SVC' nin Karşılaştırılması.....	84
10.3	TCSC ve SSSC' in Karşılaştırılması	86
10.4	DVR ve D-STATCOM' un Karşılaştırılması.....	88
10.4.1	DVR.....	89
10.4.2	D-STATCOM.....	91
10.5	UPFC ile STATCOM VE SSSC' nin Karşılaştırılması	93
11.	SONUÇLAR.....	95

P	Aktif güç
V_L	Hat sonu faz-faz gerilimi (kV)
X_L	Hat reaktansı (Ω)
δ	Hat sonundaki gerilimler arası faz açısı ($^\circ$)
V_s, E_s	Hat baş gerilimi
V_r, E_r	Hat sonu gerilimi
V_{inj}	Hata verilen gerilim (enjektasyon gerilimi)
R_s	Hat akımı
Z_s	Sistem empedansı
L_s	Hat parzeli akımı
V_{SSC}	SSSC çıkış gerilimi
X_m	Transformatörün reaktansı
X_n	Endüktif reaktans
Q_n	N. Transistör voltajı
D_n	N. Diyot
β	Hatın açısı
α	Tristör tetikleme açısı

SİMGE LİSTESİ

P	Aktif güç
V	Hat sonu faz-faz gerilimi (kV)
X	Hat reaktansı (Ω)
δ	Hat sonundaki gerilimler arası faz açısı ($^{\circ}$)
V_S, E_S	Hat başı gerilimi
V_R, E_R	Hat sonu gerilimi
V_{pq}	Hatta verilen gerilim (enjeksiyon gerilimi)
I_{hat}	Hat akımı
Z_{th}	Sistem empedansı
I_{sh}	İlave paralel akım
V_{SSSC}	SSSC çıkış gerilimi
X_{tr}	Transformatörün reaktansını
X_L	Endüktif reaktans
Q_n	N. Tristör valfi
D_n	N. Diyot
β	İletim açısı
α	Tristör tetikleme açısı

KISALTMA LİSTESİ

DVR	Dinamic Voltage Restorer	8
ESD	Energy Storage Device	18
FACTS	Flexible AC Transmission System	19
MOV	Metal Oxide Varistor	20
STATCOM	Static Synchronous Compensator	21
SVC	Static Var Compensator	21
TCR	Thyristor Controlled Reactor	23
TCSC	Thyristor Controlled Serial Capacitor	30
THD	Toplam Harmonik Distorsiyon	32
UPFC	Unified Power Flow Controller	33
VSC	Voltage Sourced Converter	33
SSSC	Static Synchronous Serial Compensator	34
EPRI	Electrical Power Research Institute	35
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	40
PWM	Pulse Width Modulation	42
TSC	Thyristor Switched Capacitor	43
GTO	Gate-Turn Off Tyristor	47
SMPS	Switched Mode Power Supplies	48

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	ITIC eğrisi (Chapman,2001)	8
Şekil 2.1	Temel harmonikle 3. ve 5. harmonikler	18
Şekil 2.2	Bozuk akım dalga şekli	19
Şekil 2.3	Doğrusal bir yükte akım dalga şekli.....	20
Şekil 2.4	Doğrusal olmayan yükte akım dalga şekli	21
Şekil 2.5	Doğrusal olmayan yüke ait eşdeğer devre	21
Şekil 3.1	(a) Aktif ve reaktif güç akışı için hat modeli (b) Yük açısı ve eğrisi.....	23
Şekil 3.2	SVC V-I Karakteristiği	30
Şekil 4.1	Seri kompanzasyon tek-hat şeması	32
Şekil 4.2	Hat kısmen dengede iken mevcut empedans	33
Şekil 4.3	S ve R bölgelerine bağlı iletim hattı.....	33
Şekil 4.4	Dört adet tristör kontrollü seri kondansatörlü iletim hattı.....	34
Şekil 4.5	Verici / Alıcı durumları için devre şekli	35
Şekil 5.1	Üç fazlı iki kademeli VSC devresi.....	40
Şekil 5.2	Eşdeğer devre (a)0°-30° (b)90°-120°	42
Şekil 5.3	12-darbeleri VSC(Gyugyi, 1994).....	45
Şekil 5.4	PWM kontrollü VSC nin EMTP cevabı.....	47
Şekil 6.1	STATCOM' a ait V-I Karakteristiği	49
Şekil 6.2	STATCOM'un temel yapısı.....	50
Şekil 6.3	Statik var kompanzatörü için dalga şekilleri ve konverter şeması	52
Şekil 6.4	Statik senkron kompanzatörün çalışma prensibi.....	53
Şekil 6.5	E_{An} değerine bağlı olan E_{Un} 'in fazör diyagramları.....	54
Şekil 6.6	STATCOM fazör diyagramları; (a) AC bölge, (b) DC bölge.....	55
Şekil 6.7	STATCOM fazör diyagramı (a)kalıcı hal (b) kapasitör şarjı (c) kapasitör deşarjı ...	57
Şekil 6.8	10 Terminalli test sistemi (Uzunovic, 2001).....	58
Şekil 6.9	STATCOM'a seri bağlı 12 darbeleri devre.....	59
Şekil 6.10	D-STATCOM' un şematik diyagramı	60
Şekil 7.1	SSSC yapısı.....	66
Şekil 7.2	SSSC fazör diyagramı	67
Şekil 7.3	SSSC vektör diyagramı ve tek hat şeması.....	68
Şekil 8.1	DVR şematik diyagramı.....	71
Şekil 8.2	Bonlac Foods tek hat şeması.	75
Şekil 9.1	UPFC yapısı ve genel bağlantı şekli.	77
Şekil 9.2	UPFC'nin sisteme gerilim ilavesi ve ilgili fazör diyagramları	78
Şekil 9.3	Üç kademeli inverter kutbu ve çıkış gerilimi	79
Şekil 9.4	6-darbeleri, 3 kademeli inverter ve çıkış gerilimleri	80
Şekil 9.5	3-kademe kutuplarla bir harmonik analizör inverter konfigürasyonu.....	81
Şekil 9.6	NYPA santraline ait CSC yapısı(Abdel, 2002).....	82
Şekil 10.1	Kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz haldeki P-δ karakteristiği (a) STATCOM cevabı (b) SVC nin cevabı (Gyugyi, 1994)	85
Şekil 10.2	Alanların Eşitliği Kriteri (a)STATCOM ve (b) SVC (Gyugyi, 1994).....	86
Şekil 10.3	İletilen gücün δ açısına bağlı değişimi.....	88
Şekil 10.4	Gerilim dalgalanması ile DVR' ın eklenen görünür gücünün değişimi(Haque, 2001).	90
Şekil 10.5	Çeşitli yük seviyeleri için DVR' ın minimum görünür güç ilavesi(Haque, 2001).	91
Şekil 10.6	Gerilim dalgalanması ile D-STATCOM' un görünür gücünün değişimi(Haque, 2001)	92
Şekil 10.7	Çeşitli hata seviyeleri için D-STATCOM un minimum görünür güç ilavesi.(Haque, 2001).	92

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Sektörlere göre finansal kayıplar	9
Çizelge 2.1 Güç kalitesi problemleri ve koruma ekipmanları.....	14
Çizelge 3.1 Güç akış kontrolörleri ve etkinlik bölgeleri	27
Çizelge 3.2 Farklı FACTS kontrolörlerinin bağlantı şemaları	29
Çizelge 5.1 İki kademeli VSC de anahtarlama sırası	41
Çizelge 5.2 Faz-Nötr gerilimleri için anahtarlama kombinasyonu	42
Çizelge 9.1 CSC konfigürasyonları(Abdel, 2002).	82
Çizelge 10.1 FACTS kontrolörlerinin karşılaştırılması.	94

ÖNSÖZ

Çalışmam süresince beni destekleyen aileme, işlerimi bırakıp tez çalışmam için üniversiteye gittiğim zamanlarda yokluğumu aratmayan mesai arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilir ve yardımlarını esirgemeyen Yrd.Doc.Dr. M. Salih Taci'ye teşekkürlerimi sunarım.

Teknolojinin gelişimi ile sanayide kompleks süreçlerin ve sistemlerin kullanımı artmıştır, bu anlamda ise klasik anlamda kompanzasyon yeterli kalmamıştır. Sistemlerin geçici ve kalıcı hal durumlarında yüksek teknoloji ürünleri kullanılarak geliştirilen FACTS elemanlarının kullanımı artmıştır.

Bu tezde STATCOM, SSSC(DVR), UPFC gibi kontrolörler açıklanarak FACTS in özünü verilmektedir. Ayrıca bu FACTS bileşenlerinin ana devre ve bağlantı şekli verilerek temel işletim prensipleri açıklanmıştır.

Araştırmanın son bölümünde STATCOM ve SVC, STATCOM ve DVR, TCSC ve SSSC arasında karşılaştırmalar yapılmış ve FACTS kontrolörlerinin birbirinden farklı yanları maddeler halinde özetlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Gç, Kalkıcı, VSC, STATCOM, SSSC, UPFC.

ÖZET

Araştırma konusunun tam olarak anlaşılabilmesi için elektrik enerjisinde kalite ve bu kaliteyi bozan etkenler tanımlanmıştır. Sabit ve güç elektroniği elemanları ile sistem ihtiyacına göre devreye alınan AC kapasitör ve reaktörler klasik manada kompanzasyonun temel bileşenleri idi. Teknolojinin gelişimi ile sanayide kompleks prosedürlerin ve sistemlerin kullanımı artmıştır; bunun neticesinde ise klasik manada kompanzasyon yetersiz kalmaya başlamıştır. Sistemlerin geçici ve kararlı hal çözümlerinde yüksek teknoloji ürünleri kullanılarak geliştirilen FACTS elemanlarının kullanımı şarttır.

Bu tezde STATCOM, SSSC(DVR), UPFC gibi kontrolörler açıklanarak FACTS in önemi vurgulanmaktadır. Ayrıca bu FACTS bileşenlerinin ana devre ve bağlantı şekli verilerek temel işletim prensipleri açıklanmıştır.

Araştırmanın son bölümünde STATCOM ve SVC; STATCOM ve DVR; TCSC ve SSSC arasında karşılaştırmalar yapılmış ve FACTS kontrolörlerinin birbirinden üstün yanları maddeler halinde özetlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Güç Kalitesi, VSC, STATCOM, SSSC, UPFC.

ABSTRACT KÜÇÜK ENERJİSİNDE KALİTE

To understand the subject of this thesis, Power Quality and the factors which demolishes the Power Quality are explained . Fixed and thyristor controlled capacitors and reactors was the basic components of the classical compensators. Along the new technologys and complex procedurs in industry, the classical methods became poor. It is definitely must be realized founding of the FACTS conrtollers for the Transient and Steady State of the Power Systems.

This thesis gives an overview of the emerging FACTS technology with emphasis on the SVC, TCSC, STATCOM, DVR, SSSC and UPFC controllers. The basic operating principles of the controllers are explained in this thesis, together with the main circuit configurations of the controllers.

In the last chapter of this thesis a comparison between STATCOM and SVC; TCSC and SSSC; DVR and D_STATCOM is given. And superior sides of FACTS kontrollers are summarized item by item.

Keywords: Power Quality, VSC, STATCOM, SSSC, UPFC.

1. ELEKTRİK ENERJİSİNDE KALİTE

Endüstriyel ve ticari faaliyetlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli önemli girdilerin başında elektrik enerjisi gelmektedir. Elektrik enerjisi insanoğlu tarafından sürekli olarak kullanılan - istenildiği gibi stoklanamayan - kullanım öncesinde kalitesi güvence altına alınamayan bir uygarlık aracıdır. Elektrik enerjisinin istenilen her noktaya, istenilen zamanda kontrole ihtiyaç göstermeden ulaştırılması günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan Just in Time' felsefesine bir örnek olarak algılanabilir. Ancak, başarılı ve verimli bir 'Just in Time (JIT)' uygulaması için girdi özelliklerinin gerekli ölçüde kontrol edilmesi, özelliklere uygun üretilmesi, kullanıcıya zamanında ulaştırılması, üreticiye güven duyulması ve sınır değerleri ile genel performans spesifikasyonlarına uyulması gerekmektedir.

Kritik operasyonlara ait verilen bu örnekler dışında, kaliteli enerji ihtiyacının son derece büyük önem taşıdığı çok sayıda başka operasyonlar vardır. Bilgisayar ortamında satış ve stok kontrolü yapan perakendeci kuruluş ile geniş pazarlama ve dağıtım kontrol sistemleri çalıştıran imalatçı kuruluşlar örnek olarak verilebilir.

“Enerji kalitesi ile ne ifade edilmek istenmektedir?” sorusuna verilecek yanıt, “mükemmel bir elektrik enerjisi kaynağı her zaman kullanıma hazır, gerilim ve frekans değerleri toleranslar dahilinde, tamamen gürültüsüz ve sinüs eğrisi şeklinde dalga formuna sahip elektrik üreten enerji kaynağıdır” şeklinde olacaktır. Mükemmellikten sapmanın hangi ölçüde tolere edilebileceği ise kullanıcı uygulamalarına, tesis edilen cihazların tipine ve kullanıcının kendi ihtiyaçlarına olan bakış açısına bağlı olarak değişebilir.

Elektrik enerjisinde kalite bozuklukları - mükemmellikten sapma - beş kategori altında incelenebilir.

- Harmonik bozulma
- Sistem oturmaları
- Düşük veya aşırı gerilim
- Azalma (veya dalgalanma) ve darbeler
- Geçici olaylar

Bu problemlerin her birinin nedeni diğerinden farklı olup bazı problemler altyapının ortak kullanılmasından kaynaklanır. Örneğin, ana dağıtım sisteminde oluşan bir arıza gerilim

azalmasına yol açarak bazı müşterileri etkiler. Arızanın büyüklüğüne göre çok daha fazla sayıda müşteri etkilenebilir veya bir müşteriye ait arıza aynı alt sistemden beslenen diğer müşterilerin hepsinde geçici etkiler yaratabilir. Harmonikler gibi müşterinin kendi tesisinden kaynaklanan bazı problemler dağıtım sistemine yayılarak başka müşterileri etkileyebilir. İyi hazırlanmış tasarım ve doğru cihazların seçimi ile harmonik problemlerinin önlenmesi mümkündür.

Elektrik dağıtımını yapan kuruluşlar, kaliteli elektriğin gerekli maliyetlere katlanarak kullanıcıların kendileri tarafından temin edilmesi gerektiğini savunmaktadırlar. Çok sayıda geniş bir kullanıcı kesimini besleyecek kaliteli elektriğin üretilmesi ve garanti edilmesi yüksek yatırım harcamaları gerektirir ve sınırlı sayıdaki müşterilerin ihtiyacına cevap verebilir ve ekonomik olmayabilir. Normal olarak sistemden beslenme hakkına sahip herhangi bir müşterinin, mevcut sosyal ve yasal çerçeve içerisinde bu hakkını kullanmasında teknik olarak bazı sorunlar ortaya çıkabilir. Örneğin, tesisat ile ilgili kazıların yapılması sırasında yeraltı kabloları zarar görebilir, şiddetli rüzgar ve dondurucu soğuklar gibi hava şartları havai hatlarda tamiri zor ve masraflı arızalara yol açabilir. Bu nedenlerden dolayı, elektriğin istenilen kalitede istenilen noktalara ulaştırılması için gerekli işlemlerin yapılması müşterinin kendi sorumluluğunda olmalıdır. Bu şekilde elde edilen elektriğin kalitesi bağımsız bir tedarikçi tarafından verilen elektriğin kalitesinden daha yüksek olacaktır.

Elektrik teminindeki kalite problemlerinin etkilerini ortadan kaldırmak veya azaltmak için çeşitli mühendislik çözümleri mevcut bulunmakta ve bu alanda yeni gelişmeler kaydedilmektedir. Dolayısıyla, kullanıcıların çözümler, avantajlar ve maliyetler konusunda bilgilendirilmeleri gerekmektedir. Belli sorunlar ve çözümleri bu tezin daha sonraki bölümlerinde ayrıntılı olarak verilmektedir.

Kullanıcılar ihtiyaç duydukları kalitede elektrik elde etmek için yapılması gereken yatırıma karar verebilmelidirler. Yerleşim bölgelerinde karşılaşılabilecekleri enerji kalitesi ile ilgili problemlerin nitelik ve nicelikleri hakkında yeterli bilgiye sahip olmaları son derece önemlidir. Maalesef bu konuda yayımlanmış çok az istatistiksel bilgi mevcuttur ve ortaya çıkabilecek problemlerin ve alınacak önlemlerin maliyetleri hakkında bilgi toplamakta çeşitli sorunlarla karşılaşilmektedir. Örneğin, İngiltere’de bir tedarikçinin sadece bir dakikadan daha uzun süren kesintiler hakkında vermiş olduğu bilgilere göre; 1998 ve 1999 döneminde her bir tüketici ortalama olarak 15 ayda bir, yaklaşık 100 dakikalık bir kesinti yaşamakta ve elektriğin sürekli kullanılabilirlik oranı % 99.98 olmaktadır. İşte bu % 0.02’lik fark sorunlara yol açmaktadır. Tedarikçilerin çoğunluğu tarafından rapor edilen performans düzeyi, daha

önceki kayıtlara ait bilinen en yüksek performans düzeyine yakındır ve en iyi ile en kötü performanslar, ortalamanın sırasıyla % 50'si ve % 200'ü civarındadır. Dolayısıyla, ulaşılan mevcut performans düzeyi ekonomik olarak ulaşılabilecek en yüksek seviyeye yakın gibidir (Chapman,2001).

Görülebileceği gibi bu rakamlar bir dakikadan daha uzun kesintileri kapsamakta, 0.1 ile 5 saniye aralığında meydana gelen çok sayıdaki kısa süreli kesintileri kapsamamaktadır. Halbuki; bazen kısa süreli bir kesintinin maliyeti, bir saatlik bir kesintinin maliyeti kadar hatta daha fazla olabilir.

İşte bu noktada kısa süreli kesintiler ile gerilim düşmeleri, tedarikçi ve müşteri arasındaki yaklaşım farkını ortaya koymaktadır. Şayet sisteme bir monitör yerleştirilmemişse, kısa süreli kesintilerin kanıtlanması zordur. Hatta bir iş kaybının, belli bir olaya atfedilmesi çok daha zordur. Sonuç itibariyle; kesinti maliyetleri konusunda tedarikçi kuruluşlar veremedikleri elektriğin maliyetini, tüketiciler ise üretim kaybı sonucu uğradıkları gelir kaybının maliyetini dikkate almaktadırlar. Kıyaslamalı olarak elektrik ucuz ve kesinti kısadır, fakat üretim kaybının (yarıiletkenlerde olduğu gibi) ve tekrar normal üretime geçiş (kağıt, metal, cam vb. sanayinde olduğu gibi) maliyetleri çok daha yüksektir. Görüldüğü gibi, gerilim azalmalarının önemi ve problemlerin tespiti maksadıyla kullanılması gereken cihazlar için yapılacak yatırım harcamaları bakımından tarafların konuya bakış açıları birbirinden oldukça farklıdır.

Genel olarak uzun süreli kesintilerin tedarikçilerden kaynaklandığı düşünülür, ancak bu kesintiler sistemde kullanılan cihazlardan, iletkenlerden ve çeşitli bağlantılardan kaynaklanabilir. İstenilmeyen durumların ortaya çıkmasını engelleyici teknikleri içeren dikkatli hazırlanmış tasarımlar olumsuz etkileri en aza indirebilir. Amaç; arıza noktalarını belirleyerek engelleyici cihazlar kullanmak veya alternatif besleme imkanları tesis ederek arızaya rağmen prosesin sürekliliğini sağlamaktır. Bu şekilde tasarımılanan sistemlerin bakımı daha kolaydır ve mutlaka daha iyi sonuçlar alınır. Bakım işlemlerinin önleyici tasarım kavramının bir parçası olarak başlangıç aşamasında oluşturulması çok önemlidir. Kısa ve uzun süreli güç kesintilerine karşı yedek jeneratör ve UPS sistemleri önleyici tasarımın vazgeçilmez unsurları olarak algılanmalıdır.

Gerilim azalmaları ve kesintilerin büyük çoğunluğu iletim ve dağıtım sistemlerinden kaynaklanmaktadır ve tedarikçinin sorumluluğu altındadır. Harmonik ve kompanzasyon problemlerinin sorumluluğu ise hemen hemen tümüyle tüketiciye aittir. Tesisatlardaki problemlerin nedeni harmonik akımlardır; bir tesisatta oluşan harmonik akımlar ortak bağlantı

noktasına geri dönerek besleme empedansına ulaştığında bir harmonik gerilim meydana gelmektedir. Bu gerilim bozulması, veya en azından bu oluşumun bazı bileşenleri, sistemin her tarafına dağılarak tüm iletim sistemlerindeki (örneğin, transformatörlerin lineer olmayan özelliklerinden dolayı) mevcut harmonik gerilim bozulmaları ile birleşirler. Tüketiciler, harmonik akımın sınırlanması kaydıyla, belirli aralıktaki gerilim oynamalarına rağmen faaliyetlerini sürdürebiliyorlar. Bu sınırlamalar ile ilgili birçok ulusal uygulama, İngiltere elektrik endüstrisi G5/1 orijinli (bugünkü G5/4) standart esas alınarak hazırlanmıştır. Son 40 yıl içinde önemli ölçüde doğruluğu kanıtlanmış olan bu planlama standardında yer alan bozuk gerilim limitleri belli bir esasa dayanılarak belirlenmemiştir (Chapman,2001). Harmonik kaynağının saptanması zor olduğundan tüketiciler genellikle tedarikçileri sorumlu tutarlar. Aslında, harmonik problemlerinin tesisat dışı nedenlerden kaynaklanması son derece enderdir - nedenlerin hemen hemen her zaman tesisatta kullanılan cihazlardan ve uygulamalardan kaynaklandığı görülmüştür

Geçici gerilim bozulmaları, kaynak akımının bir çevriminden çok daha kısa süren yüksek frekans olaylarıdır. Yük anahtarlamaları ve dağıtım sistemindeki yıldırım darbeleri ile tüketici bölgesinde veya aynı devre üzerinde yer alan diğer bölgelerdeki reaktif yük anahtarlamaları bu bozuklukların nedenleri arasındadır. Geçici olayların şiddeti tesisatta ve tesisata bağlı cihazlarda ciddi hasar yaratacak seviyede, örneğin bir kaç bin volt düzeyinde olabilir. Elektrik tedarikçileri ve telekomünikasyon firmaları geçici etkilerin meydana gelmesini ve müşteri sistemlerine yayılmasını önlemek için bazı çalışmalar sürdürmektedirler. Geçici olayların belli bir hasara yol açmasa bile bilgi işlem sistemlerinde, veri bozulmalarından dolayı karışıklıklara neden olacağı dikkatlerden uzak tutulmamalıdır. Geçici olayların oluşumu ve olumsuz etkileri, güvenilirliği yüksek topraklama sistemleri kullanılarak önemli ölçüde azaltılmaktadır. Güvenilir bir topraklama sisteminde tesisatın pek çok noktasından toprağa ve yeraltına çok sayıda bağlantı yapılmakta, bu şekilde geniş bir frekans bandı aralığı içinde empedans en küçük değerlere indirilerek sistemin bütünlüğü güvence altına alınmaktadır.

Elektrik enerjisinde kalite problemleri tasarımcılar açısından son derece önemlidir. Tasarımcılar “İyi ne ölçüde yeteri kadar iyidir?” gibi cevabı verilemeyecek kadar zor olan bir soru ile karşı karşıyadırlar. Bilindiği gibi, gerilim azalmasının belli bir cihaz üzerindeki etkisini somut olarak saptamak oldukça kolaydır, zor olan: yeni müşterilerin devreye girmesi ve cihaz ilave ve değişimleri nedeniyle ortaya çıkan gerilim azalmalarının besleme sisteminin ihtimal olarak hangi noktasında meydana geleceğini bilmektir

Elektrik enerjisinde kalitenin garanti altına alınması, başlangıç aşamasında iyi tasarım, etkin

ve uygun cihaz seçimi, tedarikçi ile işbirliği, sürekli kontrol ve dikkatli bakım gerektirmektedir. Diğer bir ifade ile; bütünlük ilkesine dayalı bir yaklaşım içerisinde güç kalitesi geliştirme prensipleri ve uygulamaları iyi anlaşılmasıdır ve bu tezin amacı da söz konusu anlayışın benimsenmesine katkıda bulunmaktır.

1.1 Kalitesiz Elektrikğin Maliyeti

Elektrik enerjisi, diğer tüm hammaddeler gibi kaliteli olarak temin edilmesi büyük önem arz eden ve tüm ticari faaliyetler yanında insan yaşamını ilgilendiren hemen hemen her alanda kullanılmakta olan son derece önemli bir hammaddedir. Bu bölümde, elektrik enerjisinin kalitesi ile ilgili problemler ve bu problemlerin üretim faaliyetleri ve maliyetleri üzerindeki etkileri ele alınmaktadır. Nedenleri ve etkileri birbirinden farklı olan ve farklı maliyetlerin oluşmasına yol açan elektrik enerjisi kalite problemleri beş kategori altında toplanmaktadır.

Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde, elektrik enerjisi kalite problemlerinin endüstride ve ticari alanlarda yarattığı maliyetin yılda 10 milyar Euro olduğu tahmin edilmektedir ve problemlerin ortadan kaldırılması için yapılan harcamalar bu rakamın %5'i civarındadır. Dolayısıyla, “problem riskini en aza indirmek ve kontrol altında tutmak için yapılması gereken harcama ne kadar olmalıdır” sorusunun cevabı yapılan işin özelliklerine bağlı olarak değişecektir. İlk adım; problemlerin özelliklerini anlamak, her bir problemin yapılan iş ile ilgisini ve ne gibi kayıplara yol açabileceğini belirlemektir.

Harmonik Bozulma

Elektrik besleme sistemindeki doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonik bozulma, sistemde beklenilenden daha yüksek şiddette akımlar oluşturur. Bu akımların, tesisatçıların ve bakım teknisyenlerinin kullandığı portatif basit cihazlarla sağlıklı olarak ölçülmesi mümkün değildir. Yapılan ölçümler zaman zaman %40'lara varan oranlarda daha düşük, ciddi ölçüde hatalı sonuçlar verir. Sadece akım şiddeti açısından, yapılan bu hatalı ölçümler tesisattaki iletkenlerin küçük kesitli seçilmesi şeklinde sonuçlanabilir. Ölçülen akım değeri, aşırı akım koruma cihazı kapasite aralığı içinde olsa bile iletkenlerde ısınma ve yükün %2-3'ü civarında enerji kaybı kaçınılmazdır. Genellikle, aşırı akım koruma cihazı anma değeri gerçek akım değerine (ölçülen değer düşük olması nedeniyle) çok yakındır ve devrede arzu edilmeyen açılma şeklinde belirlenen bir duruma eğilim gösterir.

Ortaya çıkan harmonik frekans bileşenleri transformatörlerde aşırı şekilde artan girdap akımı kayıplarına neden olur, çünkü bu kayıplar frekansın karesi ile orantılıdır. Kayıpların yüksek

olması nedeniyle transformatörün çalışma sıcaklığı yükselir ve transformatörün ömrü önemli ölçüde kısalmış olur. Gerekli önlemler alınmadığı takdirde, IT yükleri besleyen orta yükteki transformatörlerde bile hizmet ömrünün kısılması kaçınılmazdır.

Harmoniklerin ekonomik etkileri; daha kısa tesisat ömrü, düşük enerji verimliliği ve beklenmedik kesintilere karşı hassasiyet olarak ifade edilebilir. Gerilim azalmaları ile ilgili bölümde ayrıntılı olarak açıklandığı gibi beklenmedik açılmaların maliyeti diğer plan dışı kesintilerde olduğu gibi önemli boyutlara ulaşabilir. Tesisat ömrünün kısılması çok yüksek masraflara yol açabilir.

Normal olarak kullanım ömürleri 30 veya 40 yıl olması gereken transformatörlerin 7-10 yılda değiştirilmeleri büyük maddi kayıplara yol açar. Önlem olarak, iyi tesisat uygulaması ve uygun teçhizat seçimi yeterlidir, önemli harcamaların yapılması gerekmez. Hesaplanan minimum kesitten daha büyük kesitli kablo kullanılması, başlangıçta maliyetin biraz artmasına karşın kayıpları azaltacağı gibi işletme maliyetinden tasarruf sağlar.

Sistem Oturmaları

Sistem oturmaları elektrik enerjisinde kalite problemlerinin en başında gelir ve süre olarak birkaç saniye veya tek bir defa yaşanmış olduğu gibi aylarca devam edebilir. İngiltere’de her 15 ayda bir görülen sistem oturmaları ortalama 100 dakika kadar sürer fakat tekil olaylar çok daha kısa ve sık olabilir. Arızalar sadece kamuya ait besleme sistemlerinden kaynaklanmamaktadır, herhangi bir bina veya fabrikadaki tesisatın tek bir noktasındaki kablo veya bağlantıdan kaynaklanan bir arıza tüm sistemi enerjisiz bırakabilmektedir.

Komple güç kesilmesine karşı korunmak için iki tip yaklaşım söz konusudur. Birinci yaklaşımda; tesisat tasarımında problem yaratabilecek noktaların oluşması önlenmekte veya risk tahmini yapılarak en riskli noktalar belirlenmektedir. İkinci yaklaşım ise yedek güç kaynağı ihtiyacının belirlenmesi için gerekli çalışmaların yapılmasından ibarettir. Önemli faydalar sağlayan bu teknikler zor olmadığı gibi özellikle masraflı da değildir. Tekniklerin başlangıçta, tasarım aşamasında uygulanması daha sonraki aşamalarda uygulanmasından çok daha ekonomiktir. Alternatif güç kaynakları gerek ilk yatırım ve gerekse işletme masrafı olarak daha pahalı olabilir örneğin, ihtiyaç duyulduğu anda devreye girmeye hazır olmayan bir jeneratörün yedekte tutulmasının önemli bir getirisi olmaz ihtiyacın ve gerekli güç kaynağı tipinin çok dikkatli analiz edilmesi gerekir. Yedek jeneratör yatırımının güvenilir bir güç kaynağı olarak uzun yıllar hizmet verebilmesi bu alternatifin ekonomik değerlendirmesinde dikkate alınması gereken önemli bir noktadır.

Çelik veya kağıt sanayileri gibi çok büyük miktarlarda enerji kullanan sektörler ikinci bir enerji kaynağı olarak enterkonnekte sistemin farklı bir kısmından beslenirler. Her iki kaynağı da etkileyebilecek bir problem olasılığı oldukça zayıftır. Uygun ve yeterli yakıt temin edilebildiği takdirde ihtiyaç duyulan enerjinin tamamının tüketim bölgesinde üretilmesi alternatif olabilir. Her iki durumda da ilk yatırım masrafı çok yüksek olur, ancak güç kesintisinin potansiyel maliyeti de aynı derecede yüksektir. Örneğin, kağıt 500 metreden daha uzun ve içerisinde yüzlerce haddenin hassas bir şekilde devir kontrollerinin yapıldığı makinelerle üretilmektedir. Herhangi bir güç kesintisi veya gerilim azalması senkronizasyonu bozarak işlemi durdurabilir. Üretimin tekrar başlamasından önce saatler süren çalışmalar yapılarak kısmen işlem den geçmiş kağıt ve kağıt hamurunun sistemden temizlenmesi gerekir. Üretim kaybından başka hammadde ve insan gücü kayıpları ve siparişlerin zamanında teslim edilememesi ortaya çıkabilecek son derece olumsuz sonuçlardır. örnek olmak üzere, gerek üretici ve gerekse müşteri olarak stok yapmanın imkansız olduğu basın sektöründe, birkaç gün içinde sirküle edilerek çok büyük miktarlarda kullanılmakta olan kağıdın basılamadığını ve dağıtılamadığını düşünelim. Büyük masraf yapılmasına karşın bir önceki güne ait haberler kimsenin ilgisini çekmeyecek, müşteri tercihleri değişecek, tazminat talepleri ortaya çıkacak ve tahmin edilemeyen olumsuz sonuçlarla karşı karşıya kalınacaktır.

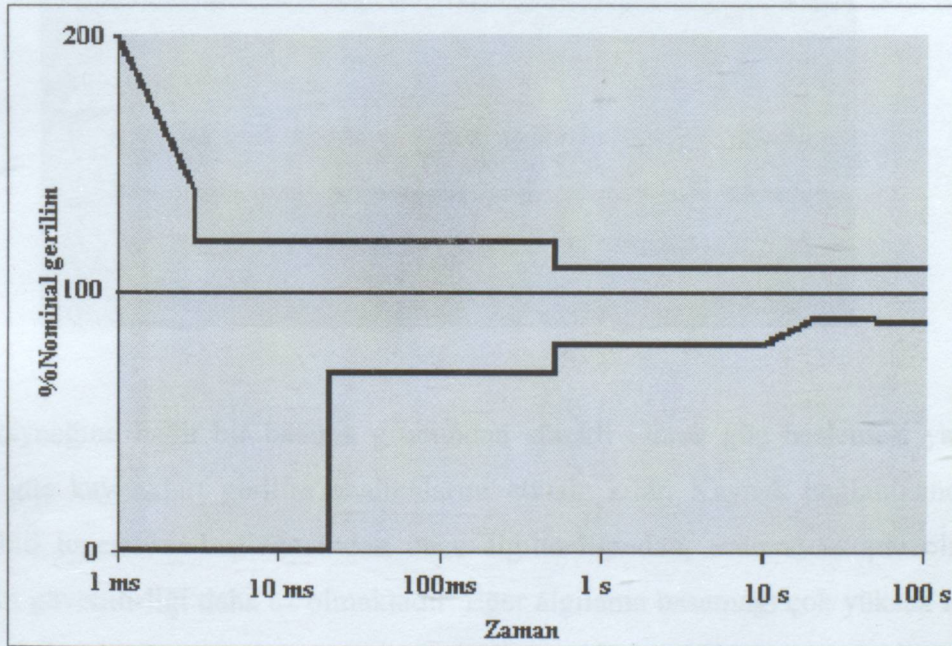
Elektrik enerjisine daha az ihtiyaç duyulan sanayilerde, sistem oturması halinde kullanılması zorunlu olan üniteleri çalıştırmak ve tepe yükleri azaltmak üzere jeneratör yatırımı yapmak isabetli olabilir. Bu seçim daha ekonomik olmakla birlikte, maliyet, arıza riskine göre değerlendirilmelidir ve bu değerlendirme ancak bizzat organizasyon tarafından yapılabilir. Yedek jeneratörün devreye girmesinin zaman alacağına dikkat edilmeli, hassas yükler için UPS gibi başka kaynaklar düşünülmelidir. UPS kapasitesi sınırlı olup sadece bilgisayar sistemlerinin ve kritik özellikteki yüklerin beslenmesinde kullanılır, başka maksat için kullanılmamalıdır. Her zaman olduğu gibi uygun bakım işlemlerine gerekli önem verilmelidir.

Azalma veya dalgalanmalar

Azalma, besleme geriliminin RMS şiddetinde meydana gelen ve bir saniyeden daha kısa veya birkaç saniye devam eden kısa süreli gerilim azalmalarıdır. Azalmalar, kalıcı gerilim ve azalma süresi olarak tanımlanır ve olay sırasında devam eden nominal giriş geriliminin (RMS) yüzde oranı olarak ifade edilir.

Şekil 1.1 de verilen Information Technology Industry Council (ITIC) eğrisinde (eskiden Computer and Business Equipment Manufacturer Association - CBMEA olarak bilinen eğri)

her türlü gerilim değişimleri karşısındaki teçhizat toleransları grafiksel olarak gösterilmektedir(Chapman,2001). Kalın çizgilerle gösterilen doğrular teçhizata zarar vermeden kabul edilebilecek en yüksek ve en düşük gerilim değerlerini, nominal giriş geriliminin (RMS) yüzde oranı olarak zaman değişimine göre göstermektedir. Nominal gerilimi gösteren (%100) yatay doğrunun üst tarafı gerilim yükselmelerine, alt tarafı ise gerilim azalmalarına aittir ve zaman eksenini logaritmiktir. Örneğin bir veri işleme cihazı, nominal gerilimin beş katına 100µs dayanabilmeli, fakat nominal gerilimin sadece %20 fazlasına ise 10ms dayanabilmelidir. Düşük gerilim tarafında ise, komple güç kaybına 20ms (bir şebeke frekans periyodu) dayanabilmeli, 100ms içinde de gerilim nominal gerilimin %70'ine yükselmelidir. Bu eğri, IT cihazları kullanıcıları ile elektrik tedarikçileri arasındaki elektrik enerjisinde kalite problemlerinin çözümüne yardımcı olmak üzere geliştirilmiştir. Daha sonra, cihazlara ait özelliklerin standartlaştırılması neticesinde, kullanım yerinde yapılan ölçümlere dayanılarak verilen elektriğin yeterli olup olmadığının tespiti son derece kolaylaştırılmıştır. Dikkat edileceği gibi, elektrik besleme sisteminin performansı açısından ITIC eğrisi oldukça iyimser bir yaklaşım özelliği taşımaktadır!



Şekil 1.1 ITIC eğrisi (Chapman,2001)

Gerilim azalmaları çoğunlukla elektrik besleme sistemindeki hatalardan kaynaklanmakta, azalmaların şiddetini ise jeneratör ile hata ve ölçüm noktasının bulundukları noktalar belirlemektedir. Gerilim azalmalarının şiddeti ve dağılımı konusunda resmi istatistiksel bilgi mevcut değildir. Halen bir jeneratör firması tarafından yapılmakta olan orta ölçekli

ölçümlerde yük talebinin 5 ve 30 MVA arasında değiştiği 12 noktada gerilim oynamaları ölçülmüş ve on aylık bir dönemde 858 adet gerilim bozulması tespit edilmiştir. Bunlardan 42sinde kesinti ve finansal kayıplar meydana gelmiştir. Söz konusu 12 noktada eski teknolojiler kullanılarak katma değeri düşük imalat işleri yapılıyor olmasına rağmen finansal kayıplar 600 000 Euro (ortalama olarak bir olayda 14 300 Euro veya her bir noktada 50000 Euro) toplam değere kadar yükselmiş, tek bir noktadaki en yüksek kayıp 165 000 Euro olmuştur. Dolayısıyla, katma değeri yüksek ürünlerin imal edildiği veya yarıiletken sanayi gibi çok aşamalı işlemler içeren imalatların yapıldığı işletmelerde kayıpların çok daha yüksek olacağı açıktır. Aşağıdaki tabloda bazı tipik değerler verilmektedir.

Çizelge 1.1 Sektörlere göre finansal kayıplar

Sanayi	Her bir olaydaki finansal kayıp
Yarıiletken üretim	3.800.000 Euro
Finans sektörü	6.000.000. Euro bir saatte
Bilgi işlem merkezi	750.000 Euro
Telekomünikasyon	30.000 Euro bir saatte
Çelik tesisleri	350.000 Euro
Cam sanayi	250.000 Euro

Elektrik kaynağına bağlı bir batarya grubundan sürekli olarak güç beslemesi yapan online kesintisiz güç kaynakları gerilim azalmalarını etkisiz kılar. Kaynak bağlantısındaki kayıp, yükün dahili jeneratöre bağlantısından önce algılandığından, sisteme akuple olmayan güç ünitelerinin güvenilirliği daha az olmaktadır. Eğer algılama basamağı çok yüksek ise UPS sık sık ve gereksiz olarak açma kapama yapacak, limit çok düşük ise zararlı gerilim azalmaları yükü etkileyecektir. Bu nedenle, belli bir model seçilmeden önce özelliklerin ayrıntılı olarak belirlenmesi gerekir.

Geçici olaylar

Geçici olaylar çok kısa süren (birkaç milisaniyeye kadar) gerilim bozulmalarıdır, ancak şiddetleri çok yüksektir (birkaç bin volta kadar) ve yükselme çok hızlı olur. Geçici olayların

çoğu, yıldırımlardan, büyük yüklerden veya reaktif yüklerden kaynaklanır. Bu gibi geçici olaylar çok yüksek frekanslar söz konusu olduğundan, sistemde dağıldıkça etkileri azalır ve dolayısıyla kaynağa olan mesafe kısaldıkça şiddetleri artar. Genellikle, koruma sistemleri geçici etkileri belli bir güvenlik seviyesinin altında tutar, ancak kaynak tesisata yakın veya tesisatın kendi içinde ise problemler ortaya çıkabilir.

Meydana gelen tahribat çok ani olabilir ve tesisat veya teçhizat onarılması imkansız bir şekilde tahribata uğrayabilir, bilgisayarlardaki veriler yok olabilir, veya etkiler zaman içerisinde tekrarlanarak malzemelerin izolasyonuna zarar verebilir ve bu birikimler neticesinde çok daha büyük hasarlar ortaya çıkabilir. Hasar gören cihazların değiştirilmesi için yapılacak masrafların ve üretim için zaman kayıplarının maliyetinin dikkate alınması gerekir.

Önlem almak için yapılacak masraflar nispeten daha azdır. Yapılması gereken, toprak elektrot sisteminde düşük empedanslı iyi bir bağlantının yer aldığı, geniş frekans aralığında düşük empedanslı bir topraklama sisteminin seçilmesidir. Yıldırımdan korunma sistemlerinin tasarımı, bir yılda yıldırım olaylarının meydana geldiği günlerin sayısını saptamak gibi yerel faktörler göz önünde tutularak uygun şekilde yapılmalıdır. Koruma sistemi, telefon ve diğer iletişim hatları dahil gelen hattın ilk giriş kısmına yerleştirilmelidir. Koruma sistemleri imal eden kuruluşlar, anahtarlama aygıtlarında meydana gelen geçici olaylara karşı korunmayı sağlamalı ve etkinliklerinin sürekli olacağına güvence verecekleri iyi bir bakım işlemini tanımlamalıdır.

Sonuç

Elektrik enerjisinde kalite problemleri ciddi risk kaynaklarıdır, düşük teknolojilerle çalışan sanayilerde bile önemli finansal kayıplara neden olmaktadır. Buna karşın önlenmeleri nispeten ucuzdur; kolay uygulanan tasarım tekniklerinden, temin edilmesi kolay destekleyici cihazların tesis edilmesine kadar çeşitli alternatifler seçilerek çözüm getirilebilir. Bu tezin amacı da güç kalitesini arttıracak cihaz ve sistemlerin tesis edilmesinde yeni bir bakış açısı getirmektir.

2. GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİ

Güç kalitesi problemleri nelerdir?

Güç kalitesi problemleri, kısa süreli hatalardan veya güç sistemindeki ani değişikliklerden dolayı kalıcı düzen dalga şeklinden geçici bir sapma olarak tanımlanabilir.

Hassas elektronik yüklere etki eden bozucu etkilerin çok çeşitli nedenleri olabilir. Bu etkenler arasında yıldırım, fırtına gibi atmosferik olaylar, şebeke bağlama işlemleri, yanlış topraklamalar ve elektrik kesintileri sayılabilir. Bununla birlikte bozucu etkilere çoğunlukla yüklerin anahtarlama, topraklama hataları veya cihazların normal çalışması sırasında bizzat tüketicilerin kendileri neden olmaktadır.

Elektrik enerjisi ile ilgili standart ve yönetmelikler, binaların gövdesinin enerji servis giriş yerinde topraklama bağlantısının yapılmasını şart koşturmaktadır. Bununla birlikte, eğer bir bina içinde nötr iletken ve topraklama şasesi arasındaki bağlantıların yanlış yapılması ve özellikle yükler arasında yapılan yanlışlıklar sonucunda arızalara neden olan parazit akımları meydana gelebilir.

Günümüzde, aygıtların duyarlılığı ile ilgili sorunlar, cihaz tasarımcılarının eksik bilgilerinden, güç kalitesi sorunlarından ve bir ölçüde de kullanıcıların karşılaştığı problemlerle elektrik kurumunun yeterince ilgilenmemesinden kaynaklanmaktadır. Bu bölümde bozucu etkiler ve nedenleri konusunda bilgi verilecektir.

2.1 Güç Kalitesi Problemlerinin Sınıflandırılması

Güç kalitesi problemleri genel olarak üç bölümde incelenebilir.

2.1.1 Frekans Olayları

Güç sistem frekansı, güç istasyon jeneratörlerinin açılma hızları ile tespit edilir. Bu frekansın önemli bir şekilde değişim göstermesi çok nadir görülür.

2.1.2 Gerilim Olayları

Eğer besleme gerilimi 415 V' u aşarsa (aşırı gerilim), motor izolasyonu zorlanır ve motorun ömründe bir kısalma meydana gelir. Bir asenkron motor için 20 yıllık bir ömür kabul edilir. Eğer gerilim 415 V' un altına (düşük gerilim) düşerse, 415 V normal gerilimindeki gücü elde etmek için motor kaynaktan daha fazla akım çeker. Bu, motor ısısında yükselmeye ve ömründe azalmaya sebep olur. Müşteri bağlantı noktasında elde edilmesi gereken gerilim

$\pm \%6$ oranındadır. Gerilim değişimleri birkaç gruba ayrılabilir;

- a) 1 dakikadan uzun süreli değişimler. Bunlar, eğer nominal gerilimin $\% 90$ 'ından az ise düşük gerilim, nominal gerilimin $\% 110$ 'undan büyük olursa aşırı gerilim olarak adlandırılır,
- b) 1 dakikadan kısa süreli gerilim değişimleri. Gerilim nominal değerin $\% 10$ 'u ile $\%9$ 'ı arasında ise gerilim düşmesi, gerilimin $\% 110$ 'undan daha büyük ise gerilim yükselmesi olarak adlandırılır,
- c) Her bir faz iletkeninde, gerilimin farklı değerler aldığı gerilim dengesizlikleri,
- d) Işık flikeri olarak görülen sürekli ve değişken dalgalanmalar,
- e) Beslemenin tamamen kaybolduęu kesintiler,
- f) Yetersiz topraklamayla ortaya çıkan nötr-toprak geriliminde yükselme.

2.1.3 Dalga Şekli Olayları

Bu olaylar, temel gerilimin normal sinüzoidal dalga şeklinde distorsiyona sebep olurlar. Dalga şekli olayları aşağıdaki şekillerde görülür.

- Temel gerilim veya akımda var olan, ana frekansın tam katı ek frekanslar harmonik olarak adlandırılır,
- Ara-harmonikler, temel frekansın tam katı olmayan ek frekanslardır,
- AC-DC konverter gibi 3 fazlı elektronik anahtarlama cihazlarının normal çalışmasından kaynaklanan çentik etkisi,
- Yıldırım düşmesi veya şebekede anahtarlama sonucunda meydana gelen büyük kısa süreli gerilim değişimleri olan geçici olaylar,
- 200 kHz'e kadar büyük frekanslı enerji dağıtımından kaynaklanan hasarlar.

2.2 Güç Kalitesi Problemlerinin Kaynakları

Güç kalitesi problemleri genel olarak iki gruba ayrılır. Birinci grup, güç sisteminden kaynaklanan hasarları içerir. Bunlar enerji kesintileri ve gerilim çöküntülerini kapsar. İkinci grup müşteri ekipmanlarının çalışmasından kaynaklanan problemlerdir. Örnek olarak, büyük yüklerin devreye alınması söylenebilir. Çizelge 2.1' de güç kalitesi problemleri, nedenleri,

etkileri ve bu etkileri engellemek için kullanılan çözümler gösterilmiştir(Mohaddes, 2001).

Besleme sisteminde aşağıdaki olaylar meydana gelebilir

1. Yıldırım düşmesi geçici olaylara sebep olabilir. Gerilim çökmesi ve gerilim düşmesi veya olası müşteri kesintilerine yol açabilecek bir hataya yol açarlar.
2. Hat ve kapasitör anahtarlama geçici olaylara neden olur.
3. İletim hatları ve transformatörlerin asimetrik yapısı dengesizliğe yol açar.
4. Fider üzerindeki hatalar gerilimin düşmesine, yükselmesine veya beslemenin tamamen kaybolmasına sebep olabilir.

Müşteri üretim sahası veya yakın bir tesisten kaynaklanan problemler:

1. Büyük yüklerin, özellikle motorların aniden devreye alınması, gerilim düşmesine neden olur.
2. Tek fazlı yüklerin üç faza doğru eşit olmayan dağıtımı dengesizliğe neden olur.
3. Periyodik yükler fliker olayına sebep olur.
4. Zayıf bir bağlantı veya yetersiz topraklama yüksek nötr-toprak gerilimine neden olur.
5. Bilgisayarlar gibi güç elektroniği yükleri, ofis araçları, flüoresan lambalar, yüksek verimli ışıklar, ayarlanabilir hız sürücüleri harmonik distorsiyona ve tek fazlı yük durumunda yüksek nötr akımlarına yol açar.
6. Eski televizyon gruplarında bulunabilen SMPS'ler, yüksek frekanslı gürültüye neden olur.
7. Kontaktörlerin veya rölelerin anahtarlama geçici olaylara sebep olur.
8. Kesintisiz güç kaynaklarının yanlış veya uygun olmayan çalışmaları, geçici olaylar, gerilim düşmeleri veya kesintilere yol açar.

Çizelge 2.1 Güç kalitesi problemleri ve koruma ekipmanları

Güç Kalitesi Problemi	Muhtemel Neden	Koruma Ekipmanı	Problemin Etkisi
Gerilim Düşmesi	Yıldırım düşmesi Büyük yüklerin devreye alınması Sistem hataları	Gerilim regülatörü Motor-generatör grubu KGK Statik düzenleyici	Bilgisayar ve kontrollerde kullanılan hassas devrelerin yanlış çalışması Ekipmanların çökmesi
Aşırı veya düşük gerilim	Zayıf gerilim regülasyonu. Aşırı devre yükleri	Gerilim regülatörü KGK Hat düzenleyici	Aşırı motor akımı Anormal gerilimden dolayı ekipmanlarda hata veya çökmeye
Geçici olaylar	Yıldırım düşmesi Şebeke anahtarlama	Dalga bastırıcı Parafudur	Ekipmanların çökmesi
Kesinti	Güç sistem hataları Güç hatlarını kapsayan hatalar	KGK Motor-generatör grubu	Elektronik cihazların yanlış veya hiç çalışmaması
Gerilim yükselmesi	Büyük yüklerin azaltılması veya tamamen devreden çıkarılması	Gerilim regülatörü KGK Motor-generatör grubu	Cihaz yalıtımının delinmesi
Harmonik Distorsiyon	Ark fırınları Gaz deşarjlı aydınlatma cihazları Güç konverterleri	Hat düzenleyici Filtre	Rölelerin yanlış çalışması Yalıtımın delinmesi Motor-trafo nötr iletkeninde aşırı ısınma
Muhtemel Neden	Zayıf bağlantılar Yetersiz topraklama Radyo ekipmanları	Yalıtım transformatörü KGK	Mikroişlemci temelli ekipmanların yanlış çalışması

2.3 Güç Kalitesi Problemleri Nelerdir?

Güç kalitesi problemleri aşağıdaki başlıklar altında özetlenebilir;

2.3.1 Geçici Olaylar

Geçici olaylar terimi, güç sistem değişikliklerinin analizinde, istenmeyen ancak kısa süreli olan olayları ifade etmekte kullanılır.

Genel olarak geçici olaylar darbesel geçici olaylar ve salınımsal geçici olaylar olarak iki gruba ayrılabilir. Bu terimler akım ve gerilim geçici olayının dalga şeklini yansıtır.

➤ Darbesel Geçici Olaylar

Darbesel geçici olaylar, akım, gerilim veya her ikisinin kalıcı düzen durumlarında meydana gelen tek kutuplu (pozitif yada negatif) ani değişikliklerdir.

Darbesel geçici olaylar genelde yükselme veya alçalma zamanları ile karakterize edilirler. Örneğin, $1,2 \times 50 \mu s$ ile tanımlı 2000 V' darbesel geçici olay, nominal olarak sıfırdan tepe değeri 2000V'a $1,2 \mu s$ ' de çıkar ve tepe değerinin yarısına $50 \mu s$ ' de düşer. Darbesel geçici olayların en önemli neden yıldırım olaylarıdır.

➤ Salınımsal Geçici Olay

Salınımsal geçici olay, akım, gerilim veya her ikisinin kalıcı düzen durumlarında meydana gelen hem pozitif hem de negatif kutuplu değerleri içeren ani değişikliklerdir. Herhangi bir salınımsal geçici olay ani değerleri hızlı bir şekilde kutuplarını değiştiren akım ve gerilimden oluşur. Salınımsal geçici olaylar spektral içerik, devamlılık süresi ve genlik ile ifade edilirler.

2.3.2 Kısa Süreli Gerilim Değişimleri

Bu tür değişimler ani, geçici ve kısa süreli olarak tanımlanabilir. Kısa süreli gerilim değişimleri, yüksek değerde yol alma akımı çeken büyük yüklerin devreye alınması veya güç iletkenlerinde oluşan temassızlıklar sebebiyle meydana gelir. Hatanın yerine ve sistem koşullarına bağlı olarak hata geçici gerilim düşmelerine veya gerilimin tamamen kesilmesine sebep olabilir.

➤ Gerilim düşmesi

Gerilim düşmesi genellikle sistem hataları ile ortaya çıksa da ağır yüklerin devreye alınması, iletim hatlarında yetersiz kompanzasyon veya büyük güçlü motorlara yol verilmesiyle meydana gelir.

➤ Gerilim yükselmesi

Gerilim yükselmesi, gerilimin veya akımın efektif değerinin 1,1 pu ile 1,8 pu arası bir değere yükselmesidir.

Gerilim düşmeleri gibi gerilim yükselmeleri de sistem hatası ile ilişkilidir, ancak gerilim düşmeleri kadar yaygın değildir. Gerilim yükselmesinin meydana gelmesinde bir neden tek faz-toprak kısa devresi (SLG hatası) sırasında, hata olmayan fazda geçici gerilim artışıdır. Gerilim yükselmesi ayrıca büyük yüklerin anahtarlama sırasında veya büyük kapasitörlerin devreye alınmasında, aşırı kompanzasyon durumlarında oluşabilir.

➤ Gerilim kesilmesi

Gerilim kesilmesi kaynak geriliminin veya yük akımının 1 dakikayı geçmeyen bir periyot boyunca 0,1 p.u.'in altına düşmesi sonucu meydana gelir. Gerilim kesilmesi güç sistemi hataları, cihaz hataları veya kontrol sistemlerinin yanlış çalışması sonucu olabilir. Gerilim kesilmeleri, gerilimin nominal değerinin % 10'undan daha az değerlere düşmesi sebebiyle genellikle süreleri ile ölçülürler.

2.3.3 Uzun Süreli Gerilim Değişimleri

Uzun süreli gerilim değişimleri, güç frekansındaki 1 dakikadan daha uzun süreli efektif değişimleri ifade eder. ANSI C84.1 güç sistemi üzerinde kabul edilen kalıcı düzen gerilim toleranslarını belirlemiştir. Bir gerilim değişimi, ANSI limitleri 1 dakikadan daha fazla aşıldığında uzun süreli olarak düşünülebilir.

➤ Aşırı gerilim

Aşırı gerilim, güç frekansında 1 dakikadan uzun bir süre boyunca AC gerilim efektif değerinin % 110'unu aşacak kadar yükselmesidir.

➤ Düşük gerilim

Düşük gerilim, güç frekansında 1 dakikadan uzun bir süre boyunca AC gerilim efektif değerinin % 90'ın altına düşmesidir.

➤ Kalıcı gerilim kesintisi

Kalıcı gerilim kesintisi, 1 dakikadan daha uzun bir süre boyunca kaynak geriliminin sıfır olarak kalmasıdır.

➤ Gerilim dengesizliği

Gerilim dengesizliği üç-faz gerilim ve akım değerlerinin ortalamasından maksimum sapma olarak tanımlanabilir. Ayrıca simetrik bileşenleri kullanarak da ifade edilebilir.

Dengesiz bir besleme üzerinde çalışan bir makine kaynak gerilimin birkaç katı derecesinde bir akım çeker, sonuç olarak üç faz akımları farklılık gösterir, ve makinede sıcaklık artışı başlar. Motor ve generatör, bu tür büyük dengesizlikleri anlayabilmek için koruma cihazıyla donatılırlar. Negatif veya sıfır bileşenin pozitif bileşene oranı ile dengesizlik yüzdesi belirlenebilir. Üç fazlı sistemler üzerindeki tek fazlı yükler, % 2'den az gerilim dengesizliğini ana sebebidir. Üç fazlı kapasitör gruplarının bir fazında olabilecek sigorta atması sonucu da gerilim dengesizliği meydana gelebilir. % 5'ten büyük şiddetli gerilim dengesizlikleri tek fazı kullanabilmeden kaynaklanabilir.

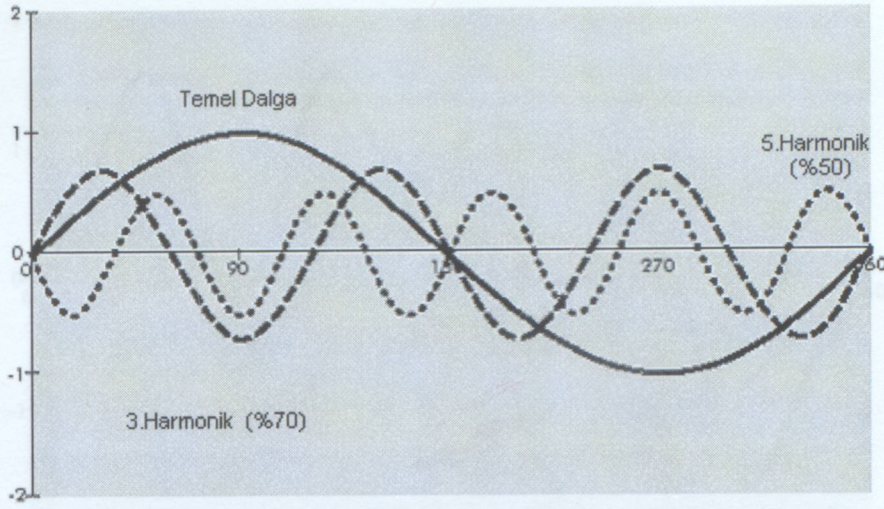
➤ Dalga Şekli Distorsiyonu

Dalga şekli distorsiyonu, çoğunlukla sapmanın spektral içeriğine göre karakterize edilen, ideal bir sinüs dalganın güç frekansından kararlı düzen sapması olarak tanımlanır. Dalga şekli bozulmasının beş temel türü vardır. Bunlar;

- DC Bileşen
- Harmonikler
- Ara Harmonikler
- Çentikler
- Gürültü

2.4 Harmonikler, Nedenleri ve Etkileri

Bu bölümde harmonik akımların kaynağı ve elektrik sistemleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Harmonik frekanslar, şebeke frekansının integral katları şeklindedir. Örneğin 50Hz temel harmonik için üçüncü harmonik 150Hz, beşinci harmonik ise 250Hz'dir. Şekil 2.1'de temel bir sinüs eğrisi üçüncü ve beşinci harmoniklerle birlikte gösterilmektedir.

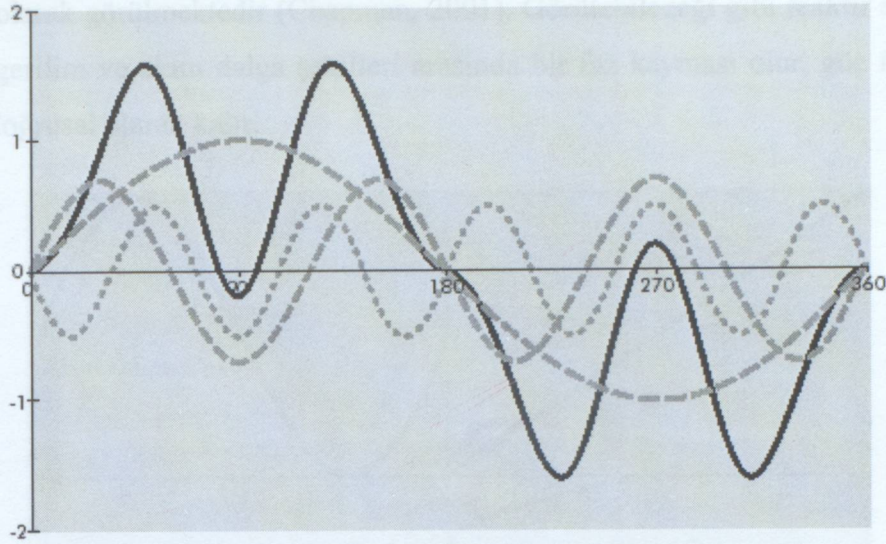


Şekil 2.1 Temel harmonikle 3. ve 5. harmonikler

Şekil 2.2’de %70 üçüncü harmonik ve %50 beşinci harmoniklerin ilave edildiği bir şebeke görülmektedir. Dikkat edilirse uygulamalarda karşılaşılan bozulmuş akım dalga şekilleri bu gösterilenden çok daha karmaşıktır ve daha çok sayıda harmonikler ile daha karmaşık faz ilişkileri içerir.

Açıkça görüldüğü gibi bu dalga şekli bir sinüs eğrisi değildir ve dolayısıyla etkin değer kalibreli multimetreler gibi normal ölçü aletleri ile yapılan ve ortalama değeri gösteren ölçümler yanlış olmaktadır. Her bir devirde iki değil altı adet sıfır noktası bulunur, bu nedenle referans olarak sıfır noktasını alan cihazlarla yapılan ölçümler hatalı sonuçlar verecektir. Dalga şekli şebeke frekansından farklı frekanslar içermektedir ve değerlendirmelerin buna göre yapılması gerekir.

Harmonikler akım harmonikleri olarak oluşur ve olumsuzlukların çoğu da bu akımların etkisi ile ortaya çıkmaktadır; bu nedenle enerji tesislerinde harmonikler söz konusu edildiğinde akım harmonikleri anlaşılmalıdır. Akım harmonikleri spektrumu hakkında bilgi edinmeden doğru sonuçlara ulaşmak mümkün değildir, buna rağmen toplam harmonik bozulmalarını (Total Harmonic Distortion-THD) gösteren rakamlar hala kullanılmaya devam edilmektedir. Bir dağıtım sistemine yayılan harmonik akımlar, bu akımların taşınması ile alakası olmayan alt devrelerde gerilim harmonikleri olarak taşınırlar. Ölçülen gerilim ve akım değerlerinin ayrı ayrı net bir şekilde tanımlanarak kullanılması son derece önemlidir. Alışlagelen şekilde; akım sapması ölçümleri ‘I’ sembolü ile (%35 THDI gibi), gerilim sapması ölçümleri de ‘V’ sembolü ile (%4THDV gibi) gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Bozuk akım dalga şekli

2.4.1 Harmonikleri Oluşturan Donanım Tipleri

Doğrusal olmayan yüklerin hepsi harmonik yük akımları oluşturur.

Tek fazlı yükler;

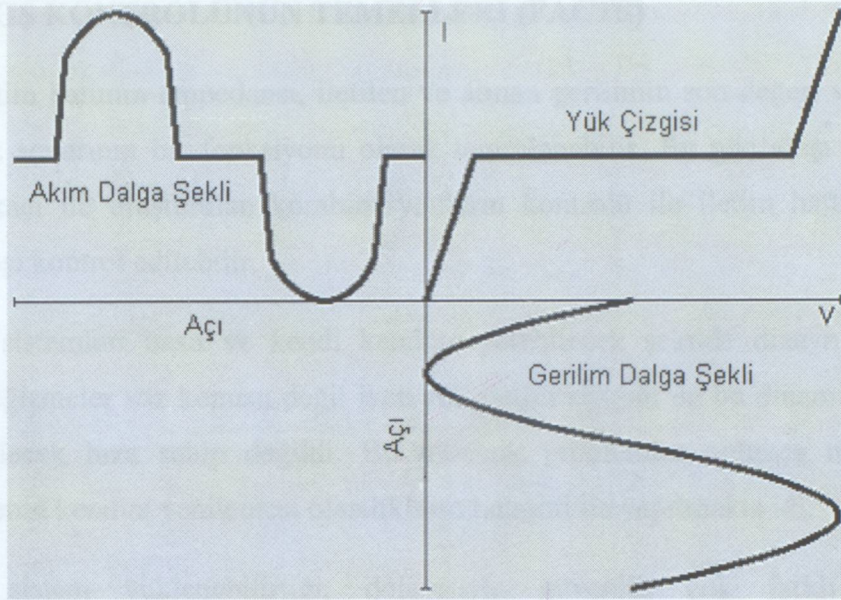
- Anahtarlanabilir güç kaynakları (switched mode power supplies-SMPS)
- Elektronik flüoresan aydınlatma balastları
- Küçük tip UPS (kesintisiz güç kaynağı) üniteleri

Üç fazlı yükler;

- Değişken hızlı sürücüler
- Büyük tip UPS üniteleri

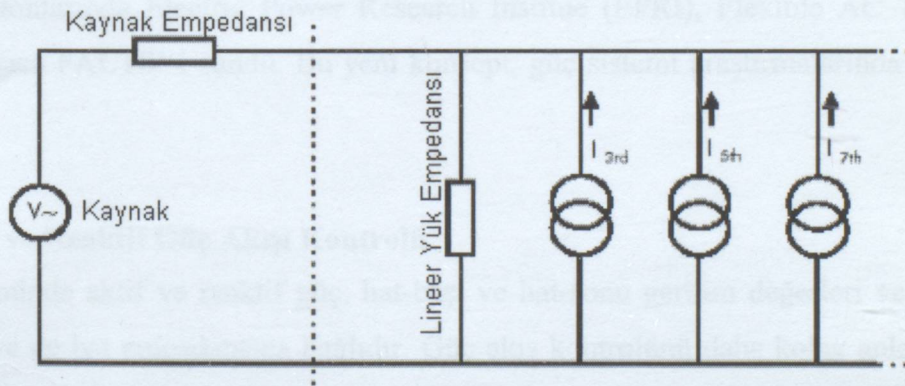
2.4.2 Teorik Esaslar – Harmoniklerin Oluşumu

İdeal temiz bir sistemde akım ve gerilim dalgaları sinüs eğrisi şeklindedir. Uygulamada, tatbik edilen gerilim ile devredeki akım ilişkisi doğrusal olmadığı zaman sinüs eğrisi şekline uymayan akımlar oluşur. Sadece doğrusal devre elemanlarının – direnç, endüktans ve kapasite – yer aldığı basit bir devreden geçen akım ile tatbik edilen gerilim (belirli bir frekansta) arasında belirli bir oran vardır. Dolayısıyla, tatbik edilen gerilim sinüs eğrisi şeklinde ise, Şekil 2.3’de gösterildiği gibi, devreden sinüs eğrisi şeklinde bir akım geçecektir. Tatbik edilen gerilim ile meydana gelen akım arasındaki ilişki yük-doğrusu şeklindedir ve Şekil 2.3’da



Şekil 2.4 Doğrusal olmayan yükte akım dalga şekli

Doğrusal olmayan yüke ait eşdeğer bir devre Şekil 2.5' de gösterilmektedir. Her bir harmonik frekans için bir akım kaynağı olacak şekilde çok sayıda akım kaynakları ile yük paralel bağlanarak lineer bir yük devresi modeli oluşturulabilir.



Şekil 2.5 Doğrusal olmayan yüke ait eşdeğer devre

Yükten kaynaklanan harmonik akımların -daha doğru bir ifade ile; yük tarafından şebeke akımından harmonik akıma dönüştürülen akımların- kaynak empedansı ve tüm paralel bağlantılardan geçerek devrenin her tarafında dolaşmaları gerekir. Neticede, besleme empedansında ve tesisatın her tarafında harmonik gerilimler ortaya çıkar. Harmonik kaynakları zaman zaman gerilim kaynakları olarak gösterilmektedir; şayet bu doğru olsaydı kaynak empedansının kaynaktaki harmonik gerilim şiddeti üzerinde.

3. GÜÇ AKIŞ KONTROLÜNÜN TEMELLERİ (FACTS)

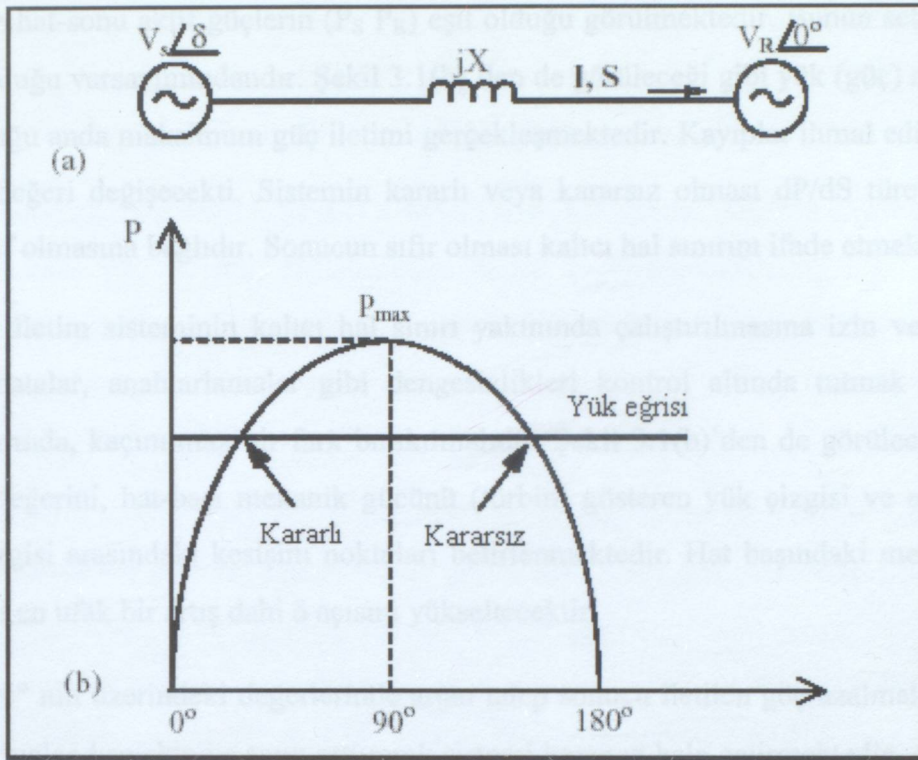
Güç akışı, iletim hattının empedansı, iletilen ve alınan gerilimin son değeri ve bu gerilimler arasındaki faz açılarının bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Bu güç akışı bileşenlerinden biri veya birkaçı ile oluşturulan kombinasyonların kontrolü ile iletim hattındaki aktif ve reaktif güç akışı kontrol edilebilir.

Eskiden güç sistemleri basit ve kendi kendine yetebilecek şekilde dizayn edilirdi. Aktif güçteki ani değişimler söz konusu değil iken AC iletim sistemi de bu dinamik değişiklikleri kontrol edebilecek hıza sahip değildi. Bu dinamik problemler oldukça masraflı idi, bu durumda sistemin kendini yenilemesi olasılıkların tahmini ile yapılmakta idi.

Günümüzde sistem yüklenebilirliği, dolayısıyla güvenlik çok farklı yaklaşımlarla sağlanabilmektedir. Güç sistemine paralel kondansatör grupları kurularak gerilimi istenilen seviyede tutmak yaygın bir kullanımdır. Seri kondansatör grupları eklemek iletim hattı reaktansı düşürülmek suretiyle hattın güç iletim kapasitesi arttırılmaktadır. Eskiden bu sistemler mekanik olarak kontrol edilmekte ve bu sebeple sistem oldukça yavaş çalışmakta idi. Kararlı haldeki bir sistemde ise oldukça kullanışlı olmakta idi ancak, dinamik noktalarda oluşan geçici osilasyonlara cevabı çok yavaş kalmaktadır. Tüm bu sorunlar karşısında 1980'lerin sonlarında Electric Power Research Institute (EPRI), Flexible AC Transmission Systems kısaca FACTS' i sundu. Bu yeni konsept, güç sistemi araştırmalarında yeni bir yön çizdi.

3.1 Aktif ve Reaktif Güç Akışı Kontrolü

İletim sisteminde aktif ve reaktif güç, hat-başı ve hat-sonu gerilim değerleri ve aralarındaki faz açıları ve de hat empedansına bağlıdır. Güç akış kontrolünü daha kolay anlayabilmek ve VSC tabanlı FACTS kontrolörlerinin temelindeki düşünciyi aktarmak için referans (Taylor, 1993) de verilmiş ve Şekil 3.1(a) da gösterilmiş olan basit model kullanılmıştır. İletilen ve alınan gerilimin değişmediği farz edilerek gerilimin kararlı olduğu büyük bir güç sisteminde noktasal olarak tanımlanabilir. Hat-başı ve hat-sonu eşdeğer bir reaktans ile birbirine bağlanmıştır. Yüksek gerilim hattı reaktansının çok küçük olduğunu varsayıyoruz. Hat-sonu, 0° lik sabit bir faz açısına sahip sonsuz bir bara gibi modellenmiştir.



Şekil 3.1 (a) Aktif ve reaktif güç akışı için hat modeli (b) Yük açısı ve eğrisi

Görünür güç, aktif güç ve reaktif güç akışı sırasıyla şu şekilde tanımlanmıştır ;

$$S_R = P_R + jQ_R = V_R I^*$$

$$P_R = \frac{V_S V_R \sin \delta}{X}$$

$$Q_R = \frac{V_S V_R \cos \delta - V_R^2}{X}$$

benzer olarak hat-başı için de ;

$$P_S = \frac{V_S V_R}{X} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta$$

$$Q_S = \frac{V_S^2 - V_S V_R \cos \delta}{X}$$

V_S ve V_R hat-başı ve hat-sonu gerilimlerinin (RMS) değerleridir. δ açısı ise bu gerilimler arası faz farkını belirtir.

Hat-başı ve hat-sonu aktif güçlerin (P_S P_R) eşit olduğu görülmektedir. Bunun sebebi sistemin kayıpsız olduğu varsayımındandır. Şekil 3.1(b)'den de görüleceği gibi yük (güç) açısı δ 'in 90° ye eşit olduğu anda maksimum güç iletimi gerçekleşmektedir. Kayıplar ihmal edilmiş olsa idi bu açının değeri değişecekti. Sistemin kararlı veya kararsız olması dP/dS türevinin pozitif veya negatif olmasına bağlıdır. Sonucun sıfır olması kalıcı hal sınırını ifade etmektedir.

Sahada bir iletim sisteminin kalıcı hal sınırı yakınında çalıştırılmasına izin verilmez. Yük değişimi, hatalar, anahtarlamalar gibi dengesizlikleri kontrol altında tutmak için sistemi işletim sınırında, kaçınılmaz bir fark bırakılmalıdır. Şekil 3.1(b)'den de görüleceği gibi δ 'in kalıcı hal değerini, hat-başı mekanik gücünü (türbin) gösteren yük çizgisi ve elektrik yükü demand çizgisi arasındaki kesişim noktaları belirlenmektedir. Hat başındaki mekanik gücün değerindeki en ufak bir artış dahi δ açısını yükseltecektir.

δ açısının 90° nin üzerindeki değerlerinde artan talep sonucu iletilen güç azalmaktadır. Bu da generatörü hızlandırmakta ve açığı arttırarak sistemi kararsız hale getirmektedir. Artan δ açısı, artan mekanik gücü dengelemek için elektrik gücünü arttırmaktadır. Yük açısı δ 'nin değerinde bir sınır payı bırakılması gerekmekte ve bunun için genellikle dinamik, küçük işaret kararlılığı (Small Signal Stability and Transients) veya büyük işaret kararlılığı (Large Signal Stability) kullanılmaktadır.

Eşitlik (3.2) ve (3.4) den anlaşıldığı gibi aktif güç iletimi güç akışına bağlıdır. Eşitlik (3.3) ve (3.5) incelendiğinde ise yüksek δ değerlerinde yapılan yüksek güç iletiminde hat başı ve hat sonu reaktif güç ihtiyacı çok fazladır. Güç akışının gerilimin yüksek olduğu noktadan alçak olduğu noktaya göz önünde bulundurularak reaktif gücün, gerilimin değerine bağlı olduğu sonucu çıkarılabilir.

Eşitlik (3.2) den (3.5) e kadar olan tüm eşitliklerde görüldüğü gibi güç akışı, iletim hattının reaktansına, hat sonu ve hat başı gerilim değerleri ve bu gerilimler arasındaki açığa bağlıdır. FACTS kontrolörlerinin temeli bu parametrelerin gerçek zamanlı olarak kontrolü ve böylece sistem şartlarına göre iletilen gücün kontrolüne dayanmaktadır. Uygun seçilmiş sınırlar içerisinde gücün hızlı bir şekilde kontrol edilebilmesi, sistemin sönmümlendirilebilmesi, geçici ve dinamik kararlılığın arttırılabilmesini sağlar. Örneğin Eşitlik (3.2) ve (3.4) den görülebileceği gibi iletim hattı reaktansı X 'in artması veya azalması, maksimum güç iletimini arttırır veya azaltır. Veya hat-başı ve hat-sonu gerilimlerinin değeri ayarlanarak iletim hattındaki güç akışı kontrol edilebilir. Bununla birlikte bu değişkenler gerilim değişimini 0.95 ve 1.05 p.u. arasında sınırlandıran yük ihtiyacına bağlı olarak sıkı bir kontrol altındadır. Bu

yüzden tam olarak istenilen oranda güç akış kontrolü sağlanamamaktadır. Reaktif güç denklemleri (3.3) ve (3.5) den yola çıkılarak gerilim değerindeki değişimle aktif güç akışına göre, reaktif güç akışında çok büyük bir etki sağlanacağı sonucu çıkarılabilir.

FACTS kontrolörlerinin önemi, STATCOM' un terminal gerilim değerini alçaltıp yükselterek iletim hattındaki güç akışını değiştirebilmesinden kaynaklanmaktadır. SSSC' ler hattın reaktansını değiştirerek ; UPFC ler ise terminal gerilim değeri, iletim hattı reaktansı, hat-başı ve hat-sonu gerilimleri ve faz açıları gibi parametrelerin tamamını değiştirerek güç akış kontrolünü sağlayabilmektedir.

FACTS kontrolörlerinin tüm bu kontrolleri kalıcı hal aktif ve reaktif güç akışı için gerçekleştirebildikleri görülmektedir. Ancak geçici hal ve dinamik şartlardaki pozitif darbeler için de aynı kontrolün sağlanması için sistemin doğru dizayn edilmesi gerekmektedir. Örneğin güç sistemindeki bir dalgalanmayı bastırabilmek için iletim hattına bir UPFC üzerinden geri-besleme (feedback) yapılır (Uzunovic, 1999). Güç sistemindeki reaktif güç beslemesinin eksikliğinden dolayı gerilim kararsızlığı olduğu bilinmektedir. Bu tür bir problem STATCOM' un reaktif gücü üretebilme ve absorbe edebilme özelliğinden faydalanılarak çok kısa sürelerde çözülebilmektedir. Sistemin zaman cevabı çok hızlıdır; öyle ki bazen bir periyottan çok daha kısa zamanda sisteme müdahale söz konusudur.

3.2 Tristör Tabanlı FACTS Kontrolörleri

Yüksek gerilim güç elektroniği alanındaki gelişmeler FACTS kontrolörlerinin oluşmasına ve gelişmesine olanak sağlamıştır. 1970'lerde GTO' ların akım ve gerilim değerlerinin hızla yükseltilmesi, yüksek gerilim güç sistemlerinde kullanılabilmesini sağlamıştır (Lazzlo, 1990). Böylece Static Var Kompanzatörler (SVC), Tristör Kontrollü Seri Kapasitörler (TCSC), Tristör Kontrollü Faz Açısı Regülatörleri (TCPAR) ve benzeri birçok FACTS kontrolörleri modern yapılarına kavuşmuş oldu. Tristör tabanlı anahtarlama elemanlarının temel özelliği kapasitör veya reaktör gibi pasif güç sistemi bileşenlerinin cevap hızlarının yükselmesidir. Ancak kompanzasyon kapasiteleri hala reaktif bileşenlerin boyutuyla tanımlıdır. Örneğin SVC' ler reaktif güç üretebilecek veya absorbe edebilecek reaktör (fully-rated) ve kapasitörlere ve toplam endüktif ve kapasitif akım-gerilim değerlerinde çalışabilecek tristör tabanlı elektronik devreye ihtiyaç duyarlar. Tüm bunlar kontrolörlerin cevap süresini 1 periyot gibi kısa bir süreye çekmiş olmasına rağmen; hat geriliminin değişimi ile reaktif güç üretiminin değiştiği gibi SVC' lerde hala mekanik anahtarlama kapasitör ve reaktör grupları ile benzer özellikler göstermektedir .

Hattın endüktif reaktansını kontrol edebilmek; dolayısıyla efektif reaktif güç kaybını azaltarak maksimum güç iletimini arttırmak için iletim hattına seri kapasitörler bağlanır. Böylece sürekli ve tam kullanım için güç iletimi kontrol edilebilir. Örneğin güç osilasyonunun dinamik kontrolü için Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) kullanımı yaygındır (Kimbark, 1986). Tüm bunlara karşılık bu sistemlerde TCSC' nin hat reaktansının % 20-70'i ile sınırlandırılması ve bunun sonucu olarak da iletim hattının reaktansı ile seri rezonans devre oluşturması gibi problemlere karşı karşıya kalınmaktadır.

FACTS kontrolörlerinden birisi de TCPAR dir. TCPAR sisteme verilen gerilim bileşenlerinin çeyrek periyotta kontrol edilerek hat-başı ve hat-sonu faz farkının kontrolü ile iletim hattındaki güç kontrolünü sağlar. İki adet tristör kontrollü kademeli transformatörden oluşmaktadır ve sonuçta çok yüksek empedans değerleri elde edilmektedir. Oluşan bu yüksek empedans sonucunda yüksek güç iletim seviyesindeki TCPAR reaktif gücün önemli miktarını yok etmektedir. Bu durumda tüm olasılıklara karşı uygun gerilim değerini sağlamak için sistemin yanına büyük bir güç kaynağı tesis edilmelidir. Tristör anahtarlamasının TCPAR nin hızını arttırmasına karşın TCPAR' in yüksek reaktansı önemli problemler doğurabilir. Tüm bunlara rağmen başka bir sistemle karşılaştırılamayacak derecede iletim hattı güç kontrolü sağlanmaktadır (İravani, 1986).

İletim sisteminin güç akış kontrolörleri aşağıdaki Çizelge 3.1 ile özetlenmiştir.

Çizelge 3.1 Güç akış kontrolörleri ve etkinlik bölgeleri

FACTS KONTROLÖRLERİ	KONTROL BÖLGELERİ
STATİK VAR KOMPANZATÖR (SVC)	Gerilim kontrolü, VAR Kompanzasyonu, osilasyonların bastırılması, transient ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı
STATİK SENKRON KOMPANZASYON (STATCOM)	Gerilim kontrolü, VAR Kompanzasyonu, osilasyonların bastırılması, transient ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı
TRİSTÖR KONTROLLÜ FRENLEME RESİSTANSI (TCBR)	Osilasyonların bastırılması, transient ve dinamik kararlılık
STATİK SENKRON SERİ KOMPANZATÖR (SSSC), (DVR)	Gerilim kontrolü, hata akımı sınırlandırması, osilasyonların bastırılması, transient ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı, reaktif güç üretimi
TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KOMPANZATÖR (TCSC)	Akım kontrolü, hata akımı sınırlandırması, güç osilasyonlarının dinamik kontrolü, transient ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı
TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ REAKTÖR (TCSR)	Akım kontrolü, hata akımı sınırlandırması, osilasyonların bastırılması, transient ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı
TRİSTÖR KONTROLLÜ GERİLİM DÜZENLEYİCİ (TCVR)	Reaktif güç kontrolü, gerilim kontrolü, osilasyonların bastırılması, transient ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı
TRİSTÖR KONTROLLÜ FAZ KAYDIRICI TRANSFORMATÖR (TCPST veya TCPR)	Aktif güç kontrolü, osilasyonların bastırılması, transient ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı
BİRLEŞTİRİLMİŞ GÜÇ AKIŞ KONTROLÖRÜ (UPFC)	Aktif ve reaktif güç akış kontrolü, gerilim, hat empedansı ve faz açısı kontrolü, VAR kompanzasyonu, osilasyonların bastırılması, hata akımı sınırlandırması, transient ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı

3.3 GTO Tabanlı FACTS Kontrolörleri

Kapı sönmümlü tristörler (Gate Turn-Off) GTO olarak adlandırılırlar. GTO tristör tıpkı normal tristör gibi küçük değeri I_{G1} kapı akımı darbesi ile iletme geçebilir. Kapı devresine ana akımın $\frac{1}{4}$ ü kadar büyük değeri negatif bir I_{G2} akım darbesi uygulanarak iletimden çıkarılabilmektedir. GTO' un çalışma akım ve gerilim değeri oldukça yüksek değere çıkarıldığı için güç kontrolünde idealdir. Düşük frekans ve yüksek güçlerde kullanılır. Olumsuz bir yönü; söndürme sinyalinin büyüklüğünden dolayı tetikleme devreleri karmaşık ve pahalıdır.

VSC (Voltage-Sourced Converter) GTO gibi sönmümlü cihazlarla birlikte kullanılırlar. Temel dalganın gerilimini elde edebilmek için diyot ve DC kapasitör kullanılır. VSC ler iletim sistemine paralel bir transformatör üzerinden bağlanmak suretiyle sistemdeki reaktif gücü sönmümlendirebilir veya reaktif güç üretebilir. Bu sisteme benzer olarak iletim sisteminde gerilim kontrolünde kullanılan STATCOM adı verilen Statik Senkron Kompanzatörler örnek verilebilir. STATCOM, SVC ile karşılaştırıldığında %50 ye yaklaşan bir boyut farkıyla tercih sebebidir. Ayrıca SVC nin çalışması için gerekli olan kapasitör ve reaktör grupları gibi pasif elemanlara ihtiyaç duymamasından kaynaklanan bir maliyet ve boyut düşüşü de mevcuttur. Daha az yer kaplaması, özellikle büyük kentlerde STATCOM için tercih sebebidir. Örnek olarak Tennessee Valley Authority (TVA) Sullivan Substation 27.4x14.6 m'lik bir bina içerisine kurulu bir STATCOM dur. STATCOM un tüm ekipmanları bina içerisinde olup sadece STATCOM-İletim Hattı ara bağlantısı olan transformatör santral binası dışında kurulmuştur (Schauder, 1995).

VSC, iletim hattına seri transformatör üzerinden seri bağlı olarak kullanılıyor ise Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC) olarak adlandırılır. Bu kontrolör bağlı olduğu hattın reaktif gücünü absorbe edebilir veya gerektiğinde hatta reaktif güç üretebilir, bunu da hattın seri empedansını değiştirerek yapar.

Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC) hat empedansı, gerilimi ve faz açısını kontrol edebilmektedir. UPFC, sistemin gerilim değerinin kontrolüne, kalıcı ve dinamik halde iletim hattının maksimum termal kapasitede güvenli yüklenmesine ve bu şekilde güç akış kontrolüne olanak sağlamaktadır.

Çizelge 3.2' de tristör tabanlı ve VSC tabanlı kontrolörlerinin bir özeti bağlantı şemaları ile verilmiştir.

VSC yaklaşımı, tristör anahtarlama kapasitör ve reaktör grupları kullanılarak yapılan klasik

kompanzasyon metotları ile karşılaştırıldığında VSC nin üstün performansı görülmektedir.

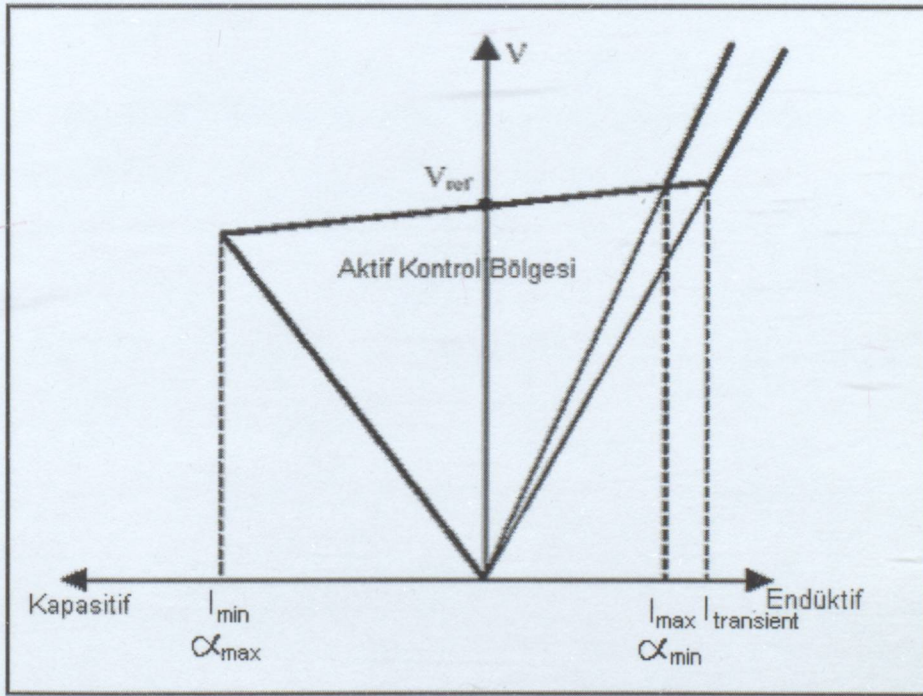
VSC yaklaşımı çok yönlü kullanıma sahiptir, oldukça küçük boyutlara sahiptir ve dinamik etkiyi yok etmek için aktif ve reaktif gücü kontrol edebilmektedir. VSC iletim hattının sistem şartlarından bağımsız oluşundan dolayı aktif ve reaktif güç bağımsız olarak değiştirilebilmektedir. VSC tabanlı FACTS kontrolörleri ile ilgili daha kapsamlı bilgi (Gyugyi, 1992) den edinilebilir. UPFC nin TCSC ve TCPAR gibi klasik güç akış kontrolörleri ile karşılaştırılması (Gyugyi, 1995) den edinilebilir.

Çizelge 3.2 Farklı FACTS kontrolörlerinin bağlantı şemaları

	Tristör Tabanlı Kontrolörler	VSC Tabanlı Kontrolörler
Paralel Kompanzasyon		
Seri Kompanzasyon		
Faz Kaydırıcı		

3.4 Statik Var Kompanzatör (SVC)

Yüksek güç tristör teknolojisi ve elektronik devre teknolojisindeki ilerleme Var Generatörü olarak adlandırılan kontrol edilebilir statik Var kaynaklarının gelişimini hızlandırmıştır. Statik Var Kompanzasyonu (SVC) 1960'ların sonlarında ark fırınları gibi düzensiz değişen büyük endüstriyel yüklerde hızlı,devamlı veya kademeli gerilim kontrolü için geliştirilmiştir (Gyugyi, 1998). Öncelikle endüstriyel ağlar ve güç iletimindeki zayıf noktalardaki gerilimi hızlı bir şekilde kontrol etmek için kullanılırdı. Bir referans gerilimine göre AC sistem gerilimini düzenleyen bir kontrolör, SVC akımı ve reaktif gücü değiştirir. Referans gerilimi belirli bir düşüş karakteristiğine bağlıdır. Düşüş değeri reaktif güç kaynakları arasından seçilir. Böylece Şekil 3.2 de verilen kalıcı hal ve dinamik hal gerilim-akım karakteristiği elde edilir. Şekil 3.2 de görülen aktif kontrol bölgesi SVC nin çalışma bölgesini tanımlamaktadır. Aynı zamanda kapasitif sınırdaki terminal geriliminin düşüşü ile reaktif kayıp arasındaki ters orantıyı göstermektedir.



Şekil 3.2 SVC V-I Karakteristiği

SVC deki kapasitör grupları maksimum kapasitif çıkış verecek şekilde sınırlıdır. Aynı şekilde reaktör grupları da maksimum endüktif çıkışla sınırlıdır. Kublaj trafosu ve elektronik devre, kapasitif ve endüktif çıkışların tamamının maksimum değerine dayanacak şekilde boyutlandırılmalıdır.

SVC ler güç akışını belirleyen gerilim, faz açısı ve empedans gibi bileşenlerden sadece

birisini kontrol edebilir. Bu nedenle iletim hattındaki aktif ve reaktif güç üzerinde bağımsız bir etki sağlayamamaktadır.

Bu işlemi gerçekleştiren bir güç kapasitesi, her bir fazı seri olarak sabit bir kondansatör bağlayarak oluşturabiliriz. Bu durum, efektif seri reaktansı indirir, böylece iletim hattının güç aktarım olur. Güçün formülü şu şekilde ifade edilebilir:

$$P = (V^2/X) \sin \delta$$

Burada;

V = Her bir hat sonundaki faz-faz gerilimi (V_L)

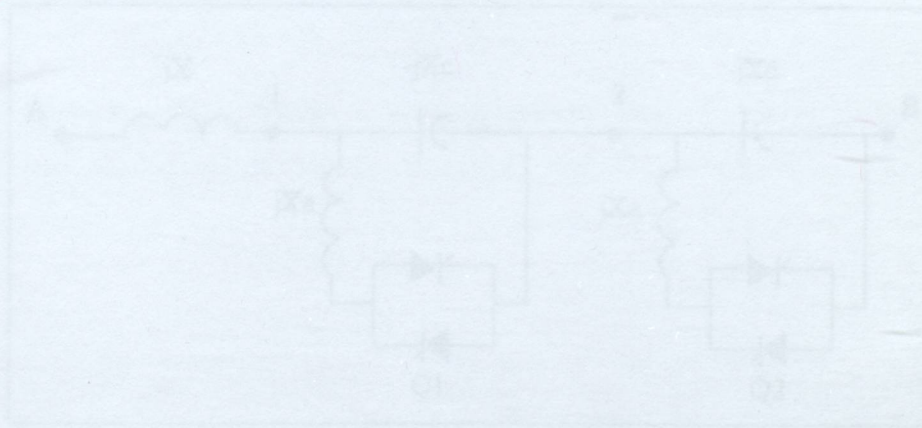
X = Her bir hatın reaktans değeri (Ω)

δ = Hat sonu ve hat başı gerilimleri arasındaki faz açısı ($^\circ$)

Birçok durumda her hat sonundaki V_1 , V_2 gerilimleri eşit değilde, güç formülü;

$$P = [(V_1 \cdot V_2) / X] \sin \delta$$

şeklini alır. Yeni TCSC yaklaşımı, aktif duyulmaya da uygun olarak iletim hattı güç kapasitesini değiştirmektedir.



Şekil 4.1 Seri Kompansasyon tek-hat sistemi

Örneğin, Şekil 4.1'de her fazın endüktif reaktansı X olan bir iletim hattına, reaktansları X_1 olan iki kondansatörle seri olarak bağlanmıştır. Her bir kondansatör Q_1 olarak etiketlenmiştir. Önceki çalışmada da belirtildiği reaktans X_2 'ye bağlanmıştır. X_2 reaktansı X_1 den daha büyüktür.

Q_1 ve Q_2 valfleri açıldığında, yalnızca kondansatörler devredilir. Bu böylece hatın efektif reaktansı $(X_2 - X_1)$ olur. Diğer taraftan, Q_1 valfi kapanmış ise, reaktans X_1 iletim

4. TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KOMPAZASYON (TCSC)

Üç fazlı iletim hattının güç kapasitesini, her bir faza seri olarak sabit bir kondansatör bağlayarak arttırabiliriz. Bu durum, efektif seri reaktansı indirger, böylece iletim hattının gücü artmış olur. Gücün formülü şu şekilde ifade edilebilir;

$$P = (V^2/X) \sin \delta$$

Burada;

V = Her bir hat sonundaki faz-faz gerilimi (kV)

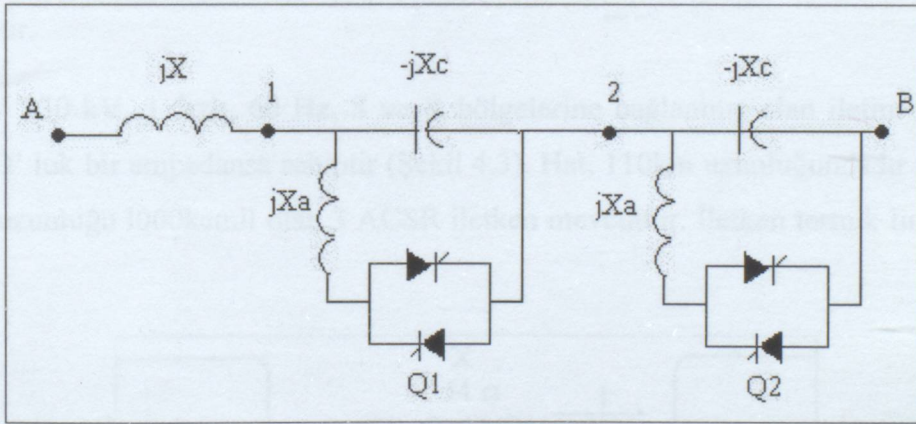
X = Her bir hattın reaktans değeri (Ω)

δ = Hat sonu ve hat başı gerilimler arasındaki faz açısı ($^\circ$)

Birçok durumda her hat sonundaki V_S , V_R gerilimleri eşit değilse, güç formülü;

$$P = [(V_S * V_R) / X] \sin \delta$$

şeklını alır. Yeni TCSC yaklaşımı, anlık ihtiyaçlara da uygun olarak iletim hattı güç kapasitesini değiştirmiştir.



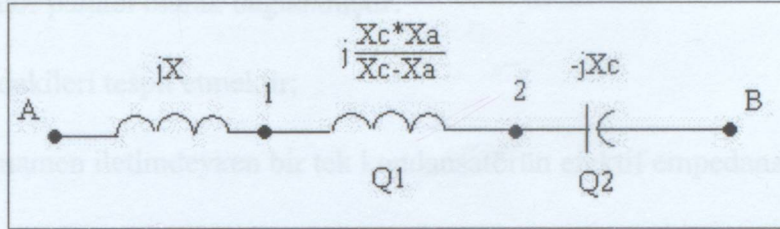
Şekil 4.1 Seri kompanzasyon tek-hat şeması

Örneğin, Şekil 4.1'de her fazın endüktif reaktansı X olan bir iletim hattına, reaktansları X_c olan iki kondansatör seri olarak bağlanmıştır. Her bir kondansatör Q_n olarak isimlendirilen tristör valfleri ile endüktif reaktans X_a 'ya bağlanmıştır. X_a reaktansı X_c 'den daha küçüktür.

$Q1$ ve $Q2$ valfleri bloke edildiğinde, yalnızca kondansatörler devrededir, ve böylece hattın efektif reaktansı $(X - 2 X_c)$ olur. Diğer taraftan, eğer $Q1$ valfi tetiklenmiş ise, kesintili iletim

meydana gelir, X_a , X_c ile paralel konuma gelir. 1 ve 2 noktaları arasındaki empedans Şekil 4.2 deki gibi $jX_c X_a / (X_c - X_a)$ değerini alır. Hattın efektif reaktansı X_{eff} bütün empedansların toplamı olur.

$$X_{eff} = X + (X_c X_a / X_c - X_a) - X_c$$

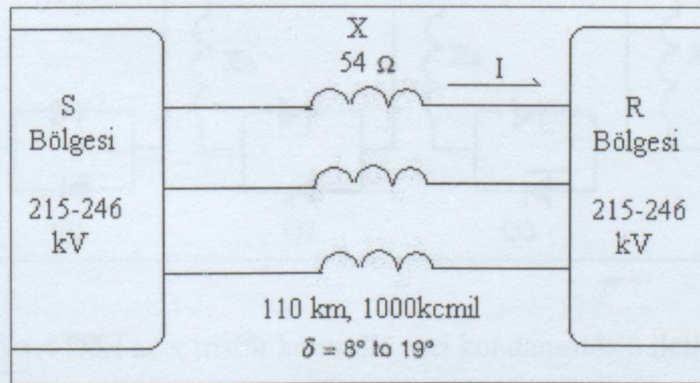


Şekil 4.2 Hat kısmen dengede iken mevcut empedans

Q1 ve Q2 tristör valfleri bağımsız olarak açık ve kapalı olarak anahtarlanabilir. Sonuç olarak A ve B noktaları arasında verilmiş bir faz açısı için, taşınmış aktif güç ihtiyaç olunduğu kadar değiştirilebilmiştir. Anahtarlama bir periyotta yapılmıştır, bu da demektir ki güç akışı çok çabuk kontrol edilebilmiştir.

Aşağıdaki örnek incelendiğinde anahtarlama işlemi ve bunun sisteme olan etkisi daha kolay anlaşılacaktır.

Örnek 1: V 230 kV, 3 fazlı, 60 Hz, S ve R bölgelerine bağlanmış olan iletim hattı her faz başına 54Ω 'luk bir empedansa sahiptir (Şekil 4.3). Hat, 110km uzunluğundadır ve karşılıklı bölgelerin uzunluğu 1000kcmil olan 3 ACSR iletken mevcuttur. İletken termik limiti 1050 A'dır.



Şekil 4.3 S ve R bölgelerine bağlı iletim hattı

Bütün bölgelerdeki gerilimin 215kV ile 246kV arasında değişmektedir. Ayrıca, iki bölge arasındaki faz açısı da 8 derece ile 19 derece arasında rasgele değişmektedir. S bölgesinden R bölgesine devamlı iletim olmaktadır. Buda demektir ki, S bölgesinden R bölgesine devamlı aktif güç boşaltması olmaktadır. İletim hattı, her bir 12Ω 'luk empedansa sahip seri halde 4 kondansatörle donatılmıştır. Şekil 4.4' te gösterildiği üzere endüktif reaktansı $1,71 \Omega$ olan her bir kondansatör paralel olarak bağlanmıştır.

Amacımız aşağıdakileri tespit etmektir;

1. Tristörler tamamen iletimdeyken bir tek kondansatörün efektif empedansı
2. İletim hattının taşıyabileceği maksimum nominal güç
3. S bölgesinin gerilimi 218 kV, R bölgesinin gerilimi 237 kV ve bunlar arasındaki faz açısı 15 derece olduğu zamanki seri kompanzasyon devresinin çizimi

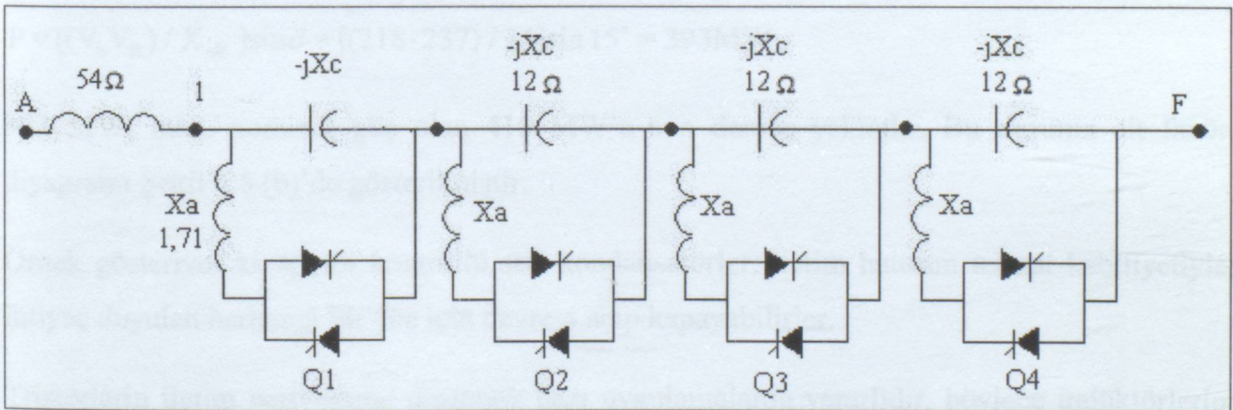
Çözüm:

1. Endüktans ile paralel olan kapasitörün endüktif empedansı X_p ;

$$X_p = (X_c X_a) / (X_c + X_a) = (12 \cdot 1,71) / (12 + 1,71) = 1,5 \Omega \text{ 'dur.}$$

2. İletim hattının nominal akın ve nominal geriliminden elde edilmiş olan nominal güç;

$$P_{\text{nominal}} = V \cdot I \cdot \sqrt{3} = 230,000 \times 1050 \times \sqrt{3} = 418 \text{ MW}$$



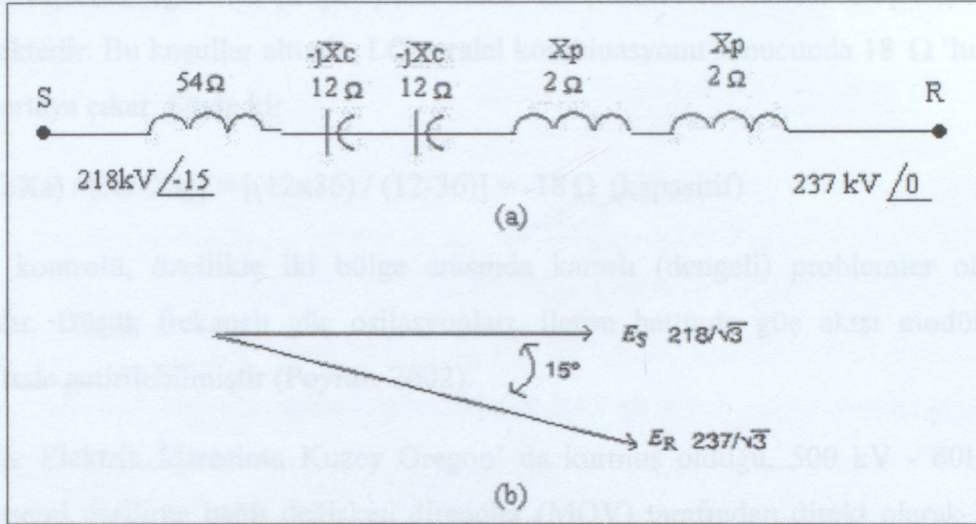
Şekil 4.4 Dört adet tristör kontrollü seri kondansatörlü iletim hattı

3. İstenilen nominal güç değeri 418 MW, $V_S = 218 \text{ kV}$, $V_R = 237 \text{ kV}$ ve $\delta = 15^\circ$ verilmiştir. Hattın efektif empedansı X_{eff} aşağıdaki formül uygulanarak bulunabilir.

$$P = (V_S V_R / X_{\text{eff}}) \sin \delta \quad (4.5)$$

$$418 = [(218 \times 237) / X_{\text{eff}}] \sin 15^\circ$$

$$X_{\text{eff}} = 32 \, \Omega$$



Şekil 4.5 Verici / Alıcı durumları için devre şekli

Şekil 4.5 (a)'da görüldüğü üzere Q3 ve Q4 tristörleri, diğer tristörler kesimde iken ilettime geçiyorlar. Tristör grupları arasında uygun ateşleme konfigürasyonları ile istenilen değerler elde edilebilmektedir. Böylece hattın sonuç olarak net reaktansı $54 - 24 + 4 = 34 \, \Omega$ oluyor. İletilen gerçek güç böylece;

$$P = [(V_S V_R) / X_{\text{eff}}] \sin \delta = [(218 \cdot 237) / 34] \sin 15^\circ = 393 \text{ MW}$$

393 MW, max. nominal güç olan 418 MW'a son derece yakındır. Bu duruma ait fazör diyagramı Şekil 4.5 (b)'de gösterilmiştir.

Örnek gösteriyor ki, tristör kontrollü seri kondansatörler, iletim hattının termal kabiliyetiyle ihtiyaç duyulan herhangi bir güç için devreyi açıp kapayabilirler.

Tristörlerin iletim periyodunu azaltmak bazı uygulamalarda yararlıdır, böylece indüktörlerin efektif reaktansı X_a , kendi gerçek değerinden daha büyük olur. Verniyer kontrolü, iletim hattının efektif empedansını geniş bir değer aralığında değiştirmek için TCSC kontrolörüne imkan verir.

Örnek 1'e geri döndüğümüzde, iletim periyodunun daha kısa olduğunu farz edersek, indüktörün efektif reaktansının değeri $1,71 \, \Omega$ yerine $4 \, \Omega$ olur. Bunun sonucunda da 12

Ω 'luk kondansatör ile 4 Ω 'luk reaktansın paralel kombinasyonundan indüktif reaktans 6 Ω olur. Şöyle ki;

$$X_p = [(X_c X_a) / (X_c - X_a)] [(12 \times 4) / (12 - 4)] = +6 \Omega \text{ (indüktif)}$$

Bir başka açıdan, eğer iletim periyodu daha da kısaltılırsa efektif empedans 36 Ω 'a çıkabilmektedir. Bu koşullar altında, LC paralel kombinasyonu sonucunda 18 Ω 'luk kapasitif reaktans ortaya çıkar. Şöyle ki;

$$X_p = [(X_c X_a) / (X_c - X_a)] = [(12 \times 36) / (12 - 36)] = -18 \Omega \text{ (kapasitif)}$$

Verniyer kontrolü, özellikle iki bölge arasında kararlı (dengeli) problemler oluştuğunda avantajlıdır. Düşük frekanslı güç osilasyonları, iletim hattında güç akışı modülasyonu ile sönümlü hale getirilebilmiştir (Poyraz, 2002).

Bonneville Elektrik İdaresinin Kuzey Oregon' da kurmuş olduğu, 500 kV - 60Hz - 3 faz TCSC sistemi gerilime bağlı değişken dirençler (MOV) tarafından direkt olarak korunan 6 adet TCSC modülünden meydana gelmiştir. Bu sistemin teknik özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

1. Nominal sistem gerilimi (hattan hata) = 500kV
2. Nominal hat akımı = 2900A
3. Nominal 3 fazlı dengeleme = 20IO2MVar
4. Her fazdaki (indüktanslar devrede değilken) nominal kapasitif reaktör 8 Ω
5. Her fazdaki maksimum efektif kapasitif reaktans: 24 Ω (indüktörler, geciktirilmiş iletim modundayken)
6. Her fazdaki efektif indüktif reaktans: 1,22 Ω
7. TCSC, aşağıdaki aşırı yük koşullarına karşı koymak için tasarlanmıştır;
8. 30 dakikada aşırı yük akımı = 4350 A
9. 1 saniyede aşırı yük akımı = 5800 A
10. maksimum arıza akımı = 20,3 kA
11. Tristör valfindeki maksimum tepe arıza akımı 60 kA

5. VSC ve TEMEL ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

5.1 Giriş

Bu bölümde VSC ' lerin temel çalışma prensiplerinden bahsedilmektedir. VSC' lerin ana devre konfigürasyonları, fonksiyonları ve genel kontrol yöntemleri ile birlikte çalışma şekillerine kısaca değinilmiştir.

5.2 Yüksek Güç Gate Turn-Off Yarı İletken Cihazlar

Kendinden komutasyonlu konvertörler iki grupta incelenebilir. Birincisi VSC' dir. VSC DC terminalleri üzerinden DC bir gerilim kaynağından beslenir. Diğer CSC (Current Source Converter) dir. CSC ise DC tarafa bağlanmış bir DC akım kaynağından oluşur. Her ikisinin çıkış dalga şekilleri farklıdır. Genel anlamda her ikisi de farklı değer ve faz açısında çıkış dalga şekli üretebilen akım veya gerilim kaynağı gibi davranırlar. Ekonomik ve performans yönünden bakıldığında VSC ler tercih edilmektedir. Bu tezde VSC kullanan sistemlerden bahsedilmektedir.

İstenen çıkış dalga şeklinin elde edilebilmesi için VSC deki yarı-iletken anahtarlama elemanlarının intrinsic turn-off özellikte olması veya zorlanmış komutasyon üretebilecek yardımcı devreye sahip olması gerekmektedir. Akım, iki yönlü anahtar (bimodal switch) olarak adlandırılan tam kontrollü yarı iletken anahtarlar sayesinde kapı kontrolü ile başlatılabilir veya sönmümlendirilebilir. 1981 de ilk defa deneysel amaçlı olarak 20 MVAR gücünde bir Static Var Kompanzatör ün geliştirilebilmesi için zorlanmış komutasyonlu tristör kullanılmıştır. Daha sonra GTO tristörlerin gelişimi, gerilim ve akım değerlerinin artışı ile Advanced Static Var Generator (ASVG) olarak adlandırılan 1 MVAR Static Var Kompanzatör demonstrasyon modeli yapılmıştır (Edwards, 1988). ASVG, klasik Static Var Kompanzatörler gibi büyük kapasitör veya reaktör grupları yerine GTO tristörlü VSC kullanmaktadır.

GTO' ların gerilim ve akım kapasitesi oldukça artmıştır. Günümüzde 6000V, 6000A GTO ların kullanımı mümkündür. Gelişen teknoloji, yüksek gerilimde çalışan VSC için gerekli olan turn-off valf in oluşumu için gerekli olan GTO ların seri bağlantısına olanak sağlamaktadır. Yüksek anahtarlama kayıpları ve koruma devrelerindeki önemli kayıplar GTO tristörler için büyük bir dezavantajdır. Bunun için anahtarlama frekansı 300Hz ile 500Hz arasında değişen maksimum frekans ile sınırlandırılmıştır (Mohan, 1995). Yüksek güç yarıiletken teknolojisindeki gelişmelerle birlikte IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor),

MOS (MOS Turn-Off Thyristor), ETO (Emitter Turn-Off Thyristor), IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) gibi yüksek kesim kapasiteli elemanlar bu aileye katılmıştır.

IGBT, düşük güçlerden 30-40 MW' a kadar geniş bir alanda kullanıma sahiptir. Hızlı iletim-kesim kapasitesi ve bu sayede yüksek frekansta çalışan PWM konvertör de kullanılabilmesi avantajdır. Diğer taraftan transistör oluşundan dolayı geçirme yönünde yüksek bir gerilim tutma (forward voltage drop) özelliğine sahiptir. Ancak anahtarlama kayıpları az ve akım sınırlama kapasitesi yüksektir.

MTO, Silicon Power Corporation tarafından tasarlanmış ve üretilmiş bir yarıiletken güç elemanıdır. Orta ve yüksek güç endüstriyel ve FACTS uygulamalarında yüksek bir kullanım potansiyeline sahiptir. Kesimde transistör kullandığından dolayı anahtarlama kaybı azdır. Bu sayede koruma devresi , dv/dt gibi sorunları aşmıştır.

ETO yakın dönemde Virginia Power Electronics Center tarafından tristör ve transistör özellikleri verilerek geliştirilmiştir. GTO nun sahip olduğu kesim kapasitesi, düşük anahtarlama kaybı, koruma devrelerindeki fiyat düşüşü gibi özelliklere sahiptir.

IGCT ise Mitsubishi tarafından geliştirilmiştir. Düşük fiyat, basit mimari, yüksek verim karakteristikleri gibi GTO teknolojisi ve tristörün optimum kombinasyonundan elde edilmiştir (Mohan, 1995). Hızlı kesim ve düşük anahtarlama kaybı sayesinde ileride FACTS uygulamalarında GTO nun yerini alması beklenmektedir. 0,5 MVA dan 100 MVA' e kadar olan uygulamalarda anahtar bileşen olacaktır. 1996 da Almanya'da IGCT inverter kullanılan 100MVA'lık uygulama bunun kanıtıdır (Steimer, 1999).

Tüm bu turn-off özellikli yüksek güç yarıiletken elemanlar, turn-off özelliği olmayan tristörden pahalıdır ve kayıpları fazladır. Ancak sistemin geneli düşünüldüğünde konvertör konsepti toplam maliyet düşüşünde önemli bir etkiye sahiptir.

5.3 VSC' nin Temel İşletim Prensipleri

5.3.1 Temel Devre Konfigürasyonu

VSC DC terminallerindeki gerilimi uygun anahtarlama ile kontrol edilebilir frekans, değer ve faz açısında AC gerilime çevirir. Çıkış gerilimi kararlı veya değişken değer ve frekansta olabilir. FACTS uygulamalarının tasarlanmasında, çıkış gerilimi dalga şeklinin konvertörün bağlandığı güç sisteminin temel frekans değeri ile aynı ve sabit olduğu; yüksek gerilim ve harmoniklerin bir çok problem çıkaracağı farz edilir.

Bu tür konvertörlerde AC çıkış geriliminin değerini kontrol edebilmek için DC giriş gerilimi kontrol edilebilir. Çıkış AC gerilimi dalga şekli kare dalgaya benzemektedir ve bu sebeple kare-dalga doğrultucu olarak adlandırılırlar. Ancak bunun bir dezavantajı vardır; çıkış gerilimi dalga şekli düşük dereceli harmonikler içermektedir, ki bu da filtreleme gerektirmektedir. Ayrıca AC çıkış gerilimi DC gerilime o da DC kapasitörün gerilim ve akım kapasitesine bağlı olduğundan belirli sınırlar içerisinde bir çalışma alanı oluşmaktadır.

DC gerilim, DC kapasitörün maksimum gerilim değerinin üzerine çıkmamalı ve düşük gerilim şartlarından dolayı oluşabilecek tristör ateşleme hatalarından sakınmak için belirli sınırlar içerisinde sabit bir değerle tutulmalıdır.

Diğer taraftan DC giriş geriliminin sabit tutularak konvertörün kazancının değiştirilmesi ile konvertör çıkış gerilimi kontrol edilebilir. Çıkış geriliminin değerinin bu şekilde kontrolü PWM kontrolü ile olur. Doğrultucu kazancı AC çıkış geriliminin DC giriş gerilimine oranı ile ifade edilir.

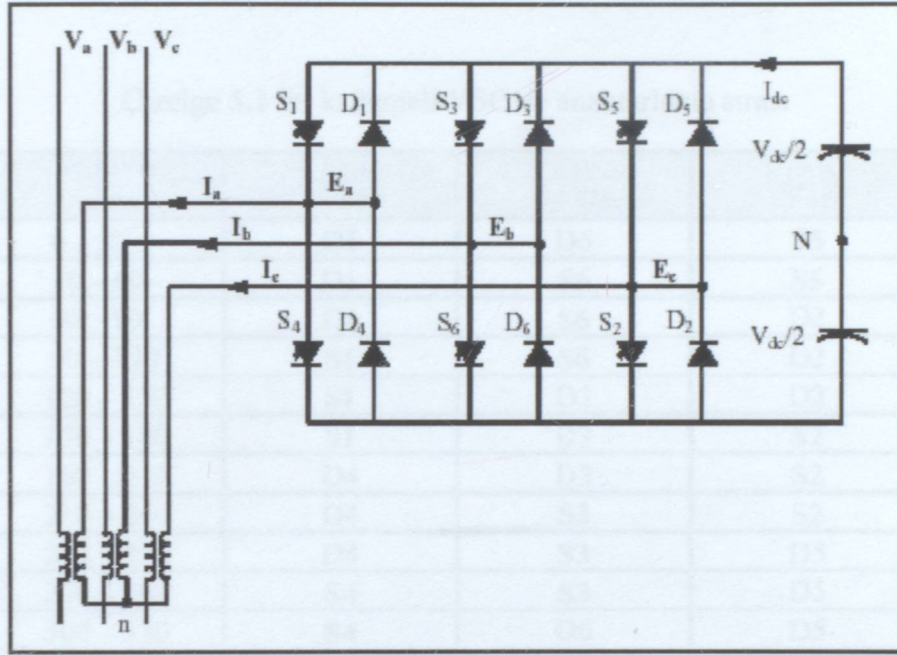
Günümüzde PWM kontrolü ekonomik olarak öngörülmektedir. Yüksek hızda kesime giren ve fazla anahtarlama kaybı olmayan anahtarlama elemanlarının kullanımının yaygın ve ucuz olması yakın zamanda beklenmektedir.

Sistemin AC terminallerinin transformatör üzerinden güç sistemine bağlı olduğu gibi DC terminallerde DC kapasitörlere bağlıdır. DC kapasitör DC akımda oluşabilecek her türlü değişikliğe - DC gerilim sabit - dayanabilecek şekilde tasarlanmıştır, aynı zamanda kalıcı hal rejiminde DC gerilim kaynağı olarak düşünülebilir. Transformatörün burada iki rolü vardır; kapasitörün deşarjı ve konvertörün yüksek gerilim sistemine bağlantısı.

Altı valf ile iki kademeli köprüden oluşan VSC devresi en temel konfigürasyonu Şekil 5.1 de gösterilmiştir. Valfler yarıiletken turn-off anahtar (transistör) ve antiparalel diyottan oluşmaktadır. Anahtarlar geçirme yönünde tutma gerilimine sahiptir, diyotlar ise anahtarların tek yönlü olmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte her köprü kolunda iki valf vardır. Burada amaç konvertörün hem AC taraftan DC tarafa akım geçecek şekilde doğrultucu olarak; hem de DC taraftan AC tarafa akım geçecek şekilde inverter olarak çalışmasını sağlamaktır.

AC taraftan DC tarafa bir akım var ise sistemin doğrultucu olarak çalıştığı ve akımın pozitif olduğu farz edilir. DC taraftan AC tarafa bir akım var ise sistemin inverter olarak çalıştığı ve akımın negatif olduğu farz edilir. AC taraftaki konvertör-transformatör bağlantısı incelendiğinde konvertör geriliminin güç sistemine seri veya paralel bağlanabileceği

görülmektedir. Konvertörün iletim sistemine seri bağlanması durumunda amaç gerilimi yükseltip alçatarak aktif/reaktif güç akışını kontrol etmektir, bu sisteme Dinamik Gerilim Düzenleyici (DVR) adı verilir. Sisteme reaktif ve kapasitif akım vererek gerilimi düzenlemek için konvertörün AC sisteme paralel bağlanmasıyla oluşturulan sisteme Paralel Senkron Statik Kompanzasyon (STATCOM) uygulaması denir.



Şekil 5.1 Üç fazlı iki kademeli VSC devresi

5.3.2 İşletim Sistemi ve Temel İlişkiler

Şekil 5.1 de gösterilen 3 fazlı 2 kademeli VSC de 6 tane kontrol edilebilir anahtar (GTO vb.) vardır. Bunun yanında aynı koldaki kontrol edilebilir anahtar her kesime girdiğinde endüktif akıma yol açan 6 adet de kontrolsüz anahtar (diyot) bulunmaktadır. Aynı kol üzerindeki GTO ve Diyot aynı anda iletimde veya kesimde olamaz. Konvertörün her üç kolunda birbiriyle 120° açığına sahip olduğuna göre her kolda sürekli 3 anahtar iletimde olacaktır. Anahtarların iletime veya kesime girmesi için tetiklenmesi gereklidir. Bu ise belirli bir düzen dahilinde olmalıdır. 30° lik aralıklarla tetikleme yapılır. Tetikleme sırasını gösterir kombinasyon Çizelge 5.1 de verilmiştir. Herhangi 3 GTO arasında bir kombinasyon olmadığı, bu iletim-kesim kombinasyonunun 2 GTO ve 1 Diyot arasında veya 1 GTO ve 2 Diyot arasında olduğu unutulmamalıdır.

Tablo 5.1 den anlaşıldığı üzere her bir valf 180° ($\pi/2$) kapalı kalmaktadır. D1 ve S1 den

oluşan üst valf 0° - 180° arasında iletimde iken alt valf (D4-S4) 180° - 360° arasında iletimdedir. Bu kombinasyonun konvertörün her kolunda 120° lik bir farka sahip olduğu söylenebilir. B fazındaki D3-S3 valfi a fazından 120° sonra iletime geçecektir. Aynı şekilde D5-S5 valfi de iletime geçmek için 240° beklemektedir. Birinci faz gerilimi V_a 'nın Fourier analizinde temelde $V_{dc}/2$ değerinde periyodik kare dalgalardan meydana gelen, 3 ve 3ün katları ve tek harmonikleri barındıran bir dalga şekli olduğu görülmektedir (Gülgün, 1999).

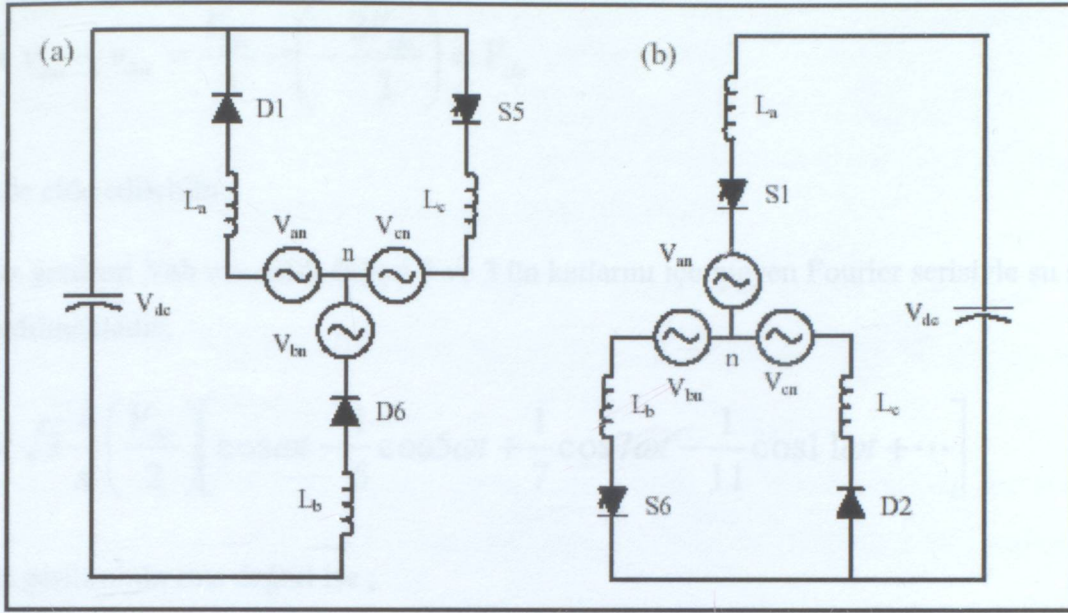
Çizelge 5.1 İki kademeli VSC de anahtarlama sırası

PERİYOT Derece	İLETİM A Fazı	İLETİM B Fazı	İLETİM C Fazı
0 – 30	D1	D6	S5
30 – 60	D1	S6	S5
60 – 90	D1	S6	D2
90 – 120	S1	S6	D2
120 – 150	S1	D3	D2
150 – 180	S1	D3	S2
180 – 210	D4	D3	S2
210 – 240	D4	S3	S2
240 – 270	D4	S3	D5
270 – 300	S4	S3	D5
300 – 330	S4	D6	D5
330 – 360	S4	D6	S5

$$V_a(t) = \frac{4}{\pi} \left(\frac{V_{dc}}{2} \right) \left[\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \dots \right] \quad (5.1)$$

Şekil 5.2 deki eşdeğer devreye bakıldığında a,b ve c fazlarının DC kapasitör bağlantısının D1,D6 ve S5 in 0° - 30° arasında iletimde olmasına bağlı olduğu görülmektedir. Bu eşdeğer devreden her fazın akım gerilim ilişkisi çıkarılabilir. Burada transformatör direnci ihmal edilirken konvertör çıkışına bağlı yükün saf endüktif yük olduğu kabul edilir. Şekil 5.2 (a)'da görülen a ve c fazlarının endüktansları birbirine paralel olup aynı değerdedir. Ancak b fazı ile seri olduğundan dolayı gerilim tüm fazlarda eşit değildir.

Her faza ait gerilim değişiminin tam kombinasyonu Çizelge 5.2 de verilmiştir.



Şekil 5.2 Eşdeğer devre (a)0°-30° (b)90°-120°

Çizelge 5.2 Faz-Nötr gerilimleri için anahtarlama kombinasyonu

PERİYOT Derece	Van	Vbn	Vcn
0 – 30	$+V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$+V_{dc}/3$
30 – 60	$+V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$+V_{dc}/3$
60 – 90	$+2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
90 – 120	$+2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
120 – 150	$+V_{dc}/3$	$+V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
150 – 180	$+V_{dc}/3$	$+V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
180 – 210	$-V_{dc}/3$	$+2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
210 – 240	$-V_{dc}/3$	$+2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
240 – 270	$-2V_{dc}/3$	$+V_{dc}/3$	$+V_{dc}/3$
270 – 300	$-2V_{dc}/3$	$+V_{dc}/3$	$+V_{dc}/3$
300 – 330	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$+2V_{dc}/3$
330 – 360	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$+2V_{dc}/3$

Faz-nötr gerilimlerinin çıkış değerleri Çizelge 5.2 de gösterildiği gibi $\pi/6$ aralıklarla sürekli değişen $V_{dc}/3$ ün katları şeklindedir ve 3'üncü harmoniklerden bağımsızdır.

$$v_{an} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{V_{dc}}{2} \right) \left[\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \frac{1}{11} \cos 11\omega t - \dots \right] \quad (5.2)$$

V_{ab} , faz-nötr gerilimi V_{an} ye göre 30° kaydırılmıştır ve değeri $\sqrt{3} \cdot V_{an}$ dir. Örneğin 0° - 30° aralığında faz-faz gerilimi V_{ab} ;

$$v_{ab} = v_{an} - v_{bn} = \frac{V_{dc}}{3} - \left(-\frac{2V_{dc}}{3} \right) = V_{dc} \quad (5.3)$$

şeklinde elde edilebilir.

Faz-faz gerilimi V_{ab} nin anlık değeri 3 ve 3 ün katlarını içermeyen Fourier serisiyle şu şekilde ifade edilmektedir;

$$v_{an} = \sqrt{3} \frac{4}{\pi} \left(\frac{V_{dc}}{2} \right) \left[\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5 \omega t + \frac{1}{7} \cos 7 \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t + \dots \right] \quad (5.4)$$

faz-faz geriliminin rms değeri ise ;

$$V_{LL} = \sqrt{\left(\frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} V_{dc}^2 d(\omega t) \right)} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} = 0.8165 V_{dc} \quad (5.5)$$

şeklinde ifade edilir.

AC taraftan DC tarafa enerji transferi veya bunun tam tersinin olabilmesi için devredeki kayıplar ihmal edildiğinde AC ve DC terminallerdeki anlık net güç değerinin eşit olması gerekmektedir. Bunun için konvertörün giriş terminallerine DC kapasitör bağlanır. Bu durumda konvertör, AC sistemden kapasitörün istenen gerilim seviyesinde tutulması ve iç kayıpların karşılanması için, bir miktar gerçek güç çekecektir. Konvertör çıkış gerilimi ve AC sistem gerilimi aynı fazda tutulabilirse ortalama DC gerilim değişmeyecektir.

Daha öncede belirtildiği gibi aynı koldaki anahtarlar eş zamanlı olarak iletme veya kesime giremezler. Eğer aynı koldaki tüm anahtarlar aynı anda iletimde olsa idi, kapasitör çok hızlı bir şekilde deşarj olurdu. Bu deşarj akımı oldukça yüksek değerde olacağından dolayı yarı-iletken anahtarlama elemanlarının patlamasına neden olurdu.

Bu sistemde kontrol edilebilen anahtardan (GTO) diyota doğru doğal bir komütasyon oluşmaktadır. Bu sayede AC akım kesilmemektedir. Negatif periyotta GTO1'den D1'e pozitif periyotta ise GTO4'ten D4'e akım iletilmektedir. Bu durumda devre saf endüktif iken, her valfteki anahtar ve diyot her çevrimde 90° aralıkla AC akım taşır.

Çıkış kapasitif değerde olduğunda, akımın tepe değerinde kontrollü anahtar kesime sokulmalıdır. Bu durum; konvertör çıkış gerilimi AC sistem gerilimini aştığında ve akım, konvertör çıkış geriliminden 90° ileri fazda olduğunda (devre kayıpları ihmal) meydana

gelmektedir. Sistem endüktif yükte iken AC akımın sıfır noktalarında anahtarlar doğal komutasyonludur.

Özellikle vurgulanmalıdır ki; gerilim kaynağı basit bir reaktif cihaz olduğundan AC akım, AC sistem hat gerilimine göre 90° ileri veya geri fazda olmalıdır.

Konvertöre bağlı olan DC kapasitör yerine DC batarya kullanılırsa konvertörün çalışma bölgesi 2 yarım çevrimden 4 yarım çevrime genişleyecek ve AC akım ile AC gerilim arasında herhangi bir faz açısı oluşacaktır.

Konvertör çıkış gerilimi AC sistem geriliminin altında olduğunda (küçük bir açı ile) ; kapasitöre doğru akan DC akım pozitif DC bileşene sahiptir. Kapasitör şarj edilerek DC gerilim artırılmaktadır.

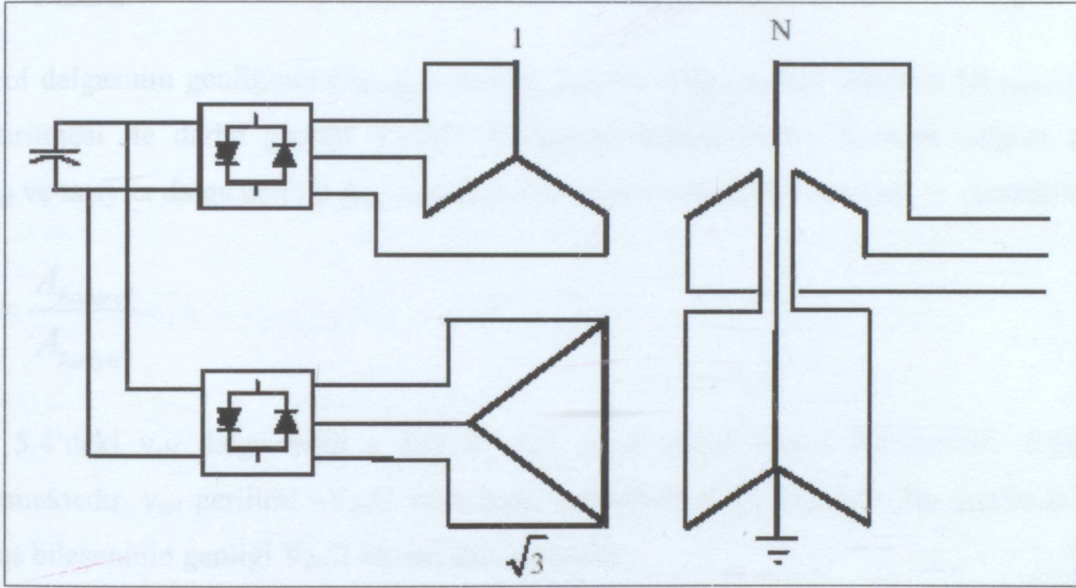
5.3.3 Harmoniklerin Azaltılması

Yüksek gerilim güç uygulamalarında dikkat edilmesi gereken çok önemli bir konu da harmoniklerin kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutulmasıdır. Bunun için 3 yöntem sayılabilir; örneğin 6-darbeli 2 kademeli multi-bridge konvertördeki köprü sayısı artırılarak düşük frekanslı harmonik bileşenlerden kurtulunabilir. Harmonik bileşenleri azaltmak için köprü sayısı 2 den 3 e çıkarılabilir. Bu; anahtarlama frekansının temel frekansa eşit olduğu ve DC gerilimin sabit tutulduğu sürece çıkış geriliminin temel bileşenin kontrolü gibi önemli bir avantaj sağlamaktadır (Gyugyi, 1994). Diğer bir yöntem olarak PWM metodu sayılabilir. PWM metodu, 6-darbeli konfigürasyonda hızlı anahtarlama esasına dayanarak düşük frekanslı harmonikleri yüksek frekanslara kaydırmaktadır. Toplam harmonik akım enjeksiyonu düşmektedir ancak AC çıkış gerilimindeki toplam harmonik distorsiyonu (THD) değişmemektedir. Farklı PWM teknikleri ile ilgili geniş bilgi referans (Boost, 1988) ten elde edilebilir. Üçüncü yöntem olarak filtre kullanımı sayılabilir, ancak maliyeti oldukça yüksektir.

5.3.4 12 Darbeli Konvertör

Gerilim kaynaklı konvertörün çıkış akım ve gerilim dalga şekilleri sinüzoidal yapıdan uzaktır. 6-darbeli konvertörlerin çıkış gerilim dalga şekilleri, temel dalga frekansının $(6k+1)f$ katlarındaki frekansların harmoniklerine sahiptir. Akım ise $(6k)f$ katlarındaki bileşenlere sahiptir. Burada f temel dalga frekansı; $k=1,2,3,\dots$ Bu harmoniklerin elimine edilmesi için pasif filtreler kullanılmaktadır. Bu metot düşük frekans değerleri için olduğundan L ve C bileşenlerinin boyutları ve değerleri artacağından dolayı yüksek maliyetli olup tercih edilmemektedir.

Harmonik derecesini indirmenin diğeri bir yolu ise konvertör sayısını artırmaktır. Bu yöntemde 6-darbeli konvertörlerin uygun transformatör üzerinden çoklu bağlantısı gereklidir. Ortak bir DC kaynaktan $2\pi/6n$ faz farkı ile işletilen $6n$ -darbeli konvertörde “n” adet 6-darbeli konvertör seri bağlanmıştır. 12-darbeli konvertör ve 2 adet 6 darbeli köprünün seri bağlantısı ile oluşmuştur. Şekil 5.3 te gösterilen 12-darbeli konvertörde, ikinci konvertör Δ sargıya bağlı olup birinci konvertörün faz-nötr gerilimiyle aynı fazda olabilmesi için 30° kaydırılmıştır. Bu şekilde $12n \pm 1$ dereceden harmoniklerin dışındaki tüm harmonikler yok edilmiştir.



Şekil 5.3 12-darbeli VSC(Gyugyi, 1994).

Konvertör çıkış geriliminin değeri, DC giriş değerinin değiştirilmesi ile kontrol edilir. PWM ile karşılaştırıldığında bu yöntem dezavantajlıdır. Diğer taraftan çoklu konvertör bağlantısı sayesinde konvertör sayısı artırılarak konvertörlerin oluşturduğu harmonikler kontrol edilebilir ve kabul edilebilir sınırlar altına çekilebilmektedir.

5.3.5 Darbe Genişlik Modülasyonlu (PWM) Konvertör

Bu yöntemde en büyük avantaj, konvertör kazancının kontrol edilebilmesi ile konvertör çıkış gerilimin kontrolünün mümkün olmasıdır. Farklı konvertör konfigürasyonları ile oluşturulmuş bir çok PWM metodu vardır. En yaygın kullanılan PWM metodunda kontrol dalga formu olarak anılan sinüs dalgası vardır. Bu dalga şeklinin değerine bağlı olarak her darbenin genliği değişmektedir. Bu değişim Şekil 5.4’de gösterilmiştir(Boost, 1988).

Şekil 5.1’de gösterilen 2-kademeli üç-fazlı konvertördeki anahtarlar, kontrol dalgasının sıfır noktaları ve o faza ait taşıyıcı dalganın iletim-kesim darbeleri ile kontrol edilir. Taşıyıcı dalganın frekansı, çıkış geriliminin (50Hz veya 60Hz) temel frekansını belirlemektedir. $f_{\text{taşıyıcı}}$ taşıyıcı dalga frekansı; f_{kontrol} kontrol dalgası frekansı olmak üzere taşıyıcı dalga frekansının kontrol frekansına oranı modülasyon oranını vermektedir.

$$m_f = \frac{f_{\text{taşıyıcı}}}{f_{\text{kontrol}}} \quad (5.6)$$

Kontrol dalgasının genliğinin (A_{kontrol}) sıfırdan taşıyıcı dalga genlik değerine ($A_{\text{taşıyıcı}}$) kadar değiştirilmesi ile darbe genliği 0° - 180° aralığında değişmektedir. Kontrol dalgası genliği A_{kontrol} ve taşıyıcı dalga genliği $A_{\text{taşıyıcı}}$ arasındaki oran modülasyon oranı m_a yı vermektedir.

$$m_a = \frac{A_{\text{kontrol}}}{A_{\text{taşıyıcı}}} \quad (5.7)$$

Şekil 5.4’deki v_{aN} dalga şekli a fazı ile DC ortak nokta arasındaki gerilim değişimini göstermektedir. v_{aN} gerilimi $-V_{dc}/2$ ve $+V_{dc}/2$ aralığında değişmektedir. Bu gerilimin temel frekans bileşeninin genliği $V_{dc}/2$ nin m_a katı kadardır.

$$V_{aN, \max} = m_a \frac{V_{dc}}{2} \quad (5.8)$$

Şekil 5.4’de gösterilen v_{bN} dalga şekli v_{aN} den 120° geri fazda olup b fazı ile DC ortak nokta arası çıkış gerilimidir. Faz-nötr gerilimi v_{an} , wye-bağlı indirici transformatörün floating-nötr (n) noktası ile DC ortak nokta arasındaki farktır.

$$v_n = \frac{v_{aN} + v_{bNa} + v_{cN}}{3} \quad (5.9)$$

Şekil 5.4 deki dalga şekilleri için m_f değeri 9 dur. m_f değeri tek sayı olduğu sürece faz-faz ve faz-nötr gerilimlerinde tek simetri oluşacaktır. Bu durumda konvertör çıkış geriliminin Fourier analizi yapıldığında cosinüs serilerinin katsayıları sıfır iken sinüs serilerinin katsayıları mevcuttur. Yani dalganın cosinüs bileşeni yoktur. Bu durumda v_{an} ve v_{ab} gerilimlerinde sadece tek harmonikler mevcuttur. Frekans modülasyon oranı m_f ’nin m_f , $2m_f$, $3m_f$..vb gibi anahtarlama frekansı ve katları çevresindeki bant aralığındaki harmonikler

üzerinde etkisi vardır.

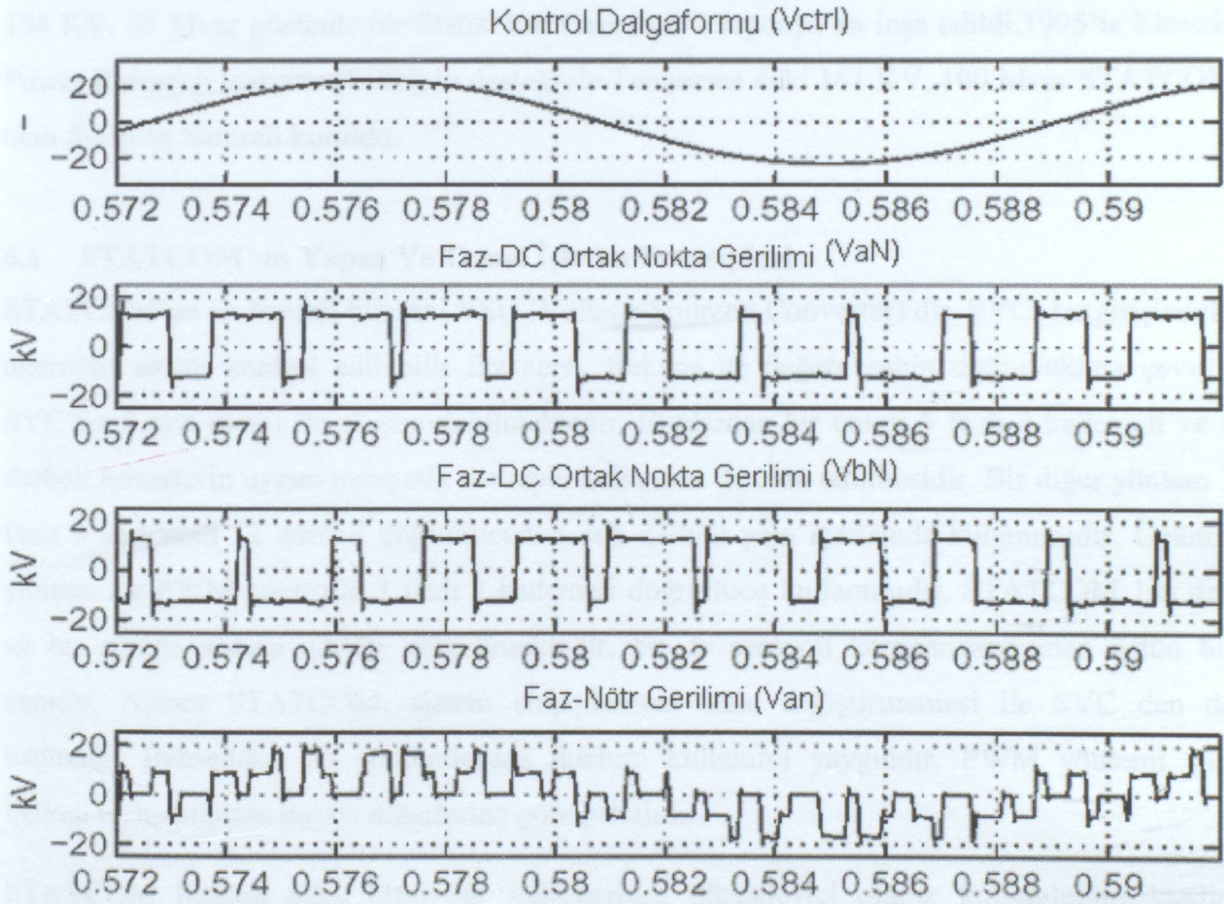
Unutulmamalıdır ki; 3-fazlı VSC' de 3.harmonikler elimine edilmiştir. Hatta frekans modülasyon oranı (m_f) harmonikleri de – aşağıda gösterilmiştir- yok edilebilir

$$m_f, m_f \pm 2$$

$$2m_f, 2m_f \pm 1$$

$$3m_f, 3m_f \pm 2$$

$$4m_f, 4m_f \pm 1, \dots$$



Şekil 5.4 PWM kontrollü VSC nin EMTP cevabı.

6. STATİK SENKRON KOMPANZATÖR (STATCOM)

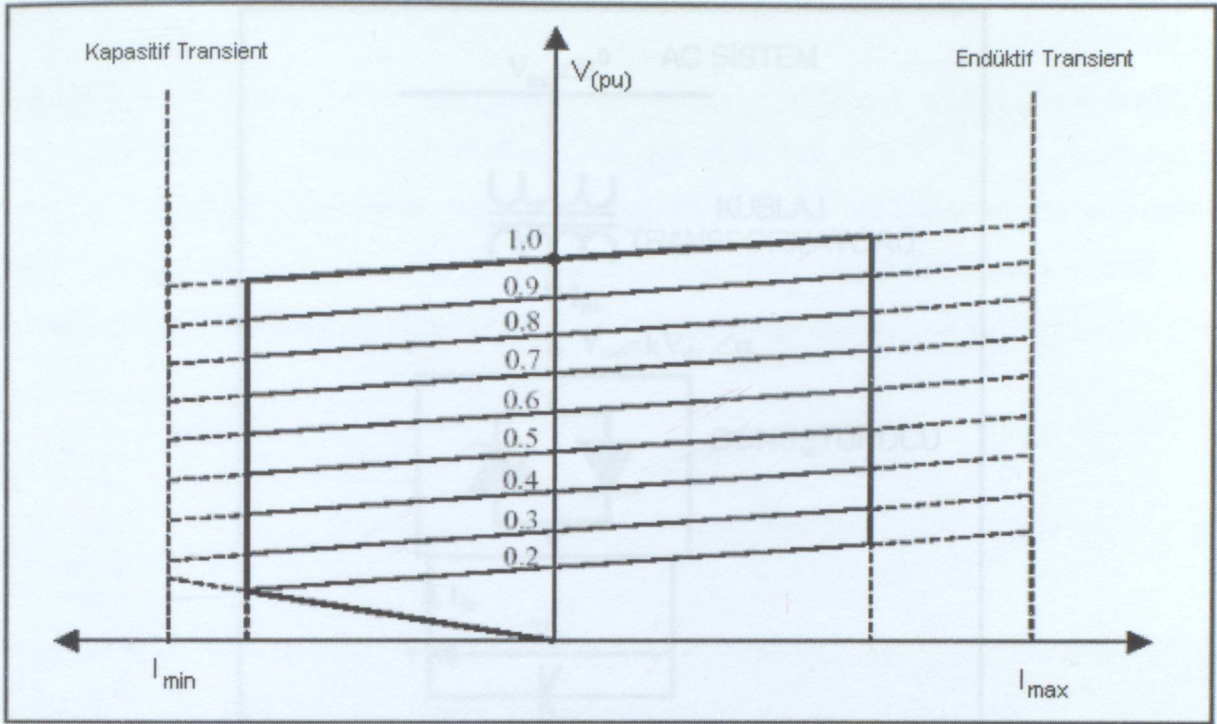
1980'lerde Mitsubishi Electric ve Kansai Electric firmaları sürekli ve kontrol edilebilir Var kaynağı elde edebilmek için güçlendirilmiş komutasyonlu devreler kullanarak ilk prototip olan 77 kv, 20 MVA gücündeki Statik Var Generatörünü (SVG) geliştirdiler. 1986'da geliştirilmiş Statik Var Generatörü olarak adlandırılan ilk STATCOM kuruldu. Yarı iletken eleman olarak GTO kullanıldı. Sistem pasif filtrelerle birlikte çalışan 2 tane 6 darbeli 2 kademeli köprüden oluşuyordu (Edwards, 1988). Kontrolörün 1 Mvar ile sınırlı olmasına rağmen önemi anlaşılmıştı. Kullanılan GTO tristörlerin çalışma aralığı 2500 V - 2000 A idi. 1991'de güç elektroniğindeki gelişmelere paralel olarak 4.5 KV-3 KA GTO'ların üretimiyle 154 KV, 80 Mvar gücünde bir Statik Var Generatörü Japonya'da inşa edildi. 1995'te Electric Power Research Institute (EPRI) in desteği ile Tennessee deki 161 KV, 100 Mvar STATCOM olan Sullivan Santrali kuruldu.

6.1 STATCOM'un Yapısı Ve Temel İşletim Prensipleri

STATCOM'un en önemli bileşeni VSC (Voltage Sourced Converter) dir. SVC' ler girişindeki alternatif akımı kontrol edilebilir faz açısı, frekans ve değere sahip doğru akıma çevirir. SVC'ler 3 ayrı metot ile oluşturulabilmektedir. Bunlardan bir tanesi 3 fazlı 2 kademeli ve 6 darbeli koverterin uygun manyetik devreyle kullanımı ile elde edilmesidir. Bir diğer yöntem 3 fazlı 3 kademeli 12 darbeli doğrultucunun çok darbeli yapı içerisinde kullanımıdır. Üçüncü yöntem ise PWM kontrollü 3 fazlı 2 kademeli doğrultucu kullanımıdır. STATCOM 1sn den az bir sürede sistem cevabı verebilmektedir, bu da senkron kompanzasyondan üstün bir yanıdır. Ayrıca STATCOM, sistem empedansını fazla değiştirmemesi ile SVC den de üstündür. Bahsedilen bu yöntemlerden ikisinin kullanımı yaygındır. PWM yöntemi yarı iletken elemanlardan dolayı diğerlerine göre pahalıdır.

STATCOM iletilen gücü arttırmak için gerilim düzenleyici olarak kullanılabilir. Düşük yüklerde gerilimin aşırı artışı önlediği gibi aşırı yüklerde de gerilim düşümünü önleyerek istenen sabit gerilimi elde edebilmektedir.

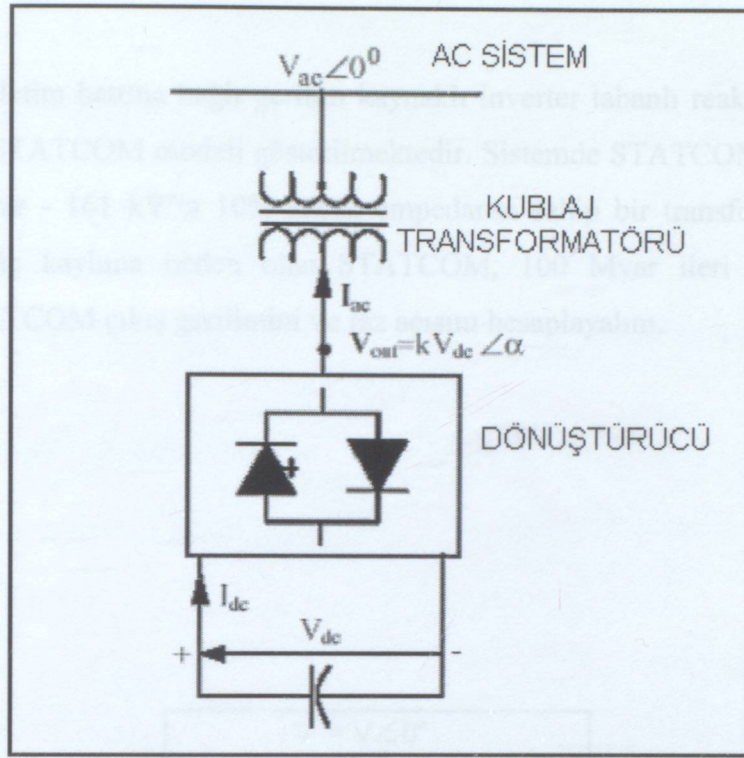
Şekil 6.1de STATCOM' a ait V-I karakteristiği verilmiştir. V-I karakteristiğinden, kublaj transformatörünün reaktansına bağlı olarak 0.15 pu gibi düşük gerilim değerlerini desteklediği görülebilmektedir (Uzunovic, 2001). Dc kapasitörlerin kayıpları beslemek için enerji tutması gibi; STATCOM da çok düşük gerilim şartlarında sistem gerilimini besleyebilir.



Şekil 6.1 STATCOM' a ait V-I Karakteristiği

STATCOM, endüktif ve kapasitif bölgelerde oldukça yüksek transient değerlere sahiptir. Ayrıca her iki bölgede aşırı yük oranı %20 dir. V-I karakteristiğindeki eğimden de anlaşıldığı gibi endüktif transient bölgedeki akım değeri diğer bölgelere oranla daha fazladır. Bunun sebebi de GTO' ların endüktif bölgede doğal komutasyonlu olmaları ve bu nedenle sürekli oluşan aşırı yüklenmelerin süre ve miktarının free-wheel diyotun maksimum akımıyla sınırlandırılmış olmasıdır. Transient bölgedeki kapasitif değer, GTO tristörün maksimum akım kesme kapasitesi ile tanımlıdır.

STATCOM temelde 3 ana bileşenden oluşmaktadır, kublaj transformatörü, VSC ve DC enerji saklama ünitesi. Enerji saklama ünitesi küçük DC kapasitörlerden oluşmaktadır. Bu sebeple STATCOM sisteme reaktif güç verip alabilmekle sınırlıdır. DC kapasitör yerine DC batarya veya başka bir DC gerilim kaynağı kullanıldığında çalışma aralığı 2 çeyrek periyottan 4 çeyrek periyoda çıkarak aktif ve reaktif güç kontrolü sağlanabilmektedir. Şekil 6.2'de temel yapısıyla STATCOM modeli verilmiştir.



Şekil 6.2 STATCOM'un temel yapısı

STATCOM'un çıkış gerilim değeri ve faz açısı değiştirilebilmektedir. Bu sayede doğrultucu anahtarlama ile DC taraftaki gerilim kontrol edilebilmektedir. Doğrultucu AC çıkış gerilimi $V_{out} = k \cdot V_{dc}$ ile ifade edilebilir. Burada k, doğrultucu konfigürasyonuna, anahtarlama darbe sayısı ve doğrultucu kontrolüne bağlı bir katsayıdır. Doğrultucu çıkış gerilimi ve AC sistem hat gerilimi arasındaki fark reaktif gücün kublaj transformatöründen sisteme mi yoksa sistemden kublaj transformatörüne mi olacağını belirler.

Doğrultucunun çektiği aktif güç, DC kapasitörlerin gerekli DC gerilim seviyesine şarj olması için gerekli güç ve doğrultucu anahtarlama kayıplarıdır. Her anahtarlama DC kapasitörler şarj ve deşarj olurlar, fakat kalıcı rejimde ortalama kapasitör gerilimi sabittir. Durum bu şekilde olmasaydı her anahtarlama konvertöre veya konvertörden sisteme güç akışı olacaktı. STATCOM'un sistemden çektiği veya sisteme verdiği aktif güç anahtarlama kayıpları ve DC kapasitörün boyutlarına bağlıdır. STATCOM çıkış akımı I_{ac} AC sistem gerilimi ile yaklaşık $\pm 90^\circ$ açısı sahip olmalıdır.

STATCOM'un sisteme olan etkisini bir örnekle anlamaya çalışalım;

Örnek 1.

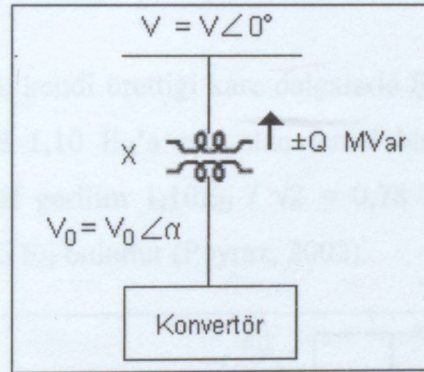
Şekilde 161 kV iletim hattına bağlı gerilim kaynaklı inverter tabanlı reaktif güç düzenleyici olan ± 100 Mvar STATCOM modeli gösterilmektedir. Sistemde STATCOM - hat bağlantısını sağlayan 100 Mvar - 161 kV'ta 10% kaçak empedansa sahip bir transformatör mevcuttur. 1MW toplam güç kaybına neden olan STATCOM, 100 Mvar ileri fazda reaktif güç ürettiğindeki STATCOM çıkış gerilimini ve faz açısını hesaplayalım.

$$V = 161 \text{ kV}$$

$$X = \%10$$

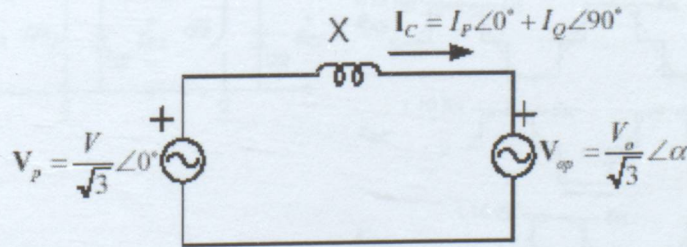
$$Q = 100 \text{ MVar}$$

$$P_{\text{kayıp}} = 1 \text{ MW}$$



Çözüm;

Sistemin tek-hat şeması şu şekilde gösterilebilir.



Hat-başından çekilen akım bileşenlerini hesaplarsak;

$$I_p = \frac{P_{\text{kayna}}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{1 \text{ MW}}{\sqrt{3} \cdot 161 \text{ kV}} = 3.59 \text{ A ve,}$$

$$I_Q = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{100 \text{ M var}}{\sqrt{3} \cdot 161 \text{ kV}} = 359 \text{ A}$$

bulunur. $V_{op} = V_p - j \cdot X \cdot I_C$ formülünde değerleri yerine koyarsak;

$$V_{op} = V_p - j \cdot X \cdot I_C = \frac{161kV}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ - j \cdot 0.1 \cdot \frac{(161kV)^2}{100M \text{ var}} (3.59 \angle 0^\circ + 359 \angle 90^\circ)$$

$$V_{op} = (93 + 9.3)kV \angle 0^\circ - 0.0093kV \angle 90^\circ = 102.3kV \angle 0^\circ - 0.093kV \angle 90^\circ$$

$$V_{op} = 102.3kV \angle -0.052^\circ \text{ elde edilir.}$$

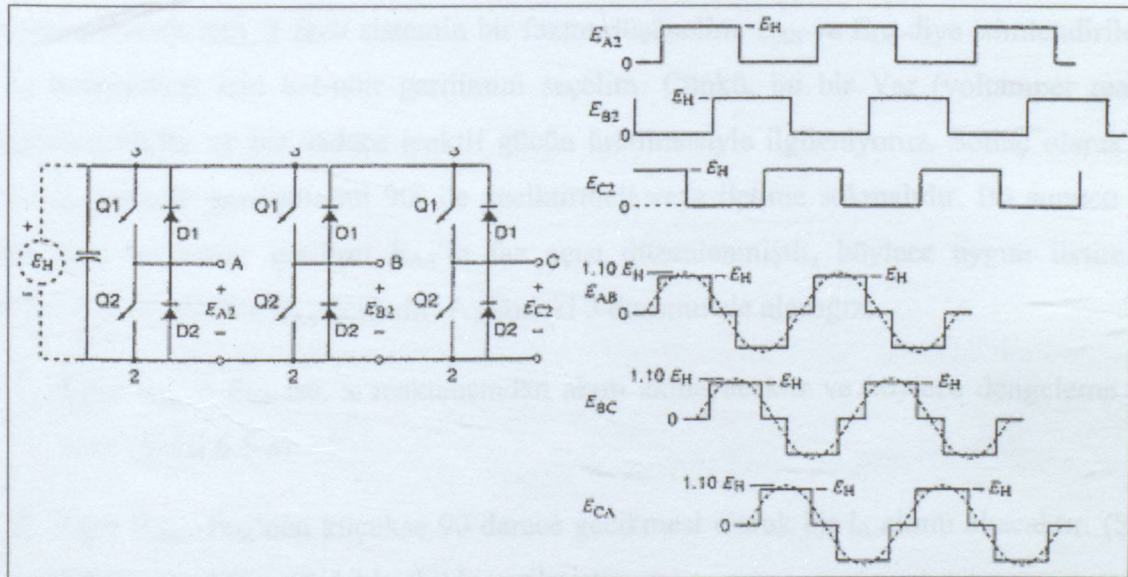
Buradan da STATCOM çıkış gerilimi;

$$V_o = \sqrt{3} \cdot 102.3kV = 177kV \text{ olarak bulunur.}$$

Faz açısı ise;

$$\alpha = -0.052^\circ \text{ dır.}$$

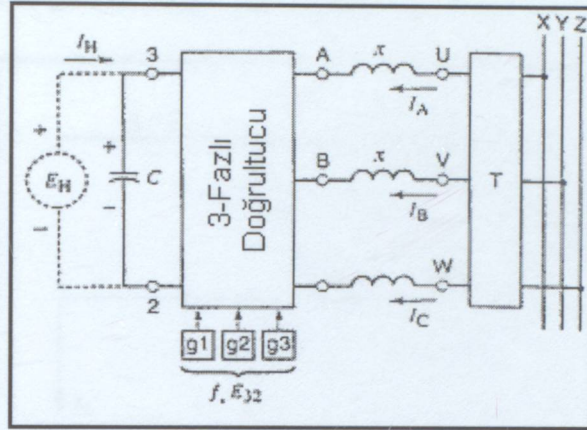
Temel STATCOM konverteri, kendi ürettiği kare dalgalarla Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Kare dalga gerilimleri, tepe değeri $1,10 E_H$ 'a eşit olan temel bir parça içerir. Buradaki E_H , dc gerilimdir. Fazlar arası efektif gerilim $1,10 E_H / \sqrt{2} = 0,78 E_H$ bulunur ve efektif hat-nötr gerilimi de $0,78 E_H / \sqrt{3} = 0,45 E_H$ bulunur (Poyraz, 2002).



Şekil 6.3 Statik var kompanzatoru için dalga şekilleri ve konverter şeması

Hat gerilimi temel 60 HZ frekansının 5. , 7. ve daha yüksek tek çarpanlı harmonikleri içerir. 3.'ün katı harmonikler yoktur.

Şekil 6.4 bir konverterin bağlantı şemasını göstermektedir. Bu bağlantı şeması, 3 fazlı gerilim iletim hattı x,y,z; 3 fazlı gerilim düşürücü bir transformatör T; her biri X olan 3 reaktans; 3 fazlı bir dönüştürücü; kapasitör C ve bir de gerilim kaynağı E_H içerir.



Şekil 6.4 Statik senkron kompanzatorün çalışma prensibi

E_H ayarlı değişkeni tarafından kontrol edilen A,B,C terminalleri arasındaki ac gerilimin genliği ve GTO kapısının uygun zamanlamasıyla kontrol edilen faz açısı, g_1 , g_2 , g_3 'ü tetikler. Böylece konverter geriliminin faz açısı, transformatörün ikinci tarafındaki U,V,W iletim hattı gerilimleriyle 0 ile 360° arasındaki herhangi bir değere oturabilir (Poyraz, 2002).

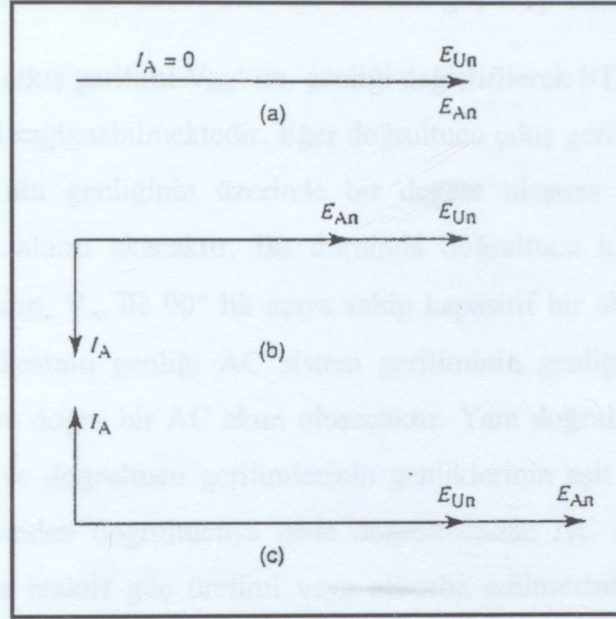
Devreyi anlamak için, 3 fazlı sistemin bir fazını düşünelim. E_{An} ve E_{Un} diye isimlendirilen A ve U terminalleri için hat-nötr gerilimini seçelim. Çünkü, bu bir Var (voltamper reaktif) kompanzatorüdür ve biz sadece reaktif gücün üretilmesiyle ilgileniyoruz. Sonuç olarak, hat akımı I_A , hat-nötr gerilimlerini 90° ile geciktirmeli veya ilettime sokmalıdır. Bu sonucu elde etmek için konverter gerilimi E_{An} 'in faz açısı düzenlenmiştir, böylece uygun iletim hat gerilimi E_{Un} ile birlikte E_{An} fazdadır. Aşağıdaki 3 durumu ele alacağız;

1. Eğer $E_{An} = E_{Un}$ ise, x reaktansından akım akmayacaktır ve böylece dengeleme sıfır olur. (Şekil 6.5-a)
2. Eğer E_{An} , E_{Un} 'den küçükse 90 derece gecikmesi olarak bir I_A akımı akacaktır. (Şekil 6.5-b). Genliği aşağıdaki şekilde verilmiştir;

$$I_A = (E_{Un} - E_{An}) / X \quad (6.1)$$

Bunun sonucu kompanzator, iletim hattından reaktif güç çeker. Dengeleyici bobinlerin olmadığı magnetik alanın üretilmediği büyük bir indüktans gibi davranır.

3. Eğer E_{An} , E_{Un} 'dan büyükse, I_A akımı 90° 'lik açıyla iletme girecektir. I_A 'nın genliği 6'daki formülle aynıdır, sadece eksidir. Bunun sonucunda konverter, iletim hattına reaktif güç boşaltır. Konverter, elektrostatik anodların ve elektrik olaylarının olmadığı büyük bir kapasitör gibi davranır. (Şekil 6.5-c)



Şekil 6.5 E_{An} değerine bağlı olan E_{Un} 'in fazör diyagramları

Dc güç beslemesi E_H ve birleştirilmiş kondansatör C' yi ele alalım. Konverter, gücü bütün yönlerde yani dc taraftan ac tarafa veya tam tersi yönde transfer edebilir.

Konverterin, faz açısının geciktirildiğini farz edelim. Bu durumda konverter iletim hattından aktif güç alır ve gücün de güç kaynağı tarafından emilmesi gerekir.

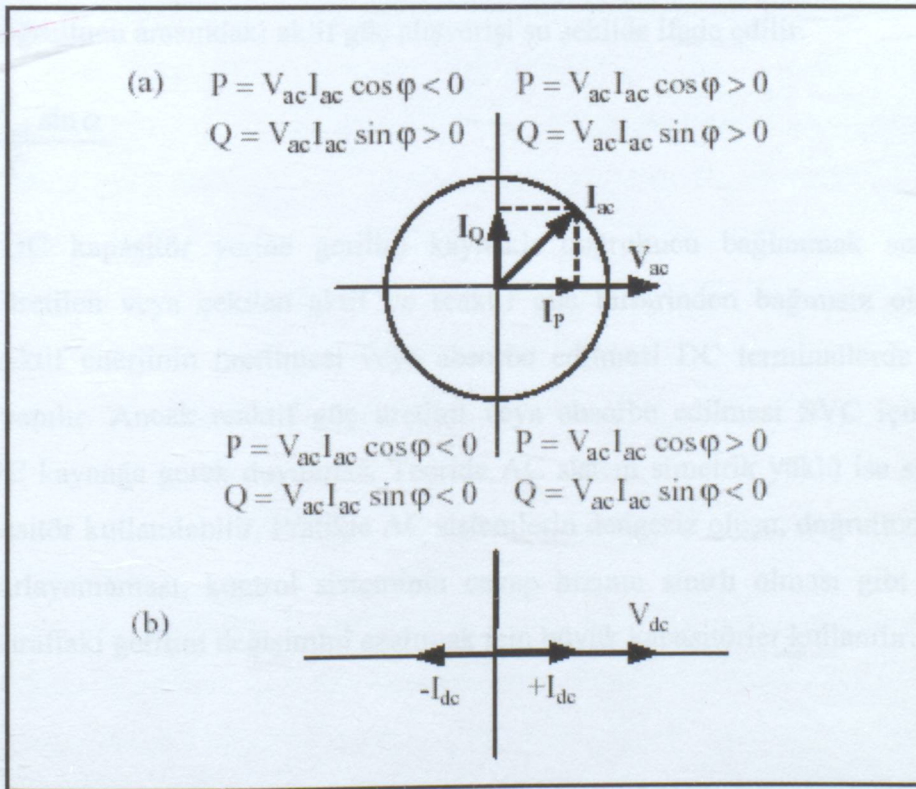
Faz kontrolün ayarlanmasıyla güç kaynağından elde edilen I_H akımı sıfır değerine ayarlanabilir. Bütün bunlar, A,B,C konverter gerilimlerinin faz açıların ayarlanmasını gerektirmektedir. Güç kaynağı E_H , gerekli olan dc gerilimi muhafaza etmek için sadece C kondansatöründen ayrılarak tümüyle dağıtılmıştır. Kondansatöre göre gerilim küçük faz açılarının sadece ilerletilmesi ve geciktirilmesiyle artırılabilmiştir veya azaltılabilmiştir.

Bu yolla kondansatör, dc bir gerilim seviyesi E_H 'a yüklenmiştir. Böylece A,B,C terminallerine göre ac gerilimin sonucu, gereken Var dengelemesini üretmek için gerekli olan değeri sağlar.

Şekil 6.6a da STATCOM'a ait AC fazör diyagramı verilmiştir. Fazör diyagramında AC akım I_{ac} nin fazör bileşenleri olan I_q ve I_p görülmektedir. Şekil 6.6b de ise DC akım (I_{dc}) ve DC

gerilim (V_{dc}) fazör diyagramı verilmiştir. STATCOM devresindeki kayıplar ihmal edilerek AC sistem ile olan aktif güç alışverişi “0” kabul edilirse, alternatif akım bileşeni I_p ve doğru akım I_{dc} sıfır olacaktır. Bu durumda I_{ac} nin tek bileşeni I_q olduğundan $I_{ac} = I_q$ dır. Şekil 6.6a da aktif güç (P) ve reaktif güç (Q) nun pozitif değer olması sistemden STATCOM’ a güç akışı olduğu; negatif değer olması ise STATOM’ dan sisteme güç akışı olduğunu gösterir.

Doğrultucunun 3 fazlı çıkış gerilimi V_{out} ’ un genliği değiştirilerek STATCOM’ un reaktif güç üretmesi veya çekmesi sağlanabilmektedir. Eğer doğrultucu çıkış gerilimi V_{out} ’ un genliği AC sistem gerilimi V_{ac} ’ nin genliğinin üzerinde bir değere ulaşırsa transformatör reaktansı üzerinden sisteme I_{ac} akımı akacaktır. Bu durumda doğrultucu kayıplarının sıfır olduğu varsayılarak AC sistemin, V_{ac} ile 90° lik açiya sahip kapasitif bir akım çektiği söylenebilir. Doğrultucu çıkış geriliminin genliği AC sistem geriliminin genliğinin altına düşerse AC sistemden doğrultucuya doğru bir AC akım oluşacaktır. Yani doğrultucu reaktif güç çekiyor demektir. AC sistem ve doğrultucu gerilimlerinin genliklerinin eşit olduğu varsayılırsa; bu durumda ne AC sistemden doğrultucuya nede doğrultucudan AC sisteme doğru bir akım oluşmayacaktır. Bu da reaktif güç üretimi veya absorbe edilmesinin söz konusu olmadığı anlamına gelir.



Şekil 6.6 STATCOM fazör diyagramları; (a) AC bölge, (b) DC bölge

Doğrultucudan AC sisteme doğru bir akım olduğu düşünülürse, bu akım;

$$I_{ac} = \frac{V_{out} - V_{ac}}{X} \quad (6.2)$$

eşitliğinden bulunabilir. Burada V_{out} doğrultucu çıkış gerilimi, V_{ac} AC sistem gerilimini, x ise kublaj transformatörünün kaçak reaktansını ifade etmektedir. Üretilen veya absorbe edilen reaktif güç ise ;

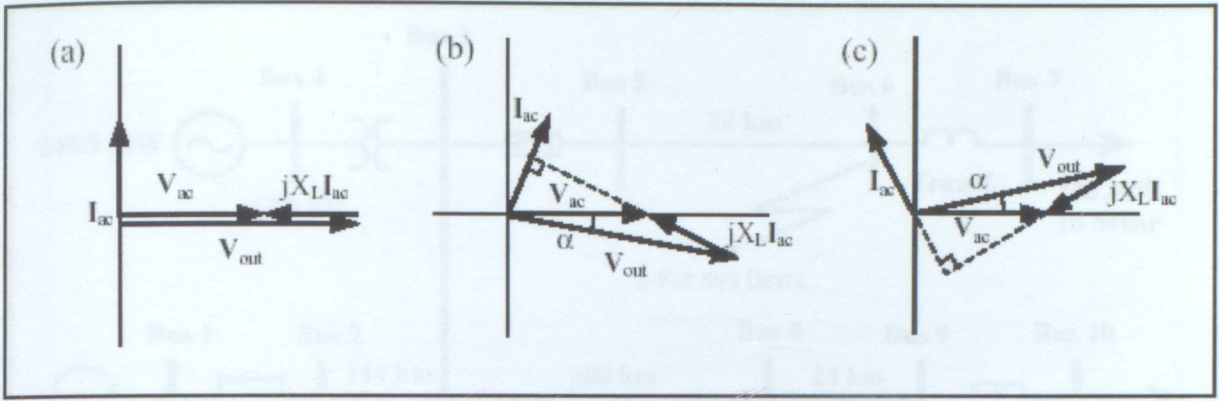
$$Q = \frac{V_{out}^2 - V_{out} V_{ac} \cos \alpha}{X} \quad (6.3)$$

ile ifade edilir. Burada α , AC sistem gerilimi (V_{ac}) ile doğrultucu çıkış gerilimi (V_{out}) arasındaki açıdır.

Şekil 6.7a dan görüldüğü gibi $\alpha=0^\circ$ durumunda AC sistem ve doğrultucu arasında aktif güç akışı yoktur. Bu durumda V_{ac} ye bağlı olarak, doğrultucu çıkış gerilimi V_{out} un faz açısı değiştirilerek AC sistem ve doğrultucu arasındaki aktif güç akışı kontrol edilebilir. Doğrultucu, AC sistemin gereksinim duyduğu aktif gücü de kapasitörlerinden sağlar. AC sistem ve doğrultucu arasındaki aktif güç alışverişi şu şekilde ifade edilir.

$$P = \frac{V_{ac} - V_{out} \sin \alpha}{X} \quad (6.4)$$

VSC' de DC kapasitör yerine gerilim kaynaklı doğrultucu bağlanmak suretiyle VSC tarafından üretilen veya çekilen aktif ve reaktif güç birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilir. Aktif enerjinin üretilmesi veya absorbe edilmesi DC terminallerde DC kaynak tarafından yapılır. Ancak reaktif güç üretimi veya absorbe edilmesi SVC içinde olur, bu durumda DC kaynağa gerek duyulmaz. Teoride AC sistem simetrik yüklü ise sonsuz küçük bir DC kapasitör kullanılabilir. Pratikte AC sistemlerin dengesiz oluşu, doğrultucu valflerinin hızlı anahtarlayamaması, kontrol sisteminin cevap hızının sınırlı olması gibi sonuçlardan dolayı DC taraftaki gerilim değişimini azaltmak için büyük kapasitörler kullanılır.



Şekil 6.7 STATCOM fazör diyagramı (a)kalıcı hal (b) kapasitör şarjı (c) kapasitör deşarjı

AC sistemden konvertöre verilen güç, anahtarlama kayıpları ve kapasitör gücünün toplamına eşit olmalıdır.

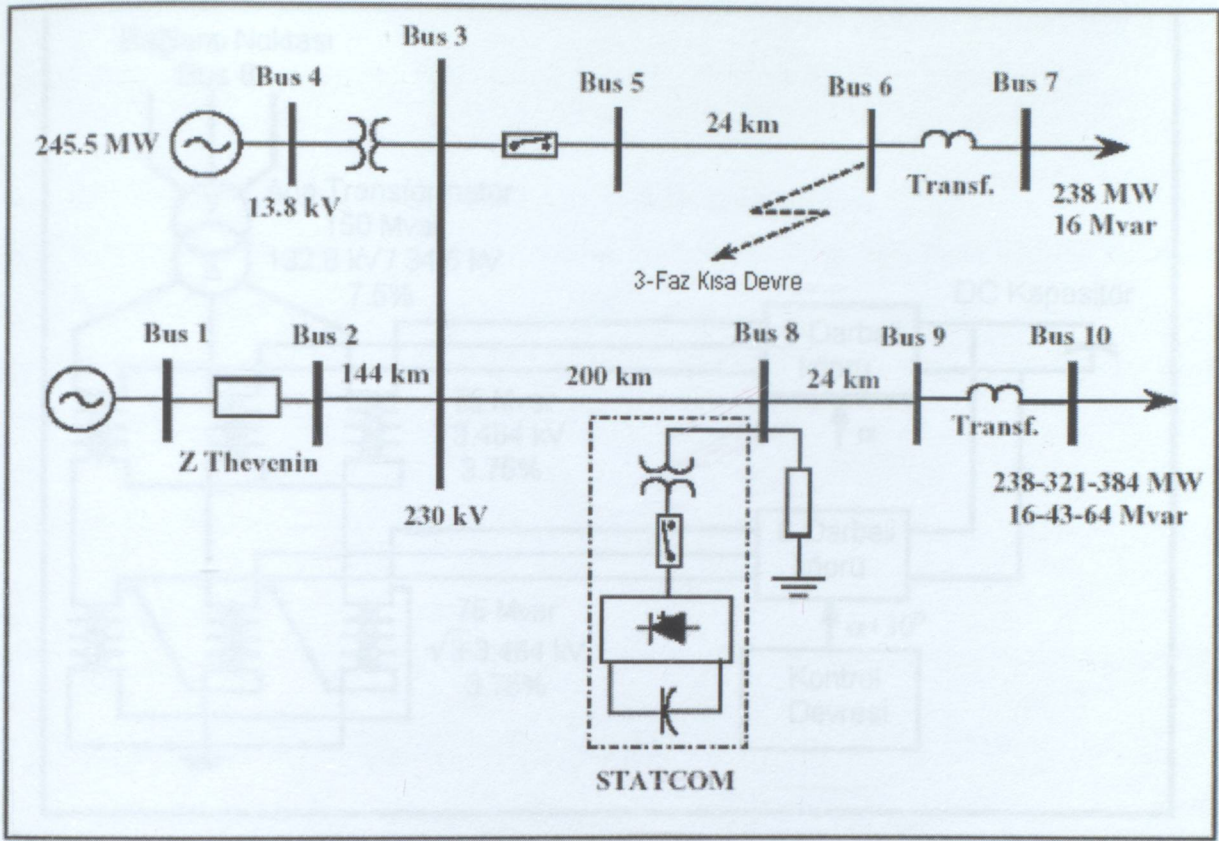
$$P_{ac} = P_{kayıp} + P_{dc} \quad (6.5)$$

6.1.1 STATCOM Kontrol Sistemi

PWM tabanlı kontrol tekniğinde kontrol; konvertör çıkış akımının aktif ve reaktif bileşenlerinin kontrolünden bağımsızdır. Ancak günümüzde kullanılan yarıiletken anahtarlama elemanları düşük frekans anahtarlmalıdır. Bu teknik yüksek gerilim uygulamalarında henüz kullanılmamıştır. Konvertör çıkışı, faz kontrol tekniği sebebiyle filtre edilmeye gerek duyulmamaktadır. Ayrıca birden çok konvertör yüksek darbeleri modda birlikte anahtarlama için gerekli bağlantı yapısını desteklemektedir. 1995'te Tennessee Valley Authority için yapılan STATCOM' da 48 darbeleri dönüştürücü kullanılmıştır(Schauder, 1997). AC ve DC taraflar arasındaki gerçek güç akışı, buna bağlı olarak da DC gerilimin (konvertör çıkış gerilimi) faz değişiminin (α) kontrolü ile VSC nin reaktif akımı kontrol edilebilmektedir.

6.1.2 Test Sistemi

STATCOM un faz kontrolü ve PWM kontrolünü daha iyi anlayabilmek için referans (Uzunovic, 2001) de verilmiş olan test düzeneği bu tezde yorumlanmıştır. 230 kv ta çalışan 10 terminalli sistem Şekil 6.8 de gösterilmiştir.

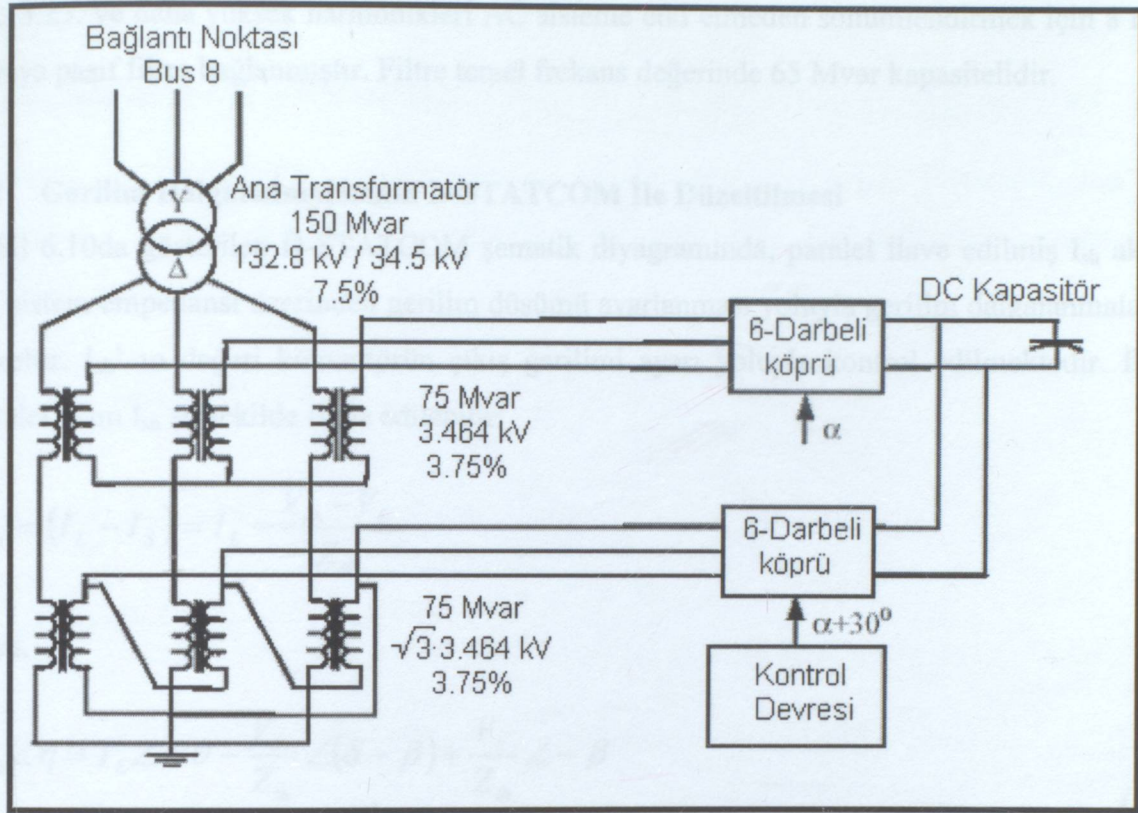


Şekil 6.8 10 Terminalli test sistemi (Uzunović, 2001)

Sistem 245.5 MW – 13.8 KV otomatik gerilim kontrollü generatör , Δ -Y bağlı yükseltici trafo (step-up transformatör), sonsuz şebeke ve ona karşılık gelen Thevenin empedansı ile modellenmiş ideal gerilim kaynağı ve Z-Matris ten oluşur. Test sisteminde iletim hatları çok farklı uzunluklarda seçilmiştir. Uzun mesafeli hatlar bölünmüş parametrelerle modellenmiştir. Kısa uzunluktaki iletim hatları ise 3 fazlı eşdeğer π devresi ile modellenmiştir. Sistemde empedans yükü olarak 2 adet indirici trafo (step-down transformatör) mevcut olup kaçak reaktansları kullanılarak basit bir şekilde modellenmiştir.

6.1.3 İşletim Sistemi

Şekil 6.8 deki 8 nolu bara gerilimini regüle etmek için kurulan STATCOM, AC sisteme uygun bir transformatör üzerinden bağlanmış 3-fazlı, 12-darbeli, gerilim kaynaklı konvertör olarak modellenmiş bir sistemdir.



Şekil 6.9 STATCOM'a seri bağlı 12 darbeleri devre.

STATCOM un kontrolü yarı-iletken elemanların anahtarlama açılarında yapılan değişiklik ile sağlanmaktadır. Bu sebeple STATCOM çıkış geriliminin temel bileşeni AC sistem geriliminden birkaç derece ileri veya geri fazda olabilmektedir. DC kapasitör geriliminin, dolayısıyla STATCOM çıkış geriliminin değişimi konvertörden sisteme veya sistemden konvertöre geçici bir güç akışı oluşturmaktadır. 12-darbeleri STATCOM modeli Şekil 6.9 da gösterilmiştir. Devre 150Mvar, 230 kv / 6 kv ara transformator üzerinden AC sisteme bağlı olan 2 adet 6 darbeleri konvertör içermektedir.

Konvertörlerin DC tarafları paralel bağlanmak suretiyle aynı DC kapasitörü paylaşmaktadırlar. Konvertörler DC tarafta birbirine seri olarak da bağlanabilirler ancak; bu durumda DC gerilim 2V olacak ve konvertörün AC çıkışında da 2V görülecektir. Bu tip bir bağlantı kapasitörlerde eşit gerilim değeri olması gerektiğinden dolayı tercih edilmemektedir. Transformatorün birbirine seri bağlı olan primer sargılarına seri olarak konvertör bağlanmak suretiyle karakteristik harmonikler elimine edilmektedir. Konvertörlerin AC tarafta paralel bağlanması da mümkündür. Ancak bu, özel sargılı transformatorler, dolayısıyla yüksek maliyetli bir STATCOM gerektirir.

11.13.23. ve daha yüksek harmonikleri AC sisteme etki etmeden sönümlendirmek için 8 nolu baraya pasif filtre bağlanmıştır. Filtre temel frekans değerinde 65 Mvar kapasitelidir.

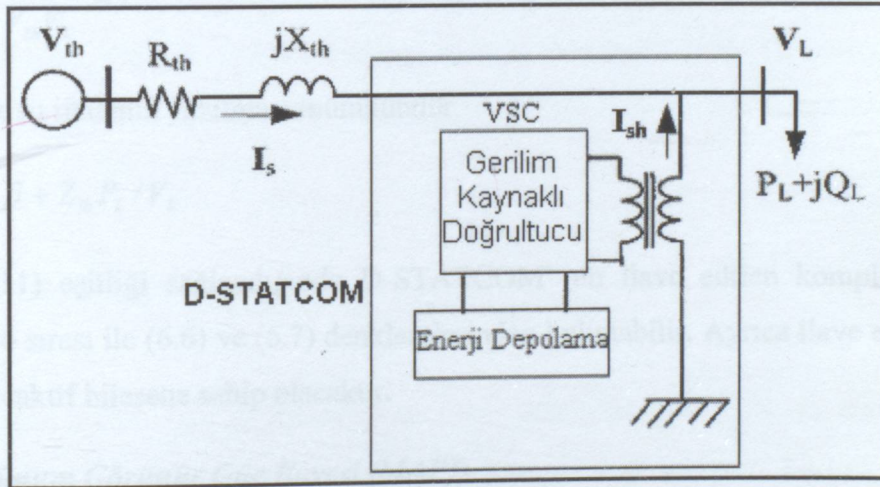
6.2 Gerilim Dalgalanmalarının D-STATCOM İle Düzeltilmesi

Şekil 6.10da gösterilen D-STATCOM şematik diyagramında, paralel ilave edilmiş I_{sh} akımı Z_{th} sistem empedansı üzerinden gerilim düşümü ayarlanması yoluyla gerilim dalgalanmalarını düzeltir. I_{sh} ' in değeri konvertörün çıkış gerilimi ayarı yoluyla kontrol edilmektedir. İlave paralel akım I_{sh} şu şekilde ifade edilebilir;

$$I_{sh} = (I_L - I_S) = I_L - \frac{V_{th} - V_L}{Z_{th}}$$

veya,

$$I_{sh} \angle \eta = I_L \angle -\theta - \frac{V_{th}}{Z_{th}} \angle (\delta - \beta) + \frac{V_L}{Z_{th}} \angle -\beta \quad (6.6)$$



Şekil 6.10 D-STATCOM' un şematik diyagramı

D-STATCOM ' un görünür güç ilavesi şu şekilde ifade edilir.

$$S_{sh} = V_L I_{sh}^* \quad (6.7)$$

ilave paralel akımı I_{sh} V_L ile 90° faz açısında tutulduğunda istenen gerilim düzeltmesi, sisteme herhangi bir aktif güç ilave etmeksizin yapılabilir. Diğer taraftan I_{sh} değeri minimize edildiğinde aynı gerilim düzeltmesi sisteme minimum görünür güç ilavesi ile sağlanmış olur. Aşağıda gerilim dalgalanmasının D-STATCOM ile düzeltmesinin iki ayrı yönteminden

bahsedilmiştir.

A. Sıfır Aktif Güç İlavesi (ZAPI)

Bu durumda D-STATCOM sisteme herhangi bir aktif güç ilave etmez. Böylece toplam yük aktif gücü (P_L) sistemin thevenin eşdeğer devresi ile elde edilir. Thevenin empedansı boyunca aktif güç akışı şu şekilde yazılabilir.

$$P_L = \frac{V_{th} V_L}{Z_{th}} \cos(\beta - \theta) - \frac{V_L^2}{Z_{th}} \cos \beta \quad (6.8)$$

δ açısı (6.8) denkleminde elde edilir ise;

$$\delta = \beta - \cos^{-1} \left[\frac{V_L}{V_{th}} \cos \beta + \frac{Z_{th} P_L}{V_{th} V_L} \right] \quad (6.9)$$

δ 'nin uygun değeri için (6.10) denkleminin sağlanması gerekmektedir.

$$\frac{V_L}{V_{th}} \cos \beta + \frac{Z_{th} P_L}{V_{th} V_L} \leq 1 \quad (6.10)$$

Genel olarak şu ifadenin yazılması mümkündür.

$$V_{th} \geq V_L \cos \beta + Z_{th} P_L / V_L \quad (6.11)$$

Böylece (6.11) eşitliği sağlandığında D-STATCOM' un ilave edilen kompleks akımı ve görünür gücü sırası ile (6.6) ve (6.7) denklemlerinden bulunabilir. Ayrıca ilave edilen görünür güç sadece reaktif bileşene sahip olacaktır.

B. Minimum Görünür Güç İlavesi (MAPI)

Daha önceden bahsedildiği gibi ilave edilen akımın büyüklüğü minimize edildiğinde D-STATCOM sisteme minimum görünür güç ilavesi ile gerilim dalgalanmasını düzeltebilir. Böylece minimum görünür güç ilavesi şu şekilde ifade edilebilir

$$\frac{\partial I_{sh}}{\partial \delta} = 0 \quad (6.12)$$

I_{sh} 'in analitik ifadesi (6.6) denkleminde elde edilebilir ve (6.12) denkleminin çözümüyle şu şekli alır;

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{Z_{th} I_L \sin(\beta - \theta)}{V_L + Z_{th} I_L \cos(\beta - \theta)} \right] \quad (6.13)$$

Böylece verilen yük için δ 'nin değeri (6.13) denkleminde kolayca bulunabilir. δ değerinin bilinmesi ile D-STATCOM'un ilave kompleks akımı ve görünür gücü (6.6) (6.7) denklemlerinden bulunabilir.

6.2.1 Harmoniklerin Elimine Edilmesi

Şekil 6.4'de gösterildiği gibi basit bir üç fazlı konverter tarafından üretilen kare dalgalar, müsamaha edilemeyecek bir durum olarak iletim hatlarında büyük akım harmonikleri üretebilirler. Bu sebeple bir konverter yerine bir çok konverter kullanılır.

Her bir konverter bir kare dalga çıkış gerilimi üretir, fakat ilgili gerilimler birbirinden belli açılar tarafından ayrılır. Bu faz kaymalı gerilimler birbirinden izole edilir ve böylece alçak gerilim transformatör bobinlerine münferit olarak uygulanabilmiştir. 60 Hz'lik ana devre elemanlarının üzerine eklenmesi sırasında, yüksek gerilim tarafındaki bobinler biri birine harmoniklerin büyük bölümünü (5. , 7. vs) önleyecek şekilde seri olarak bağlanmıştır. Sonuç, ana ve yüksek frekans harmoniklerini içeren kompleks bir sinüzoidal gerilimdir. Transformatörlerin kaçak reaktansları tarafından oluşan yüksek empedans karşılıklı olarak düşük harmonik akımları oluşturur.

6.3 STATCOM Uygulamaları

6.3.1 Giriş

Aktif filtreleme, reaktif güç depolaması ve fliker düzeltme gibi yeteneği olan STATCOM cihazların kullanımı, tüketiciler ve dağıtıcılar için oldukça caziptir. Çünkü direkt olarak şebekeye bağlanır, aynı güç elektroniği konfigürasyonu kullanılabilir, böylece farklı servisleri teçhiz etmek için sadece kontrol binasında değişiklik yapılır.

STATCOM, güç faktörü düzeltimi ve gerçek-zaman gerilim desteğiyle iletim transferi limitlerini %50 'den fazla artırır, böylece uzak enerji kullanıcıları için termik aşırı yük durumları azaltılmış olur ve güç kalitesi düzeltimi yapılır.

Özgün bir uygulamada kullanılacak kompanzasyon sistemini bulmak için teçhizatlar arasında yapılan bir karşılaştırmada birkaç önemli parametre düşünülmüştür:

- Nominal güç değerleri (kVA)

- Nominal reaktif güç değerleri (kVAr)
- Nominal gerilim (orta veya alçak gerilim)
- Frekans (dalgalı akım değiştirici)
- Nominal inverter akım
- Max. harmonikler
- Aynı anda dengeleme yapabilen harmoniklerin max. sayısı
- Yük akımı değişiklikleri için cevap süreleri
- Verim (%)
- Filtre verimi (%) = $(THD1) / (THD2) \times 100$

Burada;

THD1 = Fitrenin toplam harmonik distorsiyonu

THD2 = Yükün toplam harmonik distorsiyonu

Bu karşılaştırma, 2 alçak gerilim ticari ürünü için aşağıda gösterilmiştir.

- Asea Brown Boveri (ABB) tarafından yapılan PQF (power quality filter)
- SIEMENS AG tarafından yapılan SIPCON P veya D-STATCOM

6.3.2 ABB, Güç Kalite Filtresi (PQF)

ABB'nin 4 tane geçerli AIPF modeli bulunmaktadır. PQFL, PQFA, PQFB ve PQFC.

Bütün bu modeller aşağıdaki özellikleri kapsar:

- PQF modelleri, PMM teknolojisiyle kontrol edilen IGBT inverter köprüsüyle yapılmıştır.
- Filtreleme verimi %97'dir.
- Aynı anda 20 harmonik devre elemanı kompanze edebilir.
- Reaktif güç dengelemesi mümkündür, fakat temel öncelik 50 Hz'lik şebekelerde değildir, öncelik olan harmonik filtrelemesidir.

- PQF'nin nötr bağlantısı yoktur ve sıfır harmonik terimi filtrelemez.
- Yük değişikliklerinin cevap süreleri 40 ms'den azdır.

600V'un üzerindeki gerilimler için kullanılan PQF modeli, şebekeye bağlanmış gerilim kapasitesini arttırmak için kondansatör bağlanan PQFA'dan ibarettir. PQFB modeli, reaktif gücü kompanze edemez, bunun yanında kontrol edilemeyen sabit bir reaktif güç devre elemanı üretir.

PQFL, nominal gücü 340 kVA'ya ulaşan 4 güç modülü içerir. PQFA modeli 50 Hz'lik şebekede nominal gücü 1,2 MVA'ya ulaşan 8 güç modülü içerir.

6.3.3 Siemens Power Combitioner Parallel (Sipcon P/dSTATCOM)

Siemens tarafından geliştirilen APF, reaktif gücü, yük akımı dengesini, harmonik filtrelemesini ve fliker kompanzasyonunu kompanze eder.

SIPCON P modelleri, bağlama transformatörleri vasıtasıyla Orta Gerilim ve Yüksek Gerilim Şebekelere bağlanmıştır. Tek bir SIPCON P ile mevcut max. nominal güç değerleri 925 kVA'dır, birkaç SIPCON P'yi paralel bağlayarak 4 MVA elde edilmiştir.

SIPCON P'nin temel olarak iki kontrol modu vardır.

- Standart Mod: SIPCON P, harmonik filtrelemesi ve yük dengesi için tüm gücü veya yarı gücü tedarik eder, eğer bu uygulamalar tüm mevcut güçler için gerekli değilse reaktif güç kompanzasyonu yapılabilir
- Flicker Mod: Bütün teçhizat güçlerinin toplamı, Flicker kompozasyonu için tedarik edilmiştir. Bu kompozasyon 2-10 ms'lik sürede gerçekleştirilir.

Diğer karakteristikler aşağıda listelenmiştir;

- PWM teknolojisiyle kontrol edilen SIPCON P modelleri, IGBT inverter köprüsüyle yapılır.
- Aynı anda 4 harmonik akımı devre elemanı aktif filtrelendir.
- Kompanzasyon için en yüksek harmonik devre elemanı, 13. devre elemanıdır. (650Hz, 50Hz'lik şebekelerde)
- Harmoniklerin akım değişikliklerinin cevap süreleri 20ms'den azdır.

6.3.4 ALSTOM T&D (150 MVar STATCOM)

1997 de 400kV East Claydon santralinde mevcut klasik kompanzasyon sisteminin yetersiz kalması üzerine en az mevcut TCR/TSC sisteminin yerini alabilecek gelişmiş bir kompanzasyon ihtiyacı doğmuştur. Bunun üzerine ALSTOM T&D Power Electronic Systems Limited tarafından 0 + 225MVar GTO teknolojisi kullanılmış bir SVC tesis edildi.

Kullanılan SVC 0 ile +225MVar aralığında çalışmakta idi, çünkü sistemde indüktif güç ihtiyacı yoktu, sadece kapasitif besleme gerekli idi. 4000 MVA gücündeki sistemin gerilim değişimine 100ms duyarlılıkla müdahale edilmesi gerekmekte idi.

Şönt kapasitörler, TCS ler ve filtre blokları gerilimin azalması ile orantılı olarak akımı artan sabit empedanslı cihazlardır. Buna karşın STATCOM sabit akım kaynağı gibi davranarak oldukça düşük gerilimlerde bile gerekli akımı sağlayabilen ve sabit kapasitör bloklarına göre çok daha fazla MVar üretebilen bir sistemdir.

GTO SVC' in Temel Konfigürasyonu

Sistemin sadece kapasitif beslemeye ihtiyacı olduğundan dolayı 225 MVar'ın tamamının STATCOM ile üretilmesi halinde -225MVar lık kayıp oluşacağından dolayı; sisteme $\pm 75\text{MVar}$ (150MVar) STATCOM; 90MVar lık ihtiyaçtan sonra devreye girecek +127MVar TSC (thyristor switch capacitor) ve +23MVar harmonik filtre tesis edilmiştir.

Konvertör

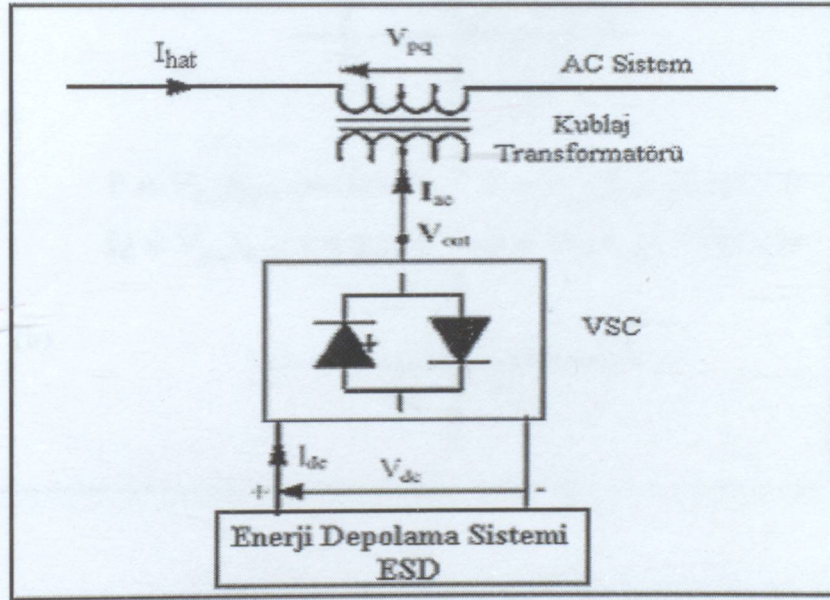
Konverterde kullanılan GTO lar $4500V_{\text{peak}}$ ve $4000A_{\text{peak}}$ kesme kapasiteli cihazlardır. Kesme kapasitesi snubber devresinin özelliklerine bağlıdır. Akım değeri arttıkça kayıp da artmaktadır. Kayıpların azaltılması için bir periyotta bir kez iletme geçme, bir kez kesime geçme işlemi uygulanabilir. Kalıcı hal maksimum akımı 1750A rms olan sistemde 2500A GTO seçilebilir. Her bir tek fazlı GTO nun aşırı akımdan korunması gerekmektedir. Bunun için GTO ların her iki tarafına 4.8mH empedansa sahip iki tampon reaktör yerleştirilmiştir. GTO konverterde kullanılan kapasitörler kaynak gerilimini üreten 8000OF DC kondansatörlerdir. Kapasitörler 2kV nominal maksimum gerilim değerindedir. Ancak 2,5kV luk sürekli ve kısa süreli yüksek gerilim değerlerine, anormal ve arıza şartlarına dayanabilecek şekilde IEC1071-1 standardına göre üretilmiş, kendinden soğutmalı, segmentli, metal polipropilen film dielektrik yapıya sahip kondansatörlerdir.

7. STATİK SENKRON SERİ KOMPANZATÖR (SSSC)

SSSC çok sayıda GTO tristör veya intrinsic turn-off özellikte farklı yarı-iletken anahtarlama elemanları, katı-hal VSC, DC kapasitör, transformatör ve bir kontrolörden oluşmaktadır. Çok sayıda VCS bir transformatör üzerinden bağlanabilmektedir. Burada valf sayısı ve transformatör konfigürasyonu, elde edilmesi istenen AC dalga şekli kalitesine bağlıdır.

Transformatörün primer sargıları hatta seri bağlıdır. SSSC hattın reaktif güç çekmek veya üretmek için kullanılmaktadır, bu sebeple iletim hattı güç akış kontrolörü olarak adlandırılabilir.

Hatta verilen gerilim kapasitif veya endüktif reaktans oluşturmakta, bu ise hattın toplam reaktansını artırıp azaltarak hattın iletilen gücün artmasını veya azalmasını sağlamaktadır.



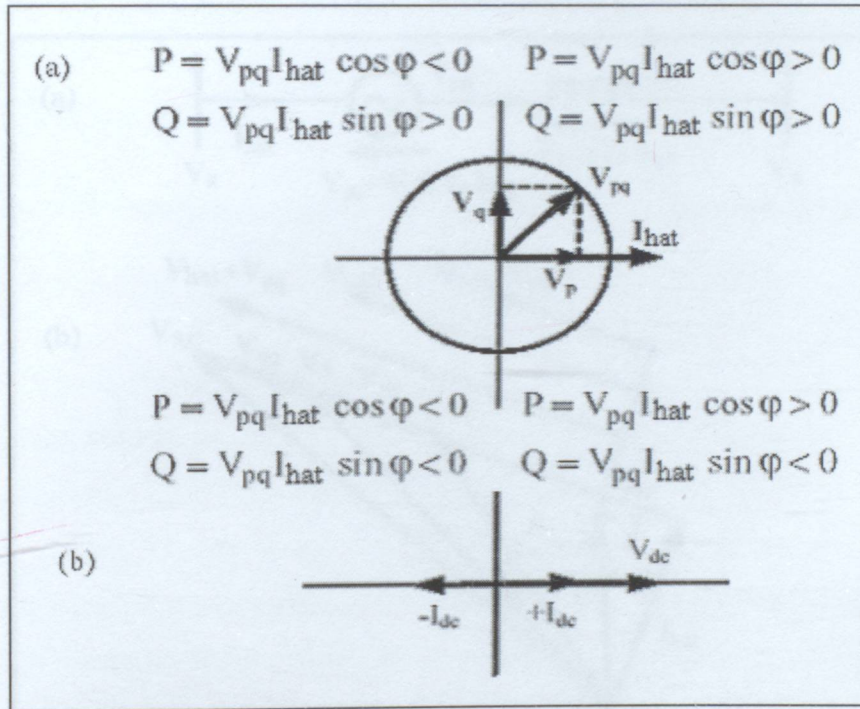
Şekil 7.1 SSSC yapısı

SSSC, istenen temel frekans değerinde değişken ve kontrol edilebilir değer ve faz açısına sahip 3-fazlı gerilim üretebilen ideal bir senkron gerilim kaynağı olarak tanımlanabilir. SSSC sisteme seri olarak enjeksiyon gerilimi ilave eder. Bu enjeksiyon gerilimi hat akımı ile 90° açığa sahiptir. Ayrıca bu gerilimin küçük bir parçası inverter ve iletim hattı kayıplarını karşılar.

Bir güç sisteminden reaktif güç çekebilir veya üretebilir. Bununla birlikte DC kapasitör yerine ESD kullanılması halinde reaktif güçten bağımsız olarak aktif güç üretimi veya tüketimi yapabilmektedir. Bundan dolayı da senkron kompanzatör olarak anılır.

Şekil 7.1 de görülen SSSC modelinde reaktif gücün haricinde aktif güç değişimini de sağlamak için DC kapasitör yerine ESD kullanılmıştır. Hatta verilen V_{pq} gerilimi ile hat akımı I_{hat} arasındaki faz farkı aktif ve reaktif güç değişimini tanımlamaktadır.

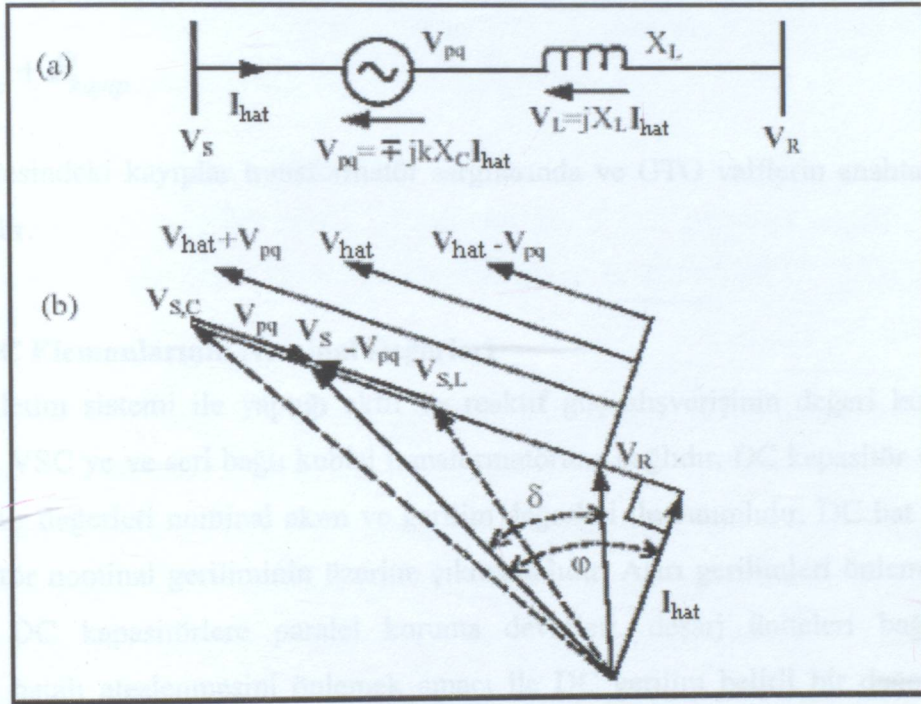
Şekil 7.2 SSSC nin 4 çeyrek periyottaki durumunu göstermektedir. DC kapasitör yerine ESD bağlıdır. Fazör diyagramında hat akımı I_{hat} referans seçilmiştir. Teorik olarak fazör diyagramının dört bölgesinde de çalışmak mümkün olmakla birlikte pratikte SSSC geriliminde bazı sınırlandırmalar vardır.



Şekil 7.2 SSSC fazör diyagramı

Hatta verilen gerilim V_{pq} ile ifade edilir, $V_{pq} = -jkX_c I_{hat}$. Burada kX_c değişken kapasitansa sahip seri kapasitör, k değişkendir. Şekil 7.3 te gösterildiği gibi iletim hattı toplam reaktansının düşüşü ile iletkin hat akımı dolayısı ile güç artacaktır. Ayrıca SSSC gerilimini 180° çevirmek de mümkündür. $-V_{pq} = jkX_c I_{hat}$, iletim hattı reaktansının artışı ile hat akımı ve iletilen güçte bir düşüş görülür. V_{pq} eşitliğinden SSSC nin hatta seri verdiği gerilimin hat akımıyla doğru orantılı olduğu düşünülebilir, ancak gerçekte böyle bir ilişki yoktur. Hatta verilen gerilim değeri SSSC kontrolü ile ayarlanır, şebeke empedansı ve dolayısıyla hat akımı değişimlerinden bağımsızdır. Şekil 7.3 de SSSC kayıpları sıfır kabul edilmiştir. SSSC çalışma bölgesini kapasitiften endüktife çevirerek güç akışını artırıp azaltabilmektedir. Endüktif modda SSSC nin sisteme seri olarak verdiği gerilim(enjeksiyon gerilimi) hat reaktansı

üzerindeki gerilim düşümü ile aynı fazdadır. Seri kompanzasyonda hat reaktansının yükseltilmesi ile aynı etkiyi yapar. Eğer SSSC nin sisteme verdiği seri gerilimin değeri (enjeksiyon gerilimi) kompanze edilmemiş hattaki gerilim düşümünden fazla ise ($V_{pq} \geq V_{hat}$), güç akışı yön değiştirecektir. Bu durum SSSC nin çalışma aralığına $V_{pq} \leq V_{hat}$ olacak şekilde bir sınır getirmektedir. SSSC kontrolörün çalışma değerlerinin normalin üzerinde olması durumunda hat-sonu geriliminin (receiving end voltage) nominal sınırları olan 0,95 p.u. – 1,05 p.u. aralığının dışına çıkarak gerilim artışı veya azalması görülebilir. Ancak bu durum sisteme bağlı diğer cihazlar için olumsuz etki yaratabilir.



Şekil 7.3 SSSC vektör diyagramı ve tek hat şeması

SSSC' in enjeksiyon gerilimi ve çıkış gerilimi karıştırıldığında, aralarında şöyle bir ilişki vardır.

$$V_{pq} = V_{SSSC} \pm X_{tr} \cdot I_{hat} \quad (7.1)$$

V_{SSSC} , SSSC nin çıkış gerilimini; X_{tr} transformatörün reaktansını; V_{pq} ise enjeksiyon gerilimini ifade etmektedir.

SSSC' in reaktif bölgede çalışması durumunda seri transformatör reaktansı üzerindeki gerilim negatif (-) değer; kapasitif bölgede çalışması durumunda ise pozitif (+) değer alır. Enjeksiyon gerilimi ve SSSC çıkış gerilimi arası fark çok küçük olabilir. Ancak büyük yüklerde bu fark

oldukça önem kazanmaktadır.

SSSC ve iletim hattı arasında alınan veya verilen güç şu şekilde hesaplanır;

$$P_{pq} = V_{pq} \cdot I_{hat} \cdot \cos \varphi \quad (7.2)$$

$$Q_{pq} = V_{pq} \cdot I_{hat} \cdot \sin \varphi \quad (7.3)$$

SSSC enjeksiyon gerilimi ile iletim hattı akımı arasındaki açı φ ile ifade edilmektedir. SSSC in çektiği aktif güç iç kayıplar ve DC kapasitörün sarj olması için gereken güçtür.

$$P_{pq} = P_{dc} + P_{kayip} \quad (7.4)$$

SSSC devresindeki kayıplar transformatör sargılarında ve GTO valflerin anahtarlanmasında oluşmaktadır.

7.1 SSSC Elemanlarının Nominal Değerleri

SSSC in iletim sistemi ile yaptığı aktif ve reaktif güç alışverişinin değeri kullanılan DC kapasitöre, VSC ye ve seri bağlı kublaj transformatörüne bağlıdır. DC kapasitör veya ESD in çalışma sınır değerleri nominal akım ve gerilim değerleri ile tanımlıdır. DC hat gerilimi V_{dc} DC kapasitör nominal geriliminin üzerine çıkmamalıdır. Aşırı gerilimleri önlemek amacıyla genellikle DC kapasitörlere paralel koruma devreleri, deşarj üniteleri bağlanır. GTO tristörlerin hatalı ateşlenmesini önlemek amacı ile DC gerilim belirli bir değerin üzerinde tutulur.

Kapasitör seçimi oldukça önemlidir. Büyük bir DC kapasitörün şarj ve deşarj süreleri oldukça uzun olabilir ancak AC taraftaki bir transient durumunda DC gerilimin ani ve aşırı gerilimine küçük bir kapasitör dayanamayacaktır. DC gerilimin değişim aralığındaki azalma yarıiletken elemanın boyutlarında bir değişime; tüm bunlar ise toplam maliyette bir düşüşe sebep olacaktır.

Konverter GTO tristör valfleri kendi akım ve gerilim değerleri ile karakterize edilmiştir.

Transformatörün çalışma aralığı ise maksimum enjeksiyon gerilimi ve iletim hattı akımı ile tanımlıdır.

$$MVA = I_{hat,max} \cdot V_{SSSC,max} \quad (7.5)$$

8. DİNAMİK GERİLİM DÜZENLEYİCİ (DVR)

8.1 Giriş

DVR yapı, işlev ve kurulum olarak SSSC gibi seri bağlı senkron bir FACTS kontrolörüdür. Ancak bu tez araştırmasında referans gösterilen tüm kaynaklarda SSSC den ayrı olarak DVR adı altında tanımlandığından dolayı bu tezde DVR ayrı bir bölüm olarak ele alınmıştır.

Dinamik gerilim düzenleyici (DVR) gerilim dalgalanmasını dağıtım seviyesinde düzeltmek için kullanılır. DVR gerilim dalgalanmasını düzeltmek için ilave edilen transformatör üzerinden gerilim kaynağına seri şekilde bağlanarak AC gerilim üreten seri bir cihazdır. İlave edilen gerilim ve yük akımı DVR' in güç ilavesini belirler.

Önceleri SIEMENS şirketi DVR konusunda önde giden isimdi. 1999 Martından itibaren ABB, yarı iletken teknolojiyle IGCT tabanlı bir DVR testi yapmaya başladı. Günümüzde DVR sistemlerinin tasarım ve kurulumunda sözü geçen firmalar MEPI, SIEMENS ve ABB dir.

DVR, bağlama transformatörü vasıtasıyla kontrollü genlik ve frekansta 3 fazlı gerilimi alternatif akıma enjekte eder. Böylece, DVR, gerilim kalitesi limitlerin dışında iken, yükteki gerilim kalitesini düzeltir. Geniş gerilim sapmaları için, DVR, enerji depolama sisteminden yük için aktif gücün bir kısmı depo edebilir. DVR'ın temel uygulamaları şunlardır: gerilim saptması kompanzasyonu, gerilim yükselmesi, aşırı gerilim kompanzasyonu, harmonik gerilim kompanzasyonu.

Bir DVR seçimi için en önemli özellikler:

- Güç (kVA) ve gerilim (V) nominal değerleri
- Kompanzasyon için gerilim saptmasının ve yükselmesinin yüzdesi
- Anahtarlama frekansı
- Nominal ve max. akım
- Cevap verme süresi
- Sistem, enerji depolaması, kapasite (kj) ve deşarj zamanı (ms) için kullanılır.
- Verim ve fiyat

Bir DVR'ın maliyeti yaklaşık MVA başına 150-250 bin \$'dır.

8.2 Gerilim Dalgalanmasının DVR İle Düzeltilmesi

Tipik bir DVR' in şematik diyagramı Şekil 8.1' de gösterilmiştir. DVR' in sol tarafındaki devre sistemin eşdeğer thevenin devresini temsil eder. Sistem empedansı ($Z_{th}=R_{th}+jX_{th}$) yük hattının hata seviyesine bağlıdır. Sistem gerilimi V_{th} düştüğünde istenen yük gerilim büyüklüğü V_L aynen kalabilmesi için ilave transformatör üzerinden bir seri gerilim V_{DVR} ilave edilir . DVR' in seri ilave gerilimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V_{DVR} = V_L + Z_{th} I_L - V_{th} \quad (8.1)$$

Burada I_L yük akımı olup şu şekilde hesaplanır.

$$I_L = \left(\frac{P_L + jQ_L}{V_L} \right)^* \quad (8.2)$$

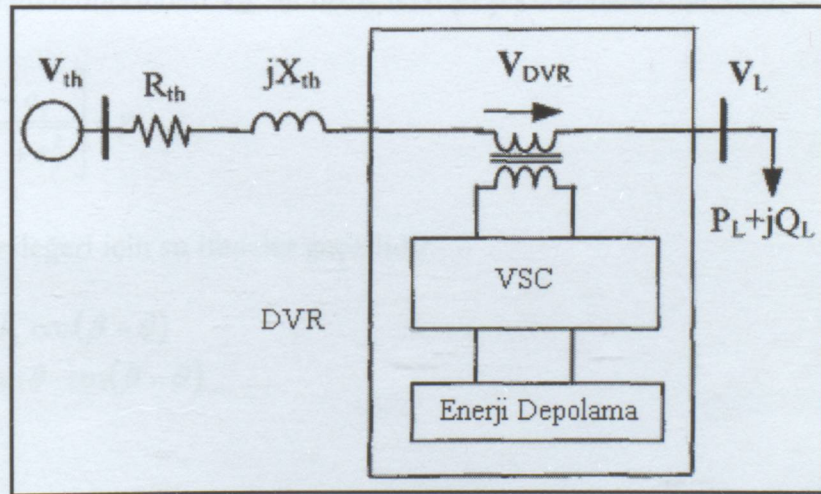
V_L referans olarak alınır (8.1) eşitliği şu şekilde ifade edilebilir.

$$V_{DVR} \angle \alpha = V_L \angle 0 + Z_{th} I_L \angle (\beta - \theta) - V_{th} \angle \delta \quad (8.3)$$

Burada α , β , δ sırasıyla V_{DVR} , Z_{th} ve V_{th} in açılarıdır. θ yükün güç faktörü açısıdır;

($\theta = \tan^{-1}(Q_L/P_L)$). DVR' in görünür güç ilavesi

$$S_{DVR} = V_{DVR} I_L^* \quad (8.4)$$



Şekil 8.1 DVR şematik diyagramı.

İlave edilen gerilim, I_L ile çeyrek evre farkı içinde tutulmuş olduğunda DVR tarafından aktif güç ilavesi yoktur. Sadece reaktif güç ilavesi için gereklidir ve DVR' in kendisi reaktif güç üretme yeteneğine sahiptir. Ancak aynı zamanda V_{DVR} sadece gerilim dalgalanmasının kesin

değerine kadar I_L ile çeyrek evre farkı içinde tutabilmiş olup çeyrek evre farkı ilişkisinin ötesinde gerilim dalgalanması düzeltilmesini koruyamamıştır. Böyle bir durum için sisteme aktif güç ilavesi şarttır. İlave edilen aktif güç mutlaka DVR' ın enerji depolama sisteminden sağlanmalıdır. Diğer taraftan DVR ilave geriliminin büyüklüğü minimize edildiğinde, sisteme minimum görünür güç ilavesi ile istenen gerilim düzeltilmesi sağlanır. İlave transformatörün boyutunun küçülmesinden dolayı gerilim düzeltilmesinin bu bakış açısı ile ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır. Aşağıda sıfır aktif güç ilavesi (ZAPI) ve minimum görünür güç ilavesi (MAPI) için DVR yoluyla gerilim düzeltilmesi anlatılmaktadır.

8.2.1 Sıfır Aktif Güç İlavesi (ZAPI)

I_L ile V_{DVR} arasındaki faz açısı farkı $\pi/2$ ' de tutulduğunda sisteme aktif güç ilave edilmesine gerek yoktur. Bu durumda V_{DVR} α açısı;

$$\alpha = \pi/2 - \theta \quad (8.5)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklem (8.3) ten α açısı şu şekilde ifade edilebilir;

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{Z_{th} I_L \sin(\beta - \theta) - V_{th} \sin \delta}{V_L + Z_{th} I_L \cos(\beta - \theta) - V_{th} \cos \delta} \right] \quad (8.6)$$

(8.5) ve (8.6) denklemlerinden V_{th} ' ın faz açısı δ şu şekilde ifade edilebilir;

$$\delta = \cos^{-1} \left[\frac{c_1 - c_2}{\sqrt{c_3^2 + c_4^2}} \right] - \gamma \quad (8.7)$$

δ nin uygun bir değeri için şu ifadeler geçerlidir.

$$\begin{aligned} c_1 &= V_L + Z_{th} \cdot I_L \cos(\beta - \theta) \\ c_2 &= Z_{th} \cdot I_L \cdot \tan \theta \cdot \cos(\beta - \theta) \\ c_3 &= V_{th} \\ c_4 &= V_{th} \tan \theta \\ \gamma &= \tan^{-1}(c_4 / c_3) \end{aligned}$$

ve şu durum sağlanmış olmalıdır.

$$\frac{c_1 - c_2}{\sqrt{c_3^2 + c_4^2}} \leq 1 \quad (8.8)$$

bazı matematiksel işlemlerden sonra (8.8) denklemi şu şekli alır;

$$V_{th} \geq (V_L \cdot \cos \theta + Z_{th} \cdot I_L \cdot \cos \beta) \quad (8.9)$$

(8.9) denkleminin sağ tarafı yük akımına, yük gerilimine ve sistemin empedansına bağlıdır. Sistemin veya thevenin eşdeğer geriliminin (V_{th}) büyüklüğü (8.9) denklemini sağladığında sisteme herhangi bir aktif güç ilave etmeksizin istenen gerilim düzeltmesi başarılmış olur. Bu durumda DVR' ın görünür gerilim ilavesi (8.7) denkleminde bulunan δ 'nin değeriyle (8.3) denkleminde elde edilebilir. Bir kere V_{DVR} ' ın değeri biliniyor ise DVR' ın görünür güç ilavesi (8.4) denkleminde bulunabilir ve sadece reaktif bileşene sahip olacaktır (Haque, 2001).

8.2.2 Minimum Görünür Güç İlavesi (MAPI)

Verilen yük akımı için DVR' ın görünür güç ilavesinin büyüklüğü gerilim ilavesinin büyüklüğüne bağlıdır. (8.3) denkleminde ilave edilen gerilimin büyüklüğü şu şekilde ifade edilebilir:

$$DVR^2 = V_L^2 + V_{th}^2 + Z_{th}^2 I_L^2 + 2V_L Z_{th} I_L \cos(\beta - \theta) - 2V_{th} Z_{th} I_L \cos(\beta - \theta - \delta) - 2V_L V_{th} \cos \delta \quad (8.10)$$

Burada ilave minimum gerilim büyüklüğü (veya ilave minimum görünür güç) için

$$\frac{\partial V_{DVR}^2}{\partial \delta} = 0 \quad (8.11)$$

eşitliğinin sağlanması gerekir.

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{Z_{th} I_L \sin(\beta - \theta)}{V_L + Z_{th} I_L \cos(\beta - \theta)} \right] \quad (8.12)$$

δ değerinin bulunması ile DVR' ın ilave gerilimi ve görünür gücü (8.3) ve (8.4) denklemlerinden elde edilebilir (Haque, 2001)

8.3 DVR Uygulamaları

8.3.1 Siemens Sipcon S-DVR

SIEMENS tarafından dizayn edilen DVR, enjeksiyon transformatörüne paralel olarak bağlanmış birkaç 2 MVA'lık inverter modülünden meydana gelmektedir. 50 ve 60 Hz'lik

şebekeler için nominal gerilimler 400,525 ve 6901 V'dur. Ayrıca bu donanım, bir bağlama transformatörü vasıtasıyla daha yüksek gerilim seviyelerine bağlanabilir. DVR'ın her bir ünitesinden nominal değeri, her bir ünitenin gerilim enjeksiyonu nominal yük akımıyla belirlenebilir.

SIEMENS'in DVR'ı, gerilim saptmalarını 2-3 ms. içinde kompanze edebilir ve asimetrik şebeke gerilimini ve harmonik gerilim kompanzasyonu 13. harmoniğe kadar dengeleyebilir.

SIPCON 5, bir redresör kullanır, DC hat ve şebeke arasına bir enerji sistemi gibi bağlanır. Bu topoloji ile, SEPCON 8, sınırsız gerilim saptmasını kompanze edebilir. Mamafih, %50'den büyük gerilim saptmaları kompanze edilemez.

8.3.1.1 Aseas Brown Boveri (ABB)

ABB' nin prototip DVR'ı aşağıdaki özellikleri gösterir:

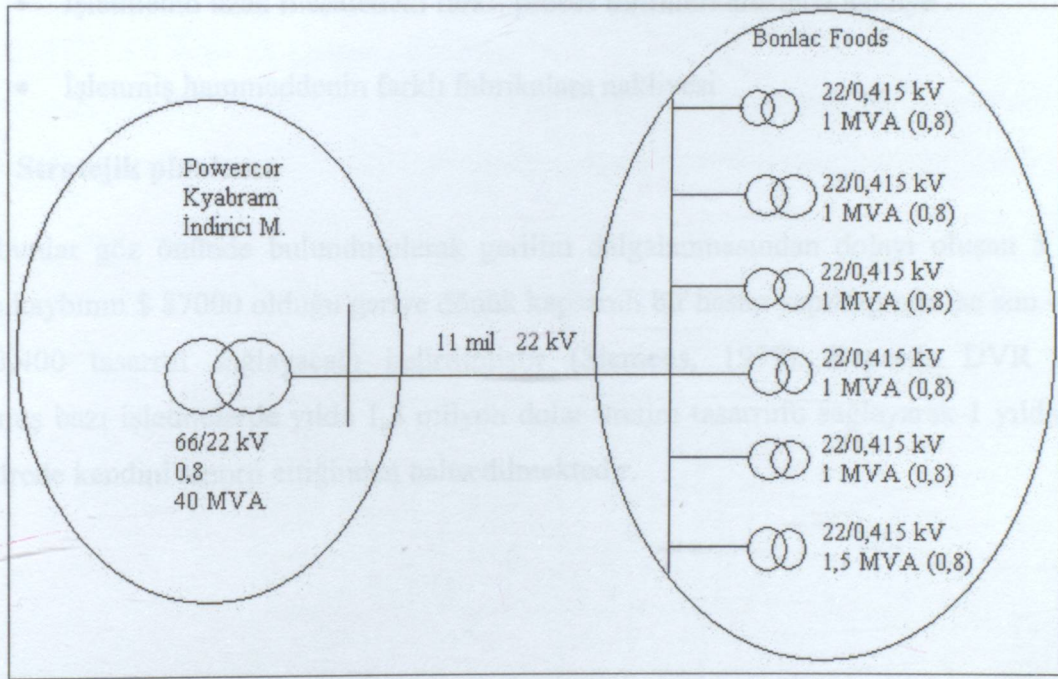
- Nominal gerilim :22 kV
- Max. yük : 4MVA
- Bir fazdaki enjeksiyon kapasitesi : Nominal gerilimin % 50'si kadardır
- Üç fazdaki enjeksiyon kapasitesi : Nominal gerilimin % 38'i kadardır
- Nominal güç:1,52 MVA
- Depolama kapasitesi (Kondansatör bataryası dahil): 185 kj
- Şarj süresi: 150 ms
- Zaman karakteristikleri:
 - Ayarlama süresi:10 ms
 - Cevap süresi: 1 ms
 - Enjeksiyon süresi: 1/4 periyot
 - Deşarj süresi : 2 dakika

ABB tarafından kullanılan iki seviyenin topolojisi, her bir 6 adet IGCT içeren 2 güç dönüştürücüsünden meydana gelmektedir. Bir IGCT'nin nominal akımı 4 kA dır ve nominal gerilimi de 4,5 kV'dır. DC-hat gerilimi 2,2 kV'dır e max. güç 100 MVA'dır.

8.4 DVR Kurulumunun Ekonomik Önemi

Yüksek güçlü işletmelerde DVR sisteminin ekonomik öneminin daha iyi anlaşılabilmesi için Avustralya' da ki Bonlac Foods firması için Siemens Power Transmission And Distribution tarafından kurulan 2MVA' lık DVR sistemi ve maliyet hesabı özetlenmiştir

Bonlac Foods 11 mil mesafedeki 66-22 kV, 40 MVA ($\cos\phi=0,8$) gücünde 3 adet transformatöre sahip Powercor-Kyabram indirici merkezinden beslenmektedir. Bonlac 0,8 güç faktöründe yaklaşık 5 MVA kurulu güce sahiptir.



Şekil 8.2 Bonlac Foods tek hat şeması.

Kyabram fiderlerinde yaz döneminde fırtına ve kuş yuvalarından dolayı oldukça yükselmektedir. 66kV tarafında yılda 20-25 arıza oluşmaktadır. 22 kV tarafında ise 15-20 arıza oluşmaktadır. Bu arızaların %66' sı gerilim düşümüne sebep olmakta ve bu da Bonlac'ta yılda 20 - 27 kez üretimi durdurmakta idi (Siemens, 1997).

Çözüm olarak kurulan 600 kJ enerji depolama kapasiteli 2 MVA'lık DVR'ın besleme gerilimi 22 kV (faz-nötür) olup ilave edilebilen maksimum gerilim $22/1,732 \cdot 0,4 = 5,080$ kV dur (faz nötür geriliminin % 40'ı kadar). DVR kurulumundan sonra gerilim dalgalanmalarının %80'i nin yok edildiği tespit edilmiş ve Bonlac Foods tarafından 5 saatlik üretim kesintinin maliyet tasarrufu özeti aşağıda verilmiştir.

➤ Yerel Çalışmalar

- Kayıp üretim

- Temizlik çalışması

- Techizat temizliği süresince verimsiz çalışma / Tekrar başlama zamanı

- Hammadde israfı ve işletmenin tekrar üretime geçmesi

➤ Nakliye Maliyetleri

- İşletmenin uzak mesafedeki farklı proses birimleri arasında nakliye

- İşlenmiş hammaddenin farklı fabrikalara nakliyesi

➤ Stratejik planlama

Tüm bunlar göz önünde bulundurularak gerilim dalgalanmasından dolayı oluşan 5 saatlik üretim kaybının \$ 87000 olduğu geriye dönük kapsamlı bir hesap yapıldığında ise son 47 ayda \$2,453,400 tasarruf sağlayacağı belirtilmiştir (Siemens, 1997). Raporda DVR sistemi kurulmuş bazı işletmelerde yılda 1,3 milyon dolar üretim tasarrufu sağlayarak 1 yıldan daha kısa sürede kendini amorti ettiğinden bahsedilmektedir.

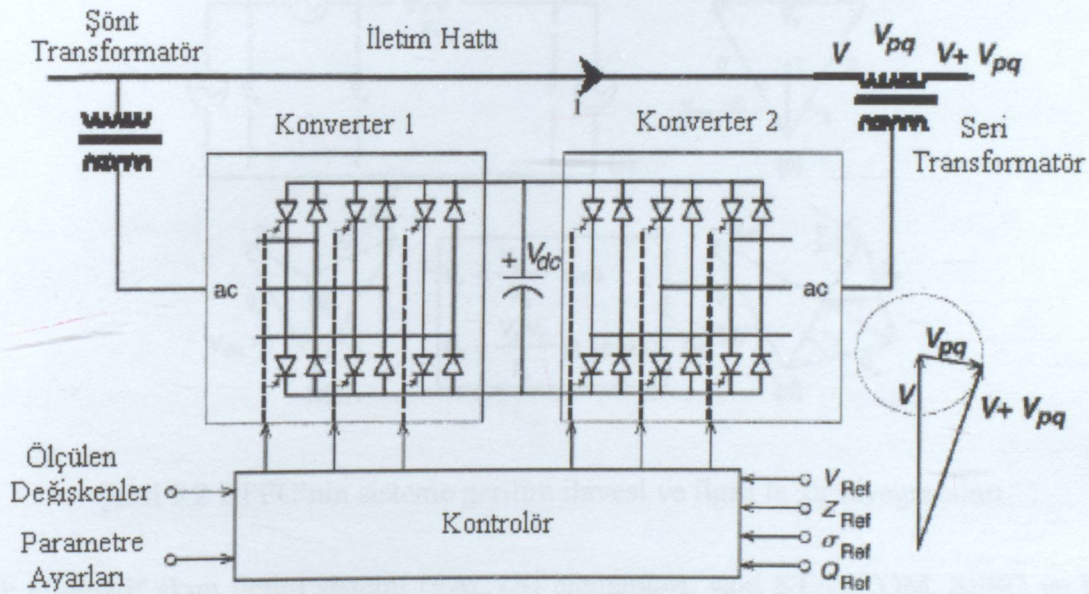
9. BİRLEŞTİRİLMİŞ GÜÇ AKIŞ KONTROLÖRÜ (UPFC)

9.1 Giriş

Bu bölümde birleştirilmiş güç akış kontrolörlerinin temel yapısı ve çalışma şekli anlatılmaktadır. UPFC iki katı hal gerilim kaynaklı inverterden oluşur. Bunlar ortak bir DC kapasitör ile birbirine bağlantılıdır. Her inverter çıkışta bir transformatörle akupule edilmiştir. Sistem STATCOM ve SSSC den oluşmaktadır.

9.2 UPFC' in Yapısı Ve Çalışma Prensipleri

Birleştirilmiş güç akış kontrolörü, temelde ortak bir DC ESD' ye bağlı iki konvertörün iletim hattına seri ve paralel transformatörler üzerinden bağlanmasından oluşmaktadır (Şekil 9.1).



Şekil 9.1 UPFC yapısı ve genel bağlantı şekli.

Elektriksel güç hat empedansının bir fonksiyonu olarak iletim hattında yüke doğru akar. Gönderilen ve alınan gerilimlerin genliği ve faz açısı bu gerilimlerin arasındadır. Aslında iletilen güç hat empedansına karşılık olan gerilime bağlıdır. Şekil 9.2(a) basit bir iletim hattının tek hat diyagramını gösterir. Sırasıyla endüktif reaktans X_L , seri ilave edilen gerilim V_{dq} , hat-başı gerilimi V_S , hat sonu gerilimi V_R dir.

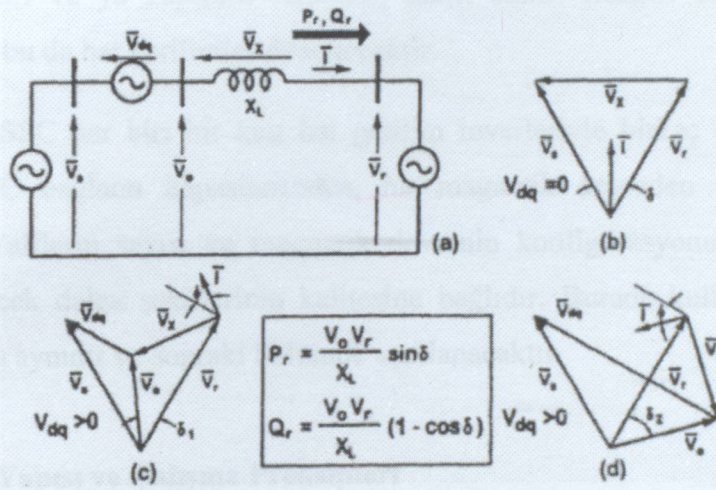
Hat reaktansına karşılık gelen gerilim;

$$V_x = V_S - V_R - V_{dq} = I_{xL} \quad (9.1)$$

V_x gerilimi V_{dq} 'nın değişmesiyle değiştirilebilir, tabi ki dolayısıyla hat akımı ve iletilen güç de değişecektir. $V_{dq}=0$ olduğunu düşündüğümüzde Şekil 9.2(b)'den de görüldüğü gibi V_s gerilimi, V_r 'den δ açısı kadar ileridedir.

Sırasıyla hat sonu akımı I , aktif ve reaktif güçler P_r ve Q_r 'dur. V_{dq} 'nın iletim hattına ilave edilmesine karşı hattın hat başı gerilimi V_s , hala hat sonu gerilimi V_r 'den ileridedir ama bu kez δ_1 açısı kadar (Şekil 9.2(c)).

Hat sonu akımı ve iletilen güç miktarı değişir. İlave edilen V_{dq} 'nın büyük bir miktarı iletim hattının hat-başı gerilimi V_0 şimdi V_r 'den δ_2 faz açısı kadar geridedir (Şekil 9.2(d)). Bu anda hat sonu akımı ve güç yer değiştirir. Bu bilgiye göre güç kontrolünün ayarı tanımlanacaktır.



Şekil 9.2 UPFC'nin sisteme gerilim ilavesi ve ilgili fazör diyagramları

Esnek alternatif akım iletim sistemi (FACTS) elemanları, yani STATCOM, SSSC ve UPFC hat sonu ve hat başında iletim hattının yine fazörlere bağlanmasında gücü kontrol etmek için kullanılırlar. UPFC ilgili referanslarda iki tane katı hal gerilim kaynağından oluşur, bunlar ortak bir DC bağlantı kapasitesine bağlıdır. Her inverter transformatör ile akuple edilmiştir. Birinci inverter STATCOM olarak bilinir, bu bağlantı noktasında sinüzoidal akıma ilave edilir.

İkinci inverter SSSC olarak bilinir, bu iletim hattının efektif geriliminin genliğine ilave edilir. STATCOM ve SSSC yalnız başlarına çalıştırıldığında terminalde reaktif güçler yer değiştirir.

İnverterin ikisi birden UPFC olarak çalışırken yer değiştiren güçler inverterin ucunda aktif olduğu kadar reaktifdir. İnverterin ucunda yer değiştiren aktif güçler diğer inverterin ucundaki güçlerle birlikte DC bağlantı kapasitesine doğru akarlar.

V_{dq} , seri iletim hattında V_x gerilimine dönüşür. Böylece akım ve güç değişir. Faz açısı Φ (Şekil 1c,d) ilave edilen gerilim V_{dq} ve hat akımı I arasındaki açıdır. $0-2\pi$ arasındadır.

Yer değiştiren aktif güç P_{inv} , ve reaktif güç Q_{inv} şu şekilde yazılabilir;

$$P_{inv} = V_{dq} \cdot I = V_{dq} \cdot I \cdot \cos \Phi \quad (9.2)$$

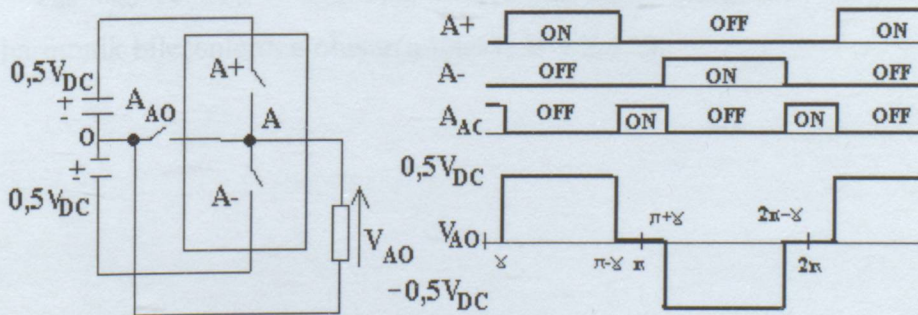
$$Q_{inv} = V_{dq} \cdot I = V_{dq} \cdot I \cdot \sin \Phi \quad (9.3)$$

Aktif güç hattın STATCOM' a doğru çekilir(absorbe edilir), bağlantı noktasındaki akıma ilave edilir. STATCOM aracılığı ile ilave edilen akımın reel kısmı I_d , hat gerilimi ile ya aynı ya da zıt fazdadır. Bu akımın reaktif bileşeni I_q , hat gerilimine diktir. Böylece bağlantı noktasında endüktif ve ya kapasitif reaktansı taklit edilir. Reaktif akım bağımsız olarak kontrol edilebilir, bu da hat gerilimini düzeltecektir.

STATCOM ve SSSC her biri bir katı hal gerilim inverteriyle birkaç GTO(Gate Turn Of) tristörden, bir DC bağlantı kapasitesinden, bir magnetik devreden ve bir kontrolörden meydana gelir. Valflerin sayısı ve magnetik devrenin konfigürasyonunun çeşitliliği FACTS tarafından üretilecek dalga şekillerinin kalitesine bağlıdır. Burada kullanılan iki inverterin konfigürasyonu da aynıdır ve sonraki bölümde açıklanacaktır.

9.3 İnverterin Yapısı ve Çalışma Prensipleri

Şekil 9.3 bir fazlı bir inverter devresini gösterir. 3 seviyeli bir pozitif dalga (A_+), bir negatif dalga (A_-) ve bir AC dalga (A_{AC}) 'dan oluşur. Bir kutup kapasiteye çapraz bağlandığı zaman tamamen V_{DC} Dc gerilimiyle şarj olur ve dalgalar alternatif hareket ederler, kutup çıkış gerilimi, V_{AO} , kutbun orta noktasında kapasitenin "0" noktası kare dalgaya benzer ardışık pozitif bileşenler içerir, ve bütün tek harmonik bileşenler sıfır, üçüncü harmonikleri negatif, beşinci harmoniğe kadar pozitif ve yediye kadar bu harmonikleri içerir.

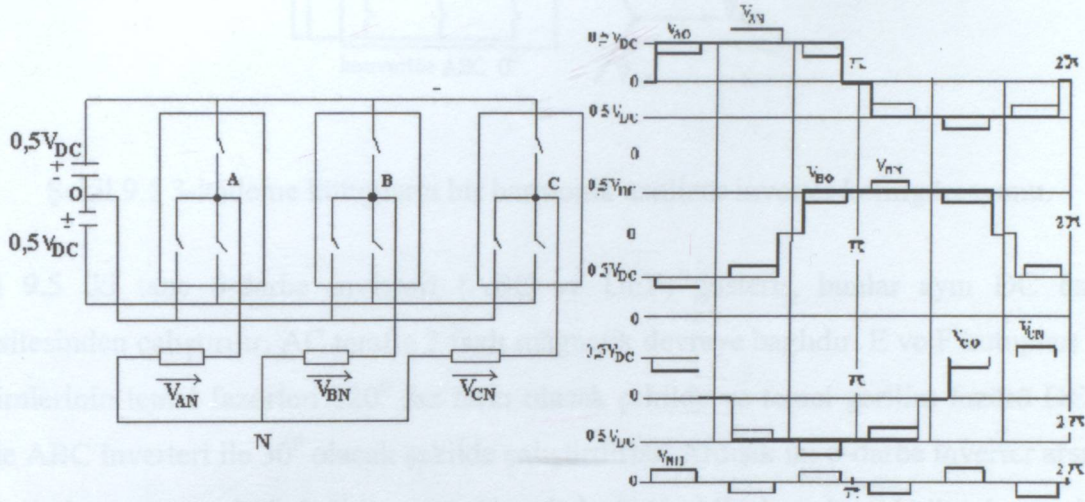


Şekil 9.3 Üç kademeli inverter kutbu ve çıkış gerilimi .

Herhangi bir tek temel bileşenin genliği;

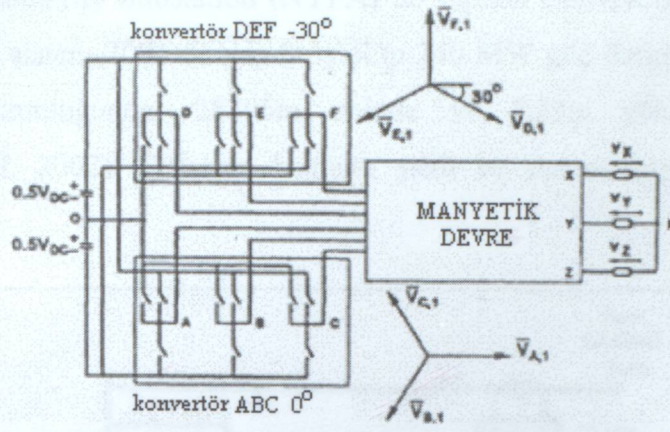
$$V_{A0,n} = \frac{2}{n\pi} V_{DC} \cos n\gamma \quad (9.4)$$

olarak ifade edilebilir. Her çeyrek periyotta AC kutup çıkış gerilimi sıfır ve $n=2k+1$ ($k=0,1,2,3,\dots$) için AC valf çalıştırılır.



Şekil 9.4 6-darbeli, 3 kademeli inverter ve çıkış gerilimleri .

Şekil 9.4 aynı DC kapasiteye çapraz bağlı A, B ve C kutuplarını gösterir ve kutup çıkışları yüklü üç fazın nötr noktasına bağlıdır, kapasitenin orta noktasına bağlı değildir. A, B ve C kutupları 6- darbe inverter şeklinde kutup gerilimleri gibi V_{A0} , V_{B0} ve V_{C0} , zaman kaydırmalı olarak çalıştırılır. Böylece temel fazörler, V_{A1} , V_{B1} ve V_{C1} arasında 120° faz farkı oluşur. Sıfırdan itibaren ardışık olarak her kutup akımının bileşenleri DC bağlantı kapasitesine geri dönmeyiz. Her kutup geriliminin ardışık bileşenleri $V_{N0} = (V_{A0} + V_{B0} + V_{C0}) / 3$, DC bağlantı kapasitesinin orta noktası ve nötr arasında görünür. Böylece gerilimlerin her fazı, $V_{AN} = V_{A0} - V_{N0}$, $V_{BN} = V_{B0} - V_{N0}$ ve $V_{CN} = V_{C0} - V_{N0}$, sadece bir temel bileşenden ve (9.4) eşitliğinde verilen tek harmonik bileşenlerden oluşur ($n=6k \pm 1$, $k=1,2,3,\dots$).



Şekil 9.5 3-kademe kutuplarla bir harmonik analizör inverter konfigürasyonu.

Şekil 9.5 iki tane 6-darbe inverteri (ABC ve DEF) gösterir, bunlar aynı DC bağlantı kapasitesinden çalıştırılır. AC tarafta 3 fazlı magnetik devreye bağlıdır. E ve F kutupları kutup gerilimlerinin temel fazörleri 120° faz farkı olacak şekilde ve temel gerilim fazörü DEF'den geride ABC inverteri ile 30° olacak şekilde çalıştırılırlar. Ardışık iki 6-darbe inverter arasındaki yer değiştirme açısı çok darbeli inverter düzeninde $2\pi/6m$ 'dir; burada m kullanılan toplam 6-darbeli inverter sayısıdır.

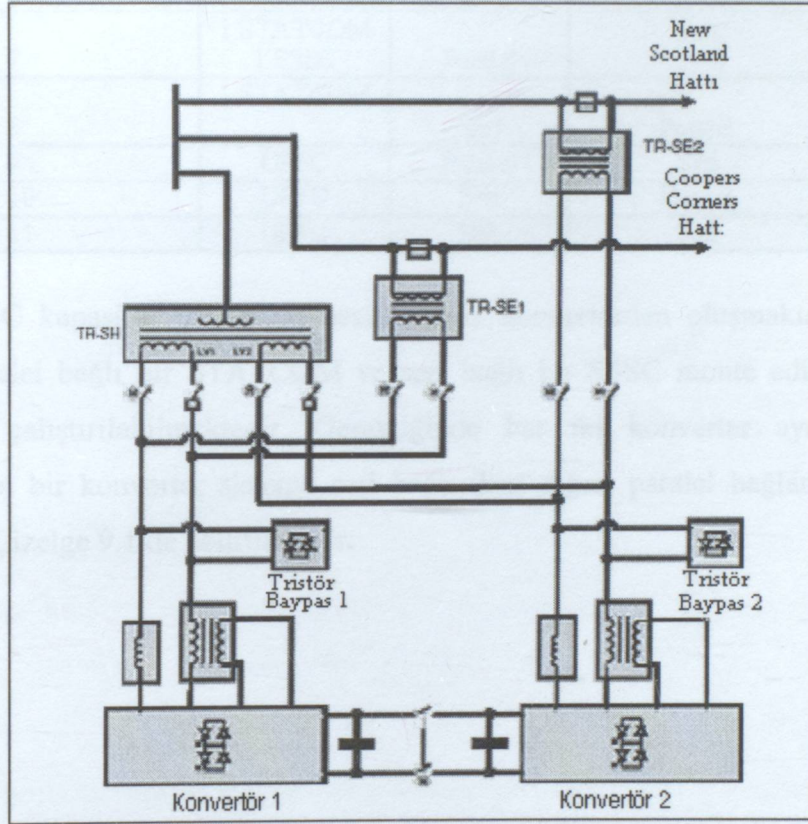
9.4 UPFC' in Kontrolü

UPFC'nin kontrolü, STATCOM'un kontrolü ve SSSC'nin kontrolü olmak üzere iki kısma ayrılabilir. STATCOM ve SSSC bağımsız cihazlar olarak çalıştırıldığında terminalde reaktif güçler yer değiştirirler. Aynı ayrı çalışma esnasında hat akımına dik olacak şekilde gerilime SSSC ilave edilir böylece endüktif ya da kapasitif reaktansa benzetilir. Her iki inverter birlikte UPFC gibi çalıştırılırken ilave edilen gerilim hat akımıyla herhangi bir açıda bulunabilir. Yer değiştiren aktif güç ile diğer inverterin terminaline doğru akış DC bağlantı kapasitesine doğru akar. STATCOM hala reaktif gücü kontrol etmek için kullanılabilir.

STATCOM kontrolü; inveter gerilimi ve hat gerilimi arasındaki faz açısını ayarlamak için kullanılır. STATCOM bunu dinamik olarak kontrol eder, üretirek veya absorbe ederek bağlantı noktasındaki istenen değerde ayarlar.

İlave edilen gerilim akımla herhangi bir fazda bulunabilir. İlave edilen akım iki kısımdan oluşur. Birincisi aktif bileşen gerilimle aynı fazdadır, bu aktif gücü hatta dağıtır, bu ilave edilen gerilimle UPFC deki kayıplar önlenir. İkinci kısım ise reaktif bileşendir. Bu da gerilimle 90° kadar farklıdır, endüktif veya kapasitif reaktansa benzetilebilir.

New York Power Authority Substation (NYPA) de yapılan Convertible Static Compensator (CSC) olarak anılan sistem 2001 de yapılmış olup 240 MW güç iletim kapasitesine sahiptir. Santral 35,66m uzunluğunda, 28395m eninde ve 8,23m yüksekliğinde bir alanı kaplamaktadır(Abdel, 2002). Sistemin bağlantı şekli ve sistem bileşenleri Şekil 9.6' da gösterilmiştir.



Şekil 9.6 NYPA santraline ait CSC yapısı(Abdel, 2002).

Çizelge 9.1 CSC konfigürasyonları(Abdel, 2002).

CSC KONFIGÜRASYONU			
Konfigürasyon	Model	Konverter Bağlantısı	
		Konverter 1	Konverter 2
1	1 STATCOM	Paralel	Kullanılmıyor
2	1 STATCOM	Kullanılmıyor	Paralel
3	2 STATCOM	Paralel	Paralel
4	1 SSSC	Seri	Kullanılmıyor
5	1 SSSC	Kullanılmıyor	Seri
6	2 SSSC	Seri	Seri
7	1 STATCOM 1 SSSC	Paralel	Seri
8	1 STATCOM	Seri	Paralel
9	UPFC	Paralel	Seri
10	UPFC	Seri	Paralel
11	UPFC	Seri	Seri

Sistem aynı DC kapasitör üzerinden beslenen iki konvertörden oluşmaktadır. Ayrıca her konvertöre paralel bağlı bir STATCOM ve seri bağlı bir SSSC monte edilmiştir. CSC 11 farklı modda çalıştırılabilmektedir. Gerekğinde her iki konverter ayrı ayrı devreye alınabildiği gibi bir konverter sisteme seri bağlı iken diğeri paralel bağlanabilir. 11 farklı çalışma modu Çizelge 9.1 de belirtilmiştir.

$$P = \frac{V_L}{X} \sin \delta = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (10.1)$$

(10.1)

esitliği ile tanımlanır. Burada hat başı ve hat sonu gerilileri eşit kabul edilmiştir $V_1=V_2=V$. Maksimum kompanseman aktif bat

$$P = \frac{V^2}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (10.2)$$

(10.2)

esitliği ile tanımlanır.

Temel eği ve maksimum kompanseman aktif bat $\delta = 90^\circ$ olarak kabul edilir. Bu eği ile farklı kontrol stratejisi kurgulanabilir. STATCOM ve SVC gibi her bir aygıtın maksimum kompansemana yapabildiği maksimum aktif bat değişim aralığına göre STATCOM ve SVC kompanseman gücü değerlendirilir. Bu noktadan yola çıkarak $\gamma = 1/2$ ve $\delta = 90^\circ$ aralığına girilir ve bu eği ile her bir aygıtın maksimum kompanseman aktif bat sağlayabildiği STATCOM ve SVC aygıtlarının ayrı ayrı ve aynı anda STATCOM ve SVC aygıtlarının toplam kompanseman aktif bat değeri elde edilir.

10. GÜÇ KALİTESİ KONTROLÖRLERİNİN UYGULAMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

10.1 Giriş

Bu bölümde güç kalitesi kontrolörlerinin birbirleri ile mukayesesi yapılarak kontrolörlerin üstün yanları ve yetersiz kaldığı noktalar açıklanmıştır. Statik Senkron Kompanzatör ile Statik Var Kompanzatör; Tristör Kontrollü Seri Kondansatör ile Statik Senkron Seri Kompanzatör; Dinamik Gerilim Düzenleyici ile D-Statcom karşılaştırılmıştır.

10.2 STATCOM ve SVC' nin Karşılaştırılması

İki makineden oluşan bir güç sistemi iki ayrı yöntemle orta noktasından kompanse edilerek STATCOM ve SVC karşılaştırılacaktır. Şekil 10.1 te STATCOM (Şekil 10.1(a)) ve SVC (Şekil 10.1(b)) ile yapılmış kompanzasyon şemaları ve bunların sistem cevabı verilmiştir. Kontrolörlerin çıkış Var değerlerinin değişimi ile P-δ karakteristiği temel eğriden maksimum kompanzasyon eğrisine doğru kaymaktadır. Temel eğri kompanzasyon yapılmadan elde edilmiştir ve

$$P = \frac{V_R V_S}{X} \sin \delta = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (10.1)$$

eşitliği ile tanımlıdır. Burada hat-başı ve hat-sonu gerilimi eşit kabul edilmiştir $V_S = V_R = V$. Maksimum kompanzasyon eğrisi ise

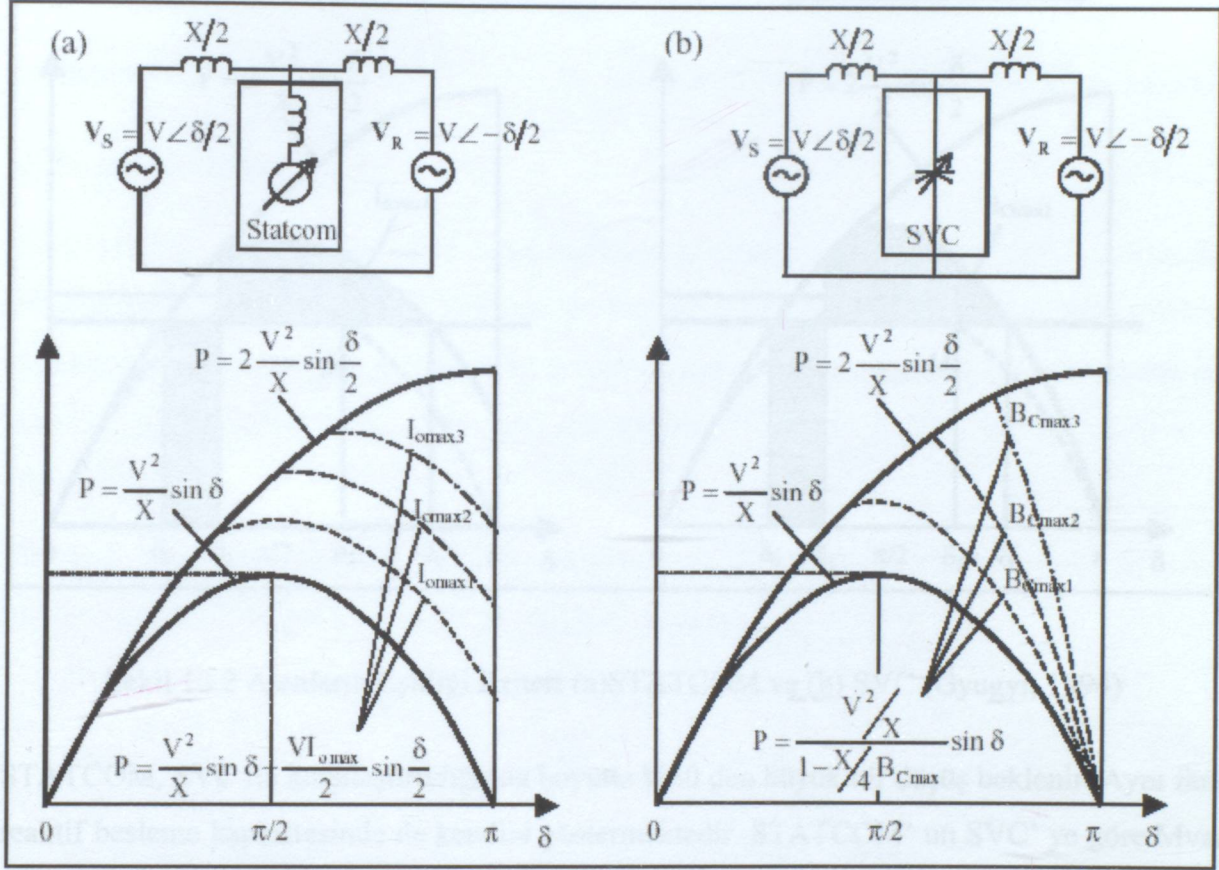
$$P = 2 \frac{V^2}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (10.2)$$

eşitliği ile tanımlıdır.

Temel eğri ve maksimum kompanzasyon eğrisi arasında elde edilmiş üç farklı eğri, üç farklı kontrol çıkışına karşılık gelmektedir. STATCOM ve SVC için bu eğriler arasında karşılaştırma yapıldığında maksimum çıkış akımına ulaşılan kadar STATCOM' un ideal kompanzatör gibi davrandığı görülmektedir. Bu noktadan yola çıkılarak ; $\pi / 2 \leq \delta \leq \pi$ aralığında gerilim ve faz açısı δ ' den bağımsız olarak maksimum kapasitif akım sağlayabilmesi STATCOM' u öne çıkartmaktadır. Aynı aralıkta SVC' nin cevabı ise STATCOM' un iletilen güçteki yumuşak düşüşüne karşılık keskin bir eğriye sahip güç düşümlüdür.

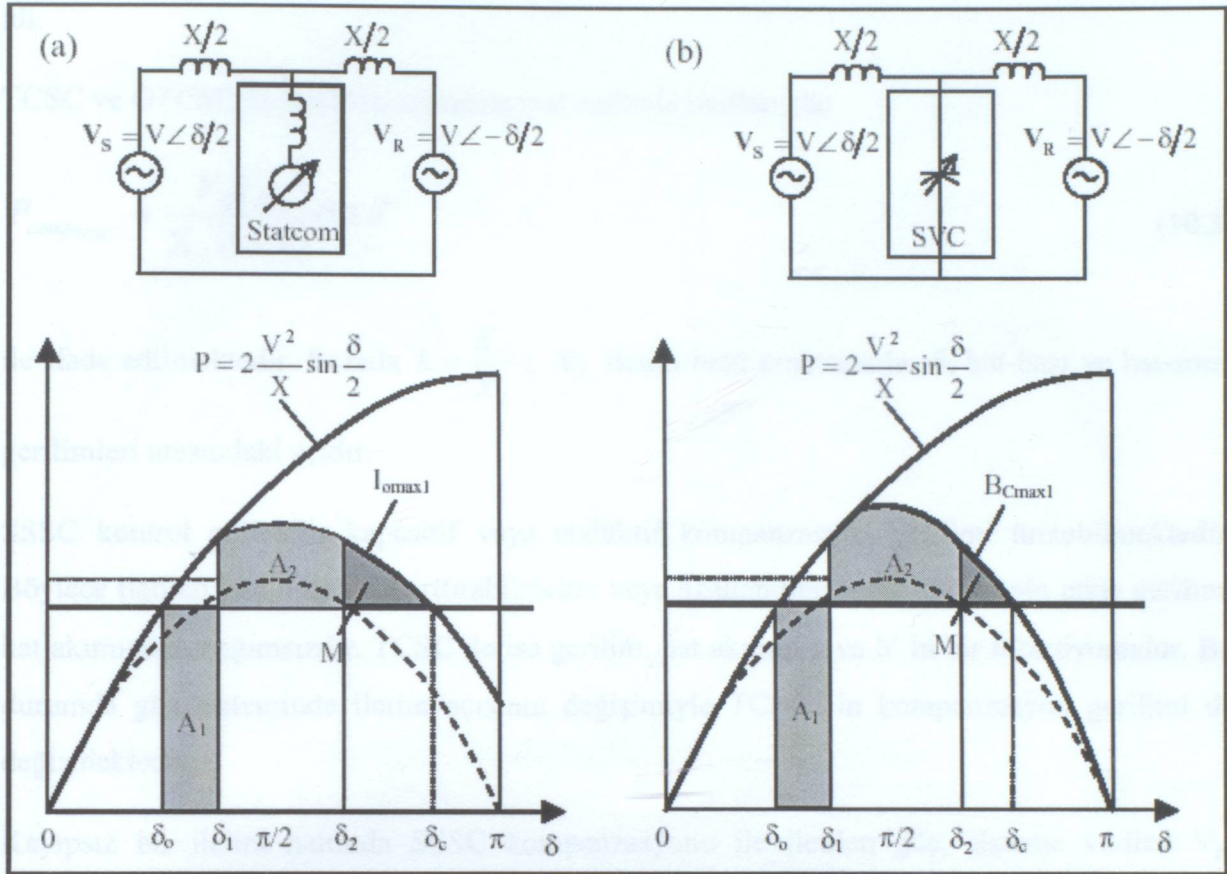
STATCOM, reaktif güç çıkışını sürekli ve hızlı değiştirerek AC sistemdeki değişimleri kompanze etmektedir.

SVC' de çıkış akımı ve gerilim tamamen şebeke empedansına bağlıdır, iletim sistemi ile rezonans oluşması dahi söz konusudur.



Şekil 10.1 Kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz haldeki $P-\delta$ karakteristiği (a) STATCOM cevabı (b) SVC nin cevabı (Gyugyi, 1994)

Şekil 10.2 de STATCOM ve SVC nin iletilen gerçek gücün aşırı yükselmesine sebep olan hataya verdiği cevap görülmektedir. Bu hata hat sonundaki makinenin (sending-end machine) hızlanmasına neden olmaktadır. Makinenin tork açısı arıza bölgesinde δ_0 dan δ_1 e yükselmektedir. Bu ise iletilen gücün yükselmesi ile sonuçlanır. Atalet momentinin etkisiyle tork açısı artmaya devam edecektir. Makine, arıza anında kazandığı kinetik enerjiyi kaybedinceye kadar artış devam edecektir. Şekil 10.2 den de görüldüğü gibi orta noktasına STATCOM kurulmuş sistem, SVC' li sisteme göre daha yüksek performansa sahiptir.



Şekil 10.2 Alanların Eşitliği Kriteri (a)STATCOM ve (b) SVC (Gyugyi, 1994)

STATCOM, SVC ile karşılaştırıldığında boyutta %50 den büyük bir düşüş beklenir. Aynı fark reaktif besleme kapasitesinde de kendini göstermektedir. STATCOM' un SVC' ye göre Mvar seviyesinde %15-30 daha yüksek güçte reaktif besleme yapabildiği söylenmektedir (Larsen, 1992).

10.3 TCSC ve SSSC' in Karşılaştırılması

Seri Reaktif Güç Kompanzasyonu iletim hattının reaktif empedansının kontrolü esasına dayanır. Seri kapasitif empedansın, toplam hat reaktansını azaltmak; böylece hattın gücünü yükseltmek için kullandığı bilinmektedir. Ancak burada sistem sabittir ve iletilen güç kontrol edilememektedir.

1980'lerde seri reaktif güç kompanzasyon kontrolü için yarı iletken anahtarlama elemanları üzerine kurulu Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) tasarlandı. Bu kontrolör bir veya birden çok kapasitör grubu ve her birine paralel bağlı tristör kontrollü reaktörden oluşmakta idi. 1992'de GTO Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (GTCSC) tasarlandı. Her iki kontrolörde de amaç; yarı iletken elemanların uygun anahtarlama ile seri kapasitif empedansın kontrolü

idi.

TCSC ve GTCSC kontrollü kompanzasyon hattında iletilen güç

$$P_{comp_{TCSC}} = \frac{V_S V_R}{X_L (1-k)} \sin \delta \quad (10.3)$$

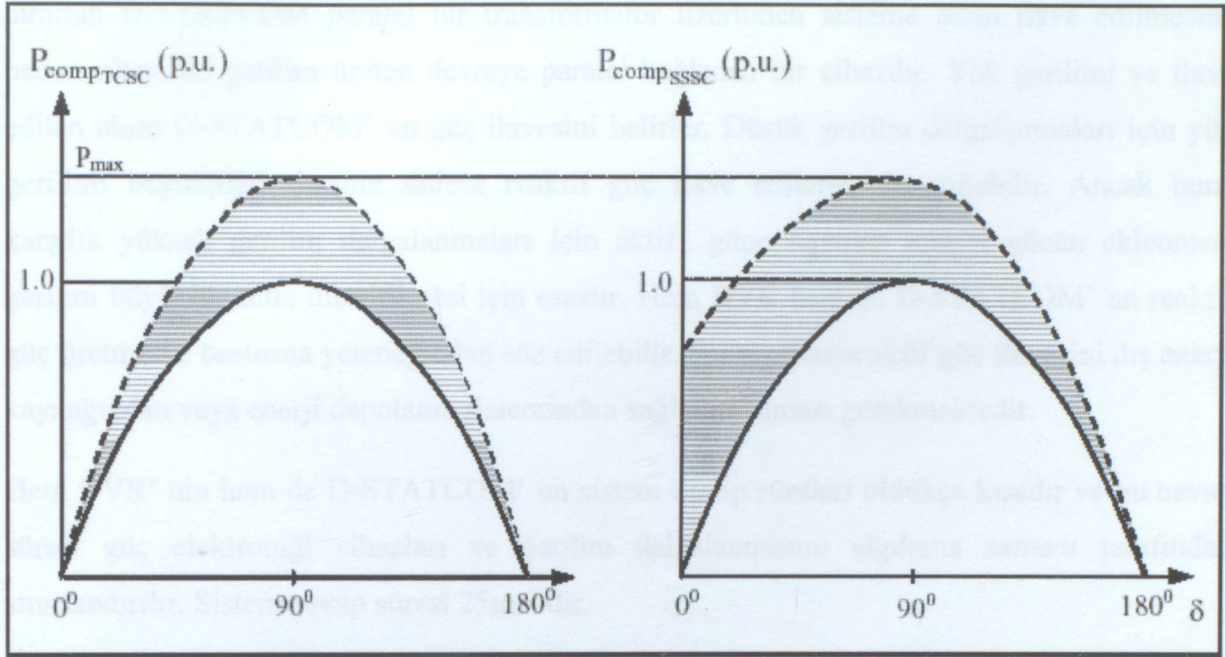
ile ifade edilmektedir. Burada $k = \frac{X_C}{X_L}$; X_L iletim hattı reaktansıdır. δ , hat-başı ve hat-sonu gerilimleri arasındaki açıdır.

SSSC kontrol edilebilir kapasitif veya endüktif kompanzasyon gerilimi üretebilmektedir. Böylece iletilen güç miktarını arttırabilmekte veya azaltabilmektedir. SSSC'nin çıkış gerilimi hat akımından bağımsızdır. TCSC de ise gerilim, hat akımının ve δ ' in bir fonksiyonudur. Bu durumda güç sisteminde iletim açısının değişimiyle TCSC' in kompanzasyon gerilimi de değişmektedir.

Kayıpsız bir iletim hattında SSSC kompanzasyonu ile iletilen güç, sisteme verilen V_{pq} geriliminin bir fonksiyonu olarak şu şekilde ifade edilir ;

$$P_{comp_{SSSC}} = \frac{V_S V_R}{X_L} \sin \delta + \frac{V_R V_{pq}}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \quad (10.4)$$

V_{pq} ve X_c nin bir fonksiyonu olarak gücün δ açısı ile olan değişim grafiği Şekil 10.3 de verilmiştir. Her iki grafik karşılaştırıldığında seri kapasitörün δ ya bağlı olarak iletilen gücü arttırdığı görülmektedir. Ancak SSSC, δ den bağımsız olarak iletilen gücü arttırabilir ve azaltabilir. SSSC ve TCSC nin referans (Gyugyi, 1997) da yapılan karşılaştırmasında SSSC nin TCSC ye oranla iki kat yüksek VA çıkışı verebildiğinden bahsedilmektedir. SSSC eşit değerde kapasitif ve endüktif çıkış verebilmektedir. TCSC ile yapılan kompanzasyonda eşit değerde kapasitif ve endüktif Var çıkışı elde edebilmek için ek olarak güç devresi elemanlarının kullanımı gereklidir. Kapasitif kompanzasyonda her Var değeri için TCSC de ,SSSC ye oranla iki kat yüksek kapasiteli kapasitör blokları ve tristör anahtarlama gereklidir. Bunların sisteme bağlantısı göz önünde bulundurulduğunda SSSC, DC kapasitör ve kublaj transformatörüne ihtiyaç duymaktadır, buna karşın TCSC hatta direkt bağlanır.



Şekil 10.3 İletilen gücün δ açısına bağlı değişimi

10.4 DVR ve D-STATCOM' un Karşılaştırılması

Bu bölümde DVR ve D-Statcom ile bir dağıtım sistemindeki gerilim dalgalanması probleminin giderilmesi anlatılmakta ve bu problemin çözümünde hangi kontrolörün kullanımının daha faydalı olabileceği ve referans (Haque, 2001) da elde edilmiş olan sonuçlar tartışılmaktadır. DVR ve D-Statcom için zapi-mapi durumları 8.2. ve 6.2. bölümlerinde anlatılmış olup burada karşılaştırması yapılmaktadır. Burada DVR ve D-STATCOM ile adlandırılan iki güç elektroniği temel cihazları tarafından bir dağıtım sisteminde gerilim dalgalanması kaynağının düzeltilmesinin teknikleri tarif edilmiştir. Verilen bir gerilim dalgalanmasını düzeltmek için ilave edilmesi gereken minimum görünen güç bu cihazlar tarafından aynı zamanda belirlenir ve karşılanır.

Gerilim büyüklüğü güç kaynağının kalitesini belirleyen başlıca etkenlerden biridir. Dağıtım seviyesindeki yükler çeşitli sebeplerden dolayı genellikle gerilim dalgalanması sıklığına bağlıdır. Özellikle ileri teknoloji endüstrisinde gerilim dalgalanmaları bazı hassas yükler için yüksek derecede sakıncalıdır.

Dinamik gerilim düzenleyici (DVR) ve D-STATCOM gerilim dalgalanmasını dağıtım seviyesinde düzeltmek için kullanılır. DVR gerilim dalgalanmasını düzeltmek için ilave edilen transformatör üzerinden gerilim kaynağına seri şekilde bağlanarak AC gerilim üreten seri bir cihazdır. İlave edilen gerilim ve yük akımı DVR' in güç ilavesini belirler. Diğer

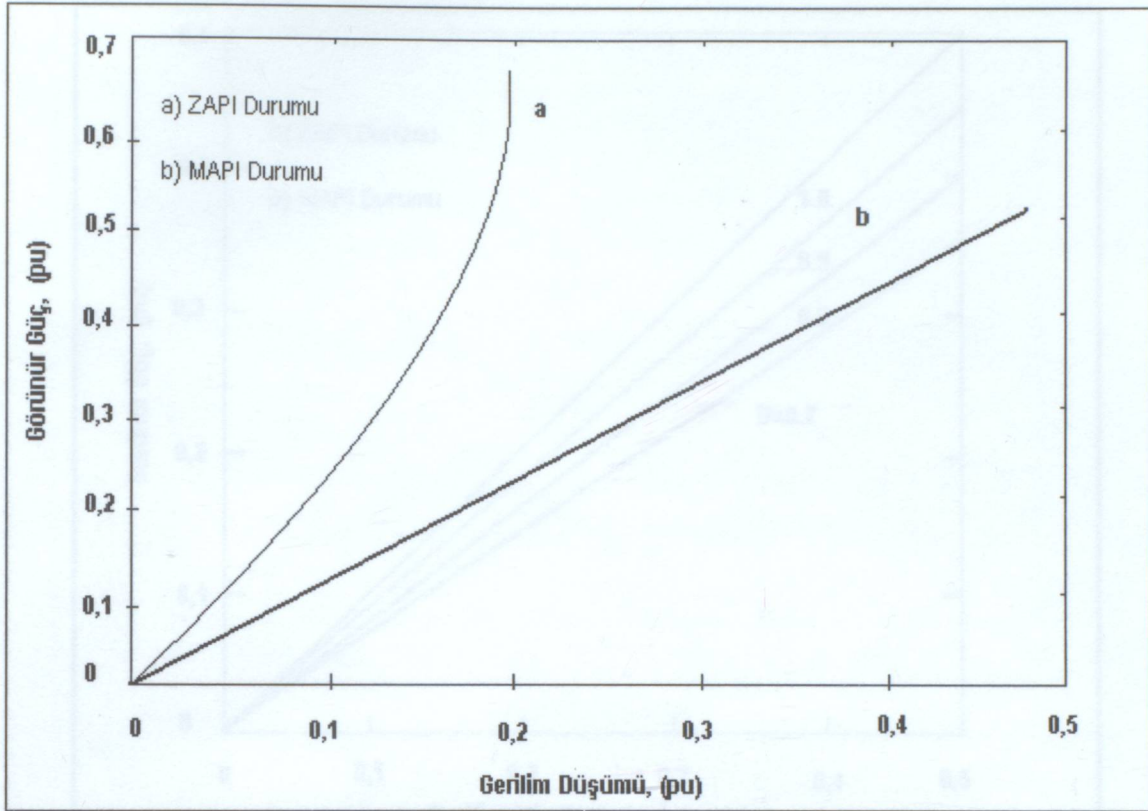
tarafından D-STATCOM paralel bir transformatör üzerinden sisteme akım ilave edilmesine neden olup AC gerilim üreten devreye paralel bağlanan bir cihazdır. Yük gerilimi ve ilave edilen akım D-STATCOM' un güç ilavesini belirler. Düşük gerilim dalgalanmaları için yük gerilimi büyüklüğü sisteme sadece reaktif güç ilave edilerek düzeltilebilir. Ancak buna karşılık yüksek gerilim dalgalanmaları için aktif güce ilaveten reaktif gücün eklenmesi gerilim büyüklüğünün düzeltilmesi için esastır. Hem DVR hem de D-STATCOM' un reaktif güç üretme ve bastırma yeteneğinden söz edilebilir. Fakat cihazın aktif güç ilavesini dış enerji kaynağından veya enerji depolama sisteminden sağlamış olması gerekmektedir.

Hem DVR' nin hem de D-STATCOM' un sistem cevap süreleri oldukça kısadır ve bu cevap süresi güç elektroniği cihazları ve gerilim dalgalanmasını algılama zamanı tarafından sınırlandırılır. Sistem cevap süresi 25ms' dir.

Burada bir dağıtım sistemindeki gerilim dalgalanmasının kaynağının düzeltilmesinde DVR ve D-STATCOM' un kararlı hal performansları karşılaştırılmaktadır. Referans (Haque, 2001) da yapılan simülasyon sonuçları göstermiştir ki; DVR D-STATCOM' a göre çok daha az görünür güç ilave ederek bir gerilim dalgalanmasını düzeltebilir. Referans (Haque, 2001) da sistemin yükü, 0.8 geri ve yük hattı hata seviyesinin 10pu olması ($X/R=2$) ve yük faktörünün de 0.8 olması durumunda sistem yükü 1.0pu olarak hesaplanmıştır. Gerilim dalgalanması durumları süresince yük hattının gerilim büyüklüğü 1.0pu değerinde korunduğu varsayılmıştır. Aşağıda DVR ve D-STATCOM için elde edilen bazı sonuçlar özetlenmiştir.

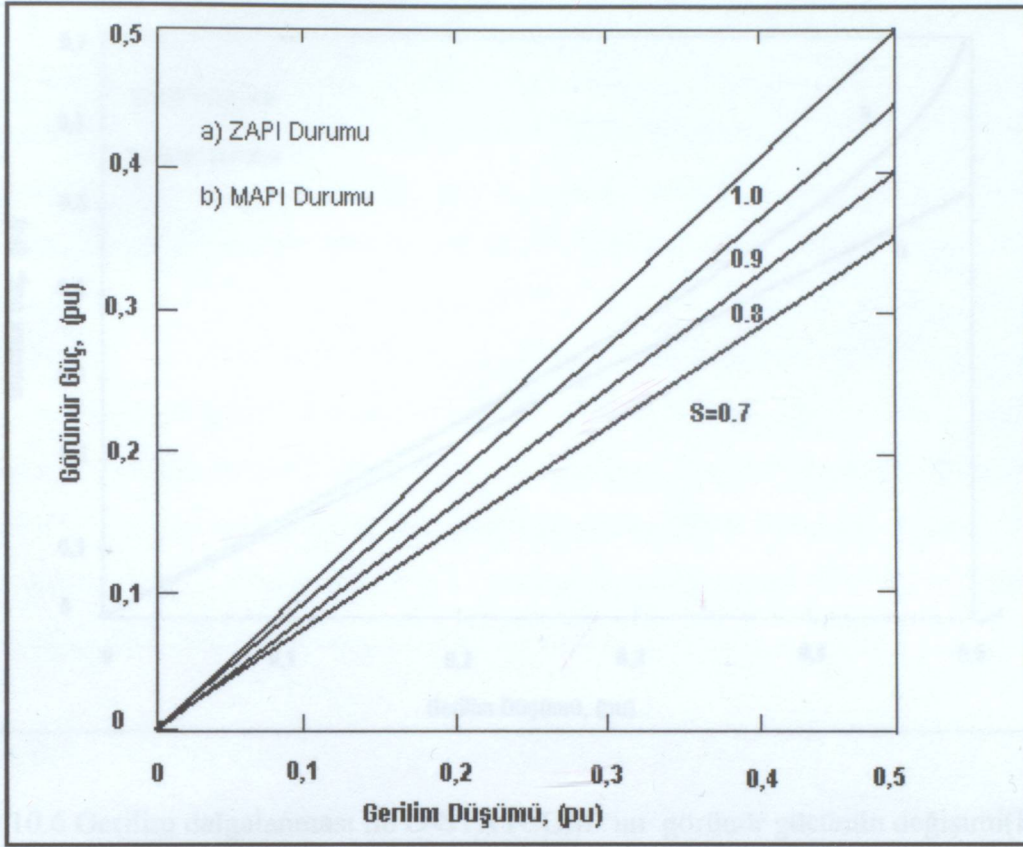
10.4.1 DVR

DVR öncelikle gerilim dalgalanmasını düzeltmek için kullanılır. ZAPI VE MAPI durumları için yük gerilim büyüklüğünü 1.0pu değerinde korumak için gerilim dalgalanmasına karşı eklenen görünür güç (S_{inj}) değişikliği Şekil 10.5 de gösterilmiştir. Şekil 10.4 den anlaşıldığı gibi MAPI durumu için (S_{inj}) gerilim dalgalanması ile lineer olarak değişir. Buna karşılık ZAPI durumu için (S_{inj}) gerilim dalgalanması ile hızla artış göstermiştir. Bu sistem için sisteme herhangi bir aktif güç eklemeksizin DVR tarafından düzeltilen maksimum gerilim dalgalanması 0,236pu bulunmuştur.



Şekil 10.4 Gerilim dalgalanması ile DVR' in eklenen görünür gücünün değişimi(Haque, 2001).

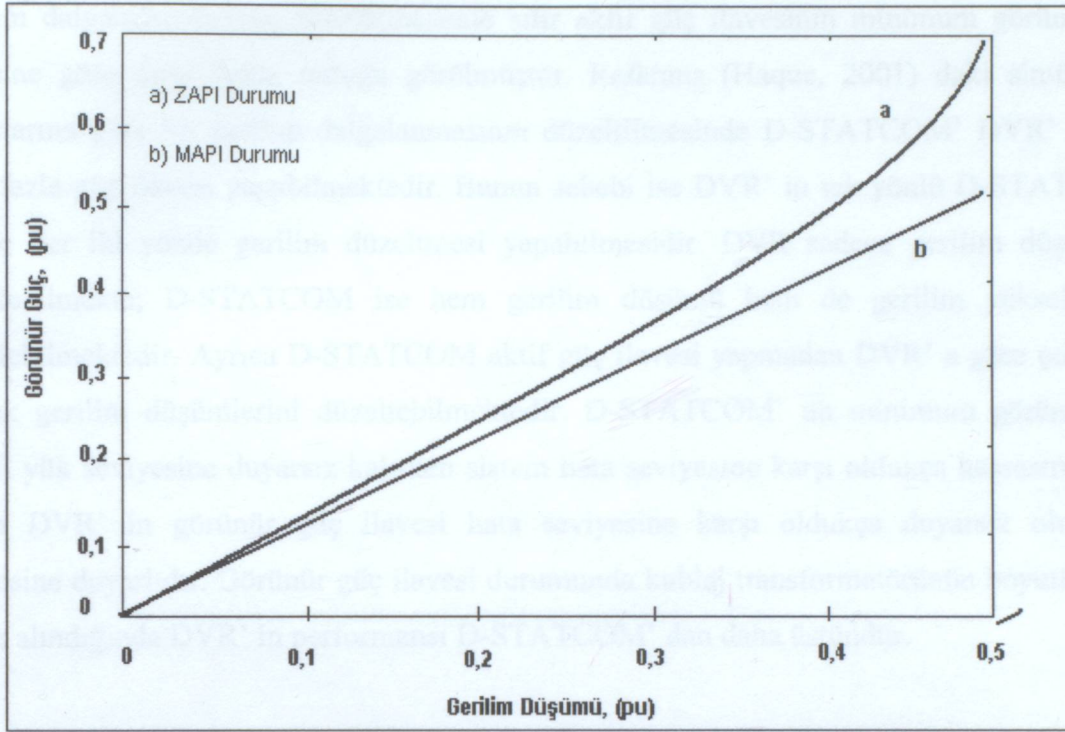
DVR ile eklenen görünür güç çeşitli hata seviyeleri, yük seviyesi, güç faktörü ve sistem empedansının X/R oranları için incelendiğinde verilen bir yük seviyesi için DVR tarafından eklenen görünür gücün sistem hata seviyesi, sistem empedansının X/R oranı ve güç faktöründen bağımsız olduğu görülmüştür (Haque, 2001). Bununla birlikte Şekil 10.5 e bakıldığında (S_{inj}) in MAPI durumu için yük seviyesine bağlı olduğu görülmektedir. Verilen gerilim dalgalanmasına bağlı olarak DVR ile eklenen görünür, güç yük seviyesi ile artmaktadır.



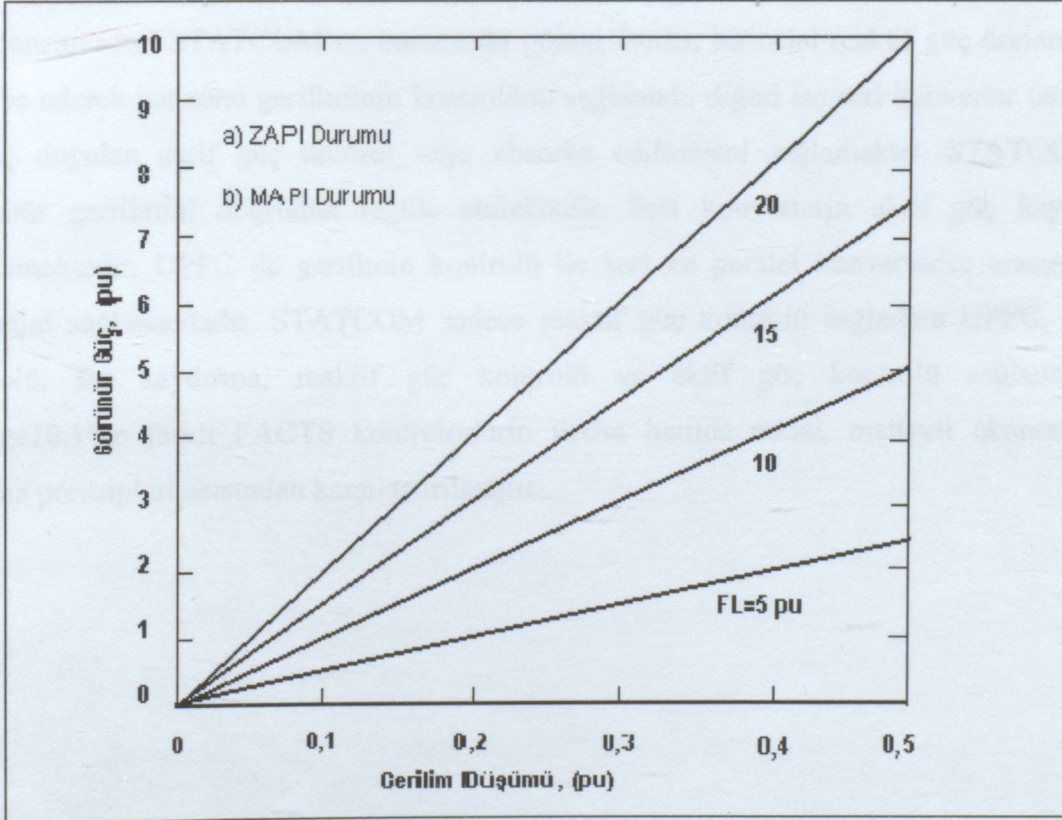
Şekil 10.5 Çeşitli yük seviyeleri için DVR'ın minimum görünür güç ilavesi(Haque, 2001).

10.4.2 D-STATCOM

Şekil 10.6 da gerilim dalgalanması ile D-STATCOM'ın görünür güç ilavesinin değişimi gösterilmiştir. Hem ZAPI hem de MAPI durumları için sonuçlar Şekil 10.6 da gösterildiği gibidir. MAPI durumu için S_{inj} , gerilim dalgalanması ile lineer değişim göstermektedir. Buna karşın ZAPI durumunda S_{inj} az da olsa daha yüksektir. Bu sistem için D-STATCOM sisteme herhangi bir aktif güç ilave etmeksizin ve DVR için bulunandan (0,236 pu) çok daha yüksek olan 0,563 pu değerine kadar olan gerilim dalgalanmalarını düzeltebilmektedir(Haque, 2001). S_{inj} 'in MAPI durumu için yük seviyesi, güç faktörü ve sistem empedansının X/R oranından bağımsız olduğu görülmüştür. Buna karşın S_{inj} Şekil 10.7 de gösterildiği gibi sistem hata seviyesine karşın çok hassastır. Şekil 10.7 de S_{inj} 'in artışının sistem hat seviyesinin artışına bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir.



Şekil 10.6 Gerilim dalgalanması ile D-STATCOM' un görünür gücünün değişimi(Haque, 2001)



Şekil 10.7 Çeşitli hata seviyeleri için D-STATCOM'un minimum görünür güç ilavesi.(Haque, 2001).

Gerilim dalgalanmalarının düzeltilmesinde sıfır aktif güç ilavesinin minimum görünür güç ilavesine göre daha üstün olduğu görülmüştür. Referans (Haque, 2001) daki simülasyon sonuçlarına göre bir gerilim dalgalanmasının düzeltilmesinde D-STATCOM' DVR' a göre daha fazla güç ilavesi yapabilmektedir. Bunun sebebi ise DVR' in tek yönlü D-STATCOM' un ise her iki yönde gerilim düzeltmesi yapabilmesidir. DVR sadece gerilim düşümünü düzeltebilmekte; D-STATCOM ise hem gerilim düşümü hem de gerilim yükselmesini düzeltebilmektedir. Ayrıca D-STATCOM aktif güç ilavesi yapmadan DVR' a göre çok daha yüksek gerilim düşümlerini düzeltebilmektedir. D-STATCOM' un minimum görünür güç ilavesi yük seviyesine duyarsız kalırken sistem hata seviyesine karşı oldukça hassastır. Buna karşın DVR' in görünür güç ilavesi hata seviyesine karşı oldukça duyarsız olup yük seviyesine duyarlıdır. Görünür güç ilavesi durumunda kublaj transformatörünün boyutları göz önüne alındığında DVR' in performansı D-STATCOM' dan daha üstündür.

10.5 UPFC ile STATCOM VE SSSC' nin Karşılaştırılması

UPFC reaktif güç kontrolü yerine doğrudan hat sonu geriliminin kontrolü ile çalışır. UPFC' nin paralel bağlı bölümü Şekil 9.1den de görüldüğü gibi dc kaynaktan beslenen bir STATCOM dur. Aynı şekilde ana fonsiyona sahip olan seri kısım da bir Statik Senkron Seri Kompanzatördür. STATCOM'un burada iki görevi vardır, birincisi reaktif güç üreterek veya absorbe ederek hat sonu geriliminin kontrolünü sağlamak, diğeri ise seri konverter tarafından ihtiyaç duyulan aktif güç üretimi veya absorbe edilmesini sağlamaktır. STATCOM, dc kapasitör gerilimini doğrudan regüle etmektedir. Seri konverterin aktif güç kayıplarını karşılamaktadır. UPFC dc gerilimin kontrolü ile seri ve paralel konverterler arasında güç dengesini sağlamaktadır. STATCOM sadece reaktif güç kontrolü sağlarken UPFC, gerilim kontrolü, faz kaydırma, reaktif güç kontrolü ve aktif güç kontrolü sağlamaktadır. Çizelge10,1'de farklı FACTS kontrolörlerin iletim hattına etkisi, maliyeti ekonomisi ve çalışma prensipleri açısından karşılaştırılmıştır.

Çizelge 10.1 FACTS kontrolörlerinin karşılaştırılması.

Teknoloji	İletim Hattına Pozitif Etkisi	Maliyet	Çalışma Prensibi
Sabit veya Anahtarlama Şönt Reaktör	Gerilim Düşümü – Düşük Yük Yönetimi	\$8-\$12 kVAR	Kapasitif Var yüklerin kompanzasyonu
Sabit veya Anahtarlama Şönt Kapasitör	Gerilim beslemesi ve Kararlılığı	\$8-\$10 kVAR	İndüktif Var yüklerin kompanzasyonu
Sabit veya Anahtarlama Seri Kapasitör	Güç akışı kontrolü, Gerilim beslemesi ve Kararlılığı	\$12-\$16 kVAR	İndüktif hat empedansını düşürür
Statik VAR Kompanzator	Gerilim beslemesi ve Kararlılığı	\$20-\$45 kVAR	İndüktif veya kapasitif yüklerin VAR Kompanzasyonu
Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC)	Güç akışı kontrolü, Gerilim beslemesi ve Kararlılığı	\$25-\$50 kVAR	İndüktif hat empedansının yükseltilmesi veya düşürülmesi
STATCOM	Gerilim beslemesi ve Kararlılığı	\$80-\$100 kVAR	İndüktif veya kapasitif yüklerin VAR Kompanzasyonu
STATCOM w/SMES	Gerilim beslemesi ve Kararlılığı	\$150-\$300 kW	İndüktif veya kapasitif yüklerin VAR Kompanzasyonu, aktif güç için enerji depolanması
Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC)	Güç akışı kontrolü, Gerilim beslemesi ve Kararlılığı	\$150-\$200 kW	SVC ve TCSC fonksiyonları, faz açısı kontrolü
Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC) w/SMES	Güç akışı kontrolü, Gerilim beslemesi ve Kararlılığı	\$250-\$350 kW	SVC ve TCSC fonksiyonları, gerilim regülasyonu, faz açısı kontrolü ve enerji depolanması

11. SONUÇLAR

Güç akışı $P_R = \frac{V_S V_R \sin \delta}{X}$ şekilde tanımlanmıştır.

Güç akış kontrolü hatbaşı gerilimi, hat sonu gerilimi ve bunların arasındaki faz açısı, ve hattın empedansına bağlıdır. Yıllardır süregelen klasik kompanzasyon tekniklerinde sabit veya tristör kontrollü kondansatör ve reaktörlerin devreye alınıp çıkarılması ile gerçekleştirilen kompanzasyon artık yetersiz kalmaya başlamıştır. Teknolojik yüklere cevap verebilecek sistemlerin kullanımı şarttır. 1990'larda ilk uygulamaları yapılan FACTS günümüzde yaygın bir kullanıma sahiptir. Mailyet hesabı yapıldığında iletim hatlarında ve yüksek güçlü işletmelerde kullanımı oldukça faydalıdır. Bazı işletmelerde yılda 1,3 milyon dolar üretim tasarrufu sağlayarak 1 yıldan daha kısa sürede kendini amorti etmiştir.

FACTS kontrolörlerinin temeli bu parametrelerin gerçek zamanlı olarak kontrolü ve böylece sistem şartlarına göre iletilen gücün kontrolüne dayanmaktadır. FACTS genel olarak 3 temel bileşenden oluşur. Bunlar **STATCOM**, **SSSC** ve bu iki kontrolörün ortak bir dc kapasitör üzerinden aynı sistemi beslemesi ile elde edilen **UPFC**' dir.

STATCOM hat gerilimi ile $\pm 90^\circ$ açığa sahip akım üreten ve hatta paralel bir kublaj transformatörü üzerinden bağlanan bir sistemdir. Burada gerilim kaynağı olarak DC kapasitör kullanılması durumunda STATCOM sadece her iki yönde reaktif ve pozitif yönde aktif güç kontrolü sağlamaktadır. Gerilim yükselmelerine müdahale edilebilmesi için DC kapasitör yerine DC batarya veya ayrı bir DC gerilim kaynağı kullanılmalıdır. Ayrıca unutulmamalıdır ki STATCOM, $\pm$ MVAR aralığında çalışmaktadır; sadece kapasitif kompanzasyon gerektiren bir sistemde ± 100 MVAR STATCOM kullanılması durumunda 100 MVAR'lık bir indüktif besleme kullanılmayan ölü bir yatırım haline gelebilir. Bu sebeple FACTS kurulumunun geniş kapsamlı olarak ele alınması, sistemin ihtiyaçları ve FACTS in bu ihtiyaçlara ne ölçüde cevap verebileceği önceden tespit edilmelidir.

STATCOM fazla yer kaplamaması ve modüler olması yönüyle büyük kentlerde tercih sebebidir.

DVR olarak da anılan seri kompanzasyon (**SSSC**) hat akımı ile $\pm 90^\circ$ açığa sahip gerilim üreten ve hatta seri bir kublaj transformatörü üzerinden bağlanan bir sistemdir. STATCOM ve DVR'ın birlikte kullanımından oluşan Bireştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (**UPFC**) 2 konverter, 2 transformatör, DC gerilim kaynağı ve kontrol mekanizmasından oluşmaktadır.

Modern FACTS cihazları klasik kompanzasyon sistemleri ile karşılaştırıldıklarında üstün yanları görülmektedir. FACTS cihazlarının üstün yanları aşağıda maddeler halinde tanımlanmıştır.

- STATCOM maksimum çıkış akımına ulaşılan kadar ideal kompanzatör gibi davranır.
- STATCOM, $\pi/2 \leq \delta \leq \pi$ aralığında δ' den bağımsız olarak maksimum akım sağlayabilir. Aynı aralıkta SVC' nin cevabı ise STATCOM' un iletilen güçteki yumuşak düşüşüne karşılık keskin bir eğriye sahip güç düşümüdür.
- STATCOM, reaktif güç çıkışını sürekli ve hızlı değiştirerek AC sistemdeki değişimleri 1 sn den daha kısa bir sürede sistem cevabı vererek kompanze etmektedir.
- STATCOM SVC' ye göre %50 daha küçük boyutlarda tesis edilebilmektedir.
- STATCOM SVC'den %15-30 daha fazla reaktif besleme yapabilir.
- D-STATCOM hatta paralel bağlanır ve Ish akımı ilave eder. DVR ise hatta seri bağlanarak seri gerilim ilave eder.
- DVR D-STATCOM'a göre daha az görünür güç ilave ederek mevcut bir gerilim dalgalanmasını düzeltir.
- DVR ve D-STATCOM hem aktif hemde reaktif bölgede güç akış kontrolü yapabilmektedir.
- DVR ve D-STATCOM düşük değerli gerilim dalgalanmalarında sadece reaktif güç ilavesi yaparak sistemin dengelenmesini sağlayabilir. Ancak yüksek değerli dalgalanmalarda reaktif besleme yanında aktif güç beslemesi de gerekmektedir.
- Referans(Haque, 2001)'da Aynı güce sahip DVR ve D-STATCOM karşılaştırıldığında DVR'ın sisteme aktif güç ilave etmeden 0.236pu gerilim düşümünü düzelttebildiği; D-STATCOM'un ise 0.563pu gerilim düşümünü düzelttebildiğinden bahsedilmektedir.
- DVR'ın görünür güç ilavesi hata seviyesine karşı oldukça duyarsız olup yük seviyesine duyarlıdır. D-STATCOM ise yük seviyesine karşı pek duyarlı olmamakla birlikte hata seviyesine karşı aşırı duyarlıdır.
- TCSC ve SSSC hattın empedansını değiştirilerek hattın gücünü yükseltirler.
- Her iki FACTS kontrolörü de hatta seri bağlanır.

- SSSC'nin çıkış gerilimi hat akımından bağımsız olup iletilen gücün artışı δ 'den bağımsızdır.
- TCSC'nin çıkış gerilimi ise hat akımı ve δ 'nin bir fonksiyonu olup, iletilen gücün artışı δ 'ye bağlıdır.
- SSSC'nin VA çıkışı, TCSC'nin VA çıkışının yaklaşık 2 katıdır. SSSC eşit değerde endüktif reaktif ve kapasitif reaktif çıkış verir. TCSC'de eşit değerde endüktif reaktif ve kapasitif reaktif çıkış elde edebilmek için ekstra güç devresi elemanları gereklidir ve SSSC'ye oranla 2 kat daha büyük kapasitör ve tristör grupları gereklidir.
- TCSC'nin sayılabilecek tek önemli avantajı hatta direkt olarak bağlanmasıdır. SSSC ise DC kapasitör ve kublaj transformatörü gerektirir ki bunlarda maliyeti artırıcı etkenlerdir.

KAYNAKLAR

- Abdel.Edris A., Zelingher, Gyugyi L., J.Kovalsky L. (June 2002), IEEE Power Engineering Review,
- C. Schauder, and H. Mehta (July 1993). "Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators", IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 4, pp. 299 – 306,
- C. Schauder, M. Gernhardt, E. Stacey, T. Lemak, L. Gyugyi, T. W. Cease, and A. Edris (July 1995). "Development of a ± 100 MVAR Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, pp. 1486 – 1493,
- C. Schauder, M. Gernhardt, E. Stacey, T. Lemak, L. Gyugyi, T. W. Cease, and A. Edris (January 1997). "Operation of ± 100 MVAR TVA STATCOM", IEEE Winter Meeting, PE – 509-PWRD-0-01-1997,
- C. W. Edwards, K. E. Mattern, P. R. Nannery, and J. Gubernick (October 1988). "Advanced Static Var Generator Employing GTO Thyristors", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp. 1622 – 1627,
- C. W. Taylor(1993). "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill, Inc., New York, USA,
- Chapman,D.,Copper Development Association March 2001 (Version 0b November 2001) Power Quality Application Guide 1.1 Introduction
- Chapman,D.,Copper Development Association March 2001 (Version 0b November 2001) Power Quality Application Guide 2.1 The Cost of Poor Power Quality
- Chapman,D.,Copper Development Association March 2001 (Version 0b November 2001) Power Quality Application Guide 3.1 Harmonics-Causes & Effects
- Chapman,D.,Copper Development Association March 2001 (Version 0b November 2001) Power Quality Application Guide 5.1 Voltage Disturbances
- Committee on Static Compensation Engineering and Operating Division Canadian Electrical Association (CEA) "Static Compensators for Reactive Power Control", Canadian Electrical Association, 1984, Canada
- E. Larsen, N. Miller, S. Nilsson, and S. Lindgren (October 1992). "Benefits of GTO-based Compensation Systems for Electric Utility Applications", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7. No. 4, pp. 2056 – 2062,
- E. W. Kimbark (February 1986). "Improvement of System Stability by Switched Series Capacitors", IEEE Transactions on Power System Apparatus and Systems, Vol. PAS-85, No. 2, pp. 180 – 188,
- Gülgün.R.,(1999),Güç Elektroniği,Y.T.Ü.Basım-Yayın Merkezi,İstanbul.
- Günay, Ö. (2002),"Güç Kalitesi Problemleri ve Elektrik Makineleri Üzerindeki Etkileri" İstanbul.
- Gyugyi,L., C. D. Schauder, and K. K. Sen (January 1997). "Static Synchronously Series Compensator: A Solid-State Approach to the Series Compensation of Transmission Line", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 406 – 417.

- Gyugyi, L. (July 1992), "A Unified Power Flow Control Concept of Flexible AC Transmission Systems", IEE Proceedings – C, Vol. 139, No. 4, pp. 323 – 331,
- Gyugyi, L. (April 1994), "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 904 – 911,
- Gyugyi, L. (April 1988), "Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators", Proceedings of IEEE, Vol. 76, No. 4, pp. 483 – 494,
- Gyugyi, L., C. D. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson, and A. Edris (April 1995) "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp. 1085 – 1093,
- Hanson, D.J. (1998), "A Transmission SVC For NGC PLC Incorporating a ± 75 MVAR STATCOM, ALSTOM T&D Power Electronic Systems Limited", IEEE
- Haque, M.H. (2001), "Compensation Of Distribution System Voltage Sag By DVR and D-STATCOM", IEEE Porto ; Power Tech Conference 10th – 13th September, Portugal
- Iravani, M.R. (June 1986), "Thyristor-Controlled Phase Shifters for AC Transmission", IEEE PESC Record, 17th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference, pp. 291 – 300, Canada
- Kalyan K.Sen. (January 1998), IEEE Transactions on Delivery, vol. 13, No.1,
- Kalyan K.Sen. (October 1998), "UPFC-Theory, Modeling, and Applications" IEEE Transactions on Delivery, vol. 13, No.4,
- Lazlo Gyugyi, N. G. Hingorani, P. R. Nannery, and N. Tai (1990), "Advanced Static Var Compensator Using Gate Turn-Off Thyristors for Utility Applications", CIGRE, 23 – 203, August 26 – September 1, France.
- M. A. Boost, and P. D. Ziagos (1988). "State-of-the Art Carrier PWM Techniques: A Critical Evaluation", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 24, No. 2, pp. 482 – 491, March/April
- M. H. Rashid (1988) "Power Electronics: Circuit, Devices, and Applications", Prentice Hall, Inc.
- Mohaddes, M. ve Gole, A.M. (January 2001), "Steady State Frequency Response of STATCOM": IEEE Transactions on Power System Apparatus and Systems, Vol.16, No.1
- N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins (1995). "Power Electronics: Converters, Applications, and Design", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- P. K. Steimer, H. E. Gruning, J. Werninger, E. Carroll, S. Klaka, and S. Linder (1999). "IGCT – A New Emerging Technology for High Power, Low Cost Inverters", IEEE Industry Application Magazine, pp. 12 – 18, July/August.
- Paserba, J. (2002), "Secondary Voltage-Var Controls Applied to STATCOMs For Fast Voltage Control and Long Term Var Management", IEEE pp 753-761
- Poyraz Murat, (2002), "Güç Kalitesi Problemleri ve Güç Elektroniği Devre Elemanları Üzerindeki Etkisi", İstanbul,

R. H. Lasseter (June 1989). "Electromagnetic Transients Program (EMTP) Volume 3: Workbook III (TACS)", EL - 4651, Vol. 3, RP 2149 - 6, EPRI,

Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standards Department, New Jersey

Reed, G. ve Paserba J. ve Salavantis P. (2003), "The FACTS on Resolving Transmission Gridlock", IEEE Power & Energy Magazine September/October, pp 41 - 46

Reed, G. Ve Paserba, J. ve Croasdaile, T. (2000), "STATCOM Application at VELCO Essex Substation" IEEE, pp 1133-1138

Reed, G. (2000), "Application of a 5 MVA, 4.16kV D-STATCOM System For Voltage Flicker Compensation at Seattle Iron & Metals" IEEE, pp 1605-1610

Siemens Power Transmission & Distribution. Vermont Department of Public Service Statewide Energy Efficiency Plan, May 23, (1997)

T. J. Miller (1982), "Reactive Power Control in Electric Systems", John Wiley & Sons, USA

Uzunovic E. (2001), "EMTP, Transient Stability and, Power Flow Models and Controls of VSC Based FACTS Controllers", Thesis, Canada

Uzunovic, E., C. A. Canizares, and J. Reeve (October 1999) "EMTP Studies of UPFC Power Oscillation Damping", Proceedings of the North American Power Symposium (NAPS),

Wenhua, L. ve Xu, L. (2000), "Development of 20MVA STATCOM Employing GTO Inverters" IEEE, pp 2648 - 2653

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi / Yeri	20.04.1978	Amasya
Orta Okul	1989-1993	Tokat Anadolu Lisesi
Lise	1993-1996	Sivas Fen Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2001-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Elektrik Müh. Anabilim Dalı.Elektrik Müh.Programı

Çalıştığı Kurumlar

2000-2001	Panel Elektro San. ve Tic. A.Ş.
2001-Devam ediyor	TEDAŞ. Anadolu Yakası Elektrik Dağıtım İşletmesi Koordinatörlüğü / Özel Müşteriler Müdürlüğü Sanayi Fen Baş Mühendisi

