

67065

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STATİK VAR SİSTEMLERİ İLE
REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şule ÖZASLAN

Ana Bilim Dalı : ELEKTRİK

Programı : ELEKTRİK

HAZİRAN 1997

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STATİK VAR SİSTEMLERİ İLE REAKTİF GÜÇ
KOMPANZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Şule ÖZASLAN**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Haziran 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Temmuz 1997

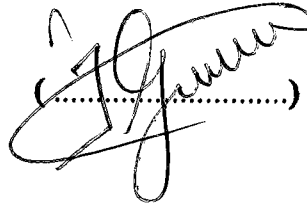
Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Şule KUŞDOĞAN

()

Üye

Prof. Dr. İrfan GÜNEY

()

Üye

Doç. Dr. Feriha ERFAN

()

HAZİRAN 1997

STATİK VAR SİSTEMLERİ İLE REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYONU

Şule ÖZASLAN

Anahtar Kelimeler : Reaktif Güç Kompanzasyonu, Güç Faktörü Düzeltimi, Statik Var Kompanzator, SVK, GSVK

Özet : Alternatif akım sistemlerinde; kayıpların en aza indirilmesi ve sistemin enerji kapasitesinin artırılması için reaktif gücün kontrolü gereklidir. Bir güç sisteminin reaktif güç dengesi; şebekedeki aktif kayıpları, elemanların ısınmasını ve bazı durumlarda güç sisteminin kararlılığını etkilemektedir. Bu çalışmada, reaktif güç kontrolünde kullanılan statik var kompanzatorların yapısı ve çalışması açıklanmaktadır. Kompanzatorlar ile güç üretimi ve tüketimindeki büyük ve hızlı reaktif güç değişimlerini kontrol etmek mümkündür. Gelişmiş statik var kompanzatorlar (GSVK) olarak bilinen, gerilim beslemeli evirici tabanlı statik var kompanzatorlar da incelenmektedir. Kompanzasyon süseptanslarını belirlemek için gerekli matematiksel eşitlikler çıkartılarak; dengesiz sistemde gerekli yük kompanzasyon süseptansları, Pascal dilinde yazılmış bir bilgisayar programı ile hesaplanmaktadır.

REACTIVE POWER COMPENSATION WITH STATIC VAR SYSTEMS

Şule ÖZASLAN

Keywords: Reactive Power Compensation, Power Factor Correction, Static Var Compensator, SVC, ASVC

Abstract: It is necessary to control reactive power for minimizing losses and increasing energy capacity of alternative current systems. The reactive power balance of a power system influences the active losses of the network, the heating of components and some cases, the power system stability. In this study, it is explained the operation and structure of static var compensators used in reactive power control. It is possible to control large and rapid variation in the reactive power in power consumption and generation with the compensators. Also voltage source inverter based static var compensators namely static var compensator (ASVC) used in reactive power control are investigated. Mathematical equations is obtained to determine compensation susceptances. Required load compensation susceptance in unbalanced systems is computed by a computer program written in Pascal.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Reaktif güç kompanzasyonu, alternatif akım enerji sistemlerinde önemli bir problemdir. Sistemlerde reaktif güç akışının neden olduğu olumsuz etkilerin yok edilmesi, elektrik enerjisinin kalitesi açısından bir zorunluluktur. Elektrik enerjisinin kalitesi ise verimliliğe ve enerji tasarrufuna bağlıdır. Bu kaliteyi elde etmek amacıyla, reaktif güç üretimi ve kontrolü için bir çok yöntem kullanılmaktadır. Hızlı değişen yüklerde reaktif güç kontrolü ve sistemin dengelenmesinde, tristör kontrollü statik var kompanzatörlerin kullanılması çok iyi sonuçlar vermektedir. Güç dönüştürücüleri ile gerçekleştirilen gelişmiş statik var kompanzatörler ise daha geniş çalışma aralığı ve kısa sürede cevap verme yeteneğine sahiptir. Ülkemizde bu yeni sistemlerin kullanılması pek çok yararlar sağlayacaktır.

Bu çalışmanın bütün aşamalarında görüşleriyle beni yönlendiren Sayın Hocam Yrd. Doç Dr. Şule KUŞDOĞAN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU.....	4
2.1. Kompanzasyonun Tanımı ve Özellikleri	4
2.2. İdeal Kompanzator	6
2.3. Kompanzasyon Tesislerinin Sınıflandırılması	7
2.4. Reaktif Güç Tüketicileri	8
2.5. Reaktif Güç İle Gerilimi Arasındaki İlişki	9
2.6. Kondansatörde Akım, Gerilim ve Güç İfadeleri	12
BÖLÜM 3. KOMPANZASYONUN SİSTEME GETİRDİĞİ YARARLAR	16
3.1. Gerilim Düşümünün Azalması	16
3.2. Sistem Kayıplarının Azalması	20
3.3. Tesisin Enerji Verme Kapasitesinin Artması	21
3.4. İletim Sistemlerinde Geçici Durumlarda Kararlılığın Artması	22
BÖLÜM 4. KOMPANZASYON PROBLEMİNİN MATEMATİKSEL OLARAK İNCELENMESİ	27
4.1. Giriş	27

4.2. Yük Kompanzasyonunun Temelleri	27
4.3. Simetrik Bileşenler Cinsinden Yük Kompanzasyonu.....	34
4.4. Kompanzasyon Süseptanslarının Hat Akımları Cinsinden İfadeleri	39
4.5. Enerji İletiminde Kompanzasyon	43
4.6. Örnek Kompanzasyon Hesabı	48
BÖLÜM 5. STATİK VAR KOMPANZATÖRLER	56
5.1. Giriş	56
5.2. Statik Var Kompanzatorlerin Temel Özellikleri	57
5.3. Statik Var Kompanzatorlerin Sınıflandırılması	58
5.3.1. Tristör kontrollü reaktör	58
5.3.2. Tristör anahtarlama kondansatör	63
5.3.3. Tristör anahtarlama kondansatör-tristör kontrollü reaktör	66
5.3.4. Sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktör	68
5.4. Gelişmiş Statik Var Kompanzatorler	73
5.4.1. GSVK'nın çalışma prensibi.....	73
5.4.2. GSVK'de GTO tristörün kullanılması.....	78
BÖLÜM 6. HARMONİKLERİN KOMPANZASYON TESİSLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ	79
6.1. Harmonik Elektriksel Büyüklükler.....	79
6.2. Harmoniklerin Üretilmesi.....	81
6.2.1. Transformatörlerde üretilen harmonikler.....	81
6.2.2. Tristörlü doğrultucularda üretilen harmonikler.....	83
6.2.3. Ark fırını kaynaklı harmonikler.....	84
6.3. Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri.....	85
6.4. Harmoniklerin Elektrik Tesisleri Üzerindeki Etkileri.....	86
6.5. Harmonik Rezonanslara Karşı Alınan Tedbirler.....	87
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	89

KAYNAKLAR 91

ÖZGEÇMİŞ 93



SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

- A_n, B_n : Fourier katsayıları
- B : Yük süseptansı ($1/\Omega$)
- B_{ab} : ab fazına ait yük süseptansı ($1/\Omega$)
- B_{bc} : bc fazına ait yük süseptansı ($1/\Omega$)
- B_{ca} : ca fazına ait yük süseptansı ($1/\Omega$)
- $B_{ca}^{(ab)}$: ab fazını kompanze etmek için, c-a arasına bağlanan süseptans ($1/\Omega$)
- $B_{ab}^{(c)}$: ab fazını kompanze etmek için gerekli süseptans ($1/\Omega$)
- $B_{bc}^{(ab)}$: ab fazını kompanze etmek için, b-c arasına bağlanan süseptans ($1/\Omega$)
- $B_{bc}^{(c)}$: bc fazını kompanze etmek için gerekli süseptans ($1/\Omega$)
- $B_{ab}^{(bc)}$: bc fazını kompanze etmek için, a-b arasına bağlanan süseptans ($1/\Omega$)
- $B_{ca}^{(bc)}$: bc fazını kompanze etmek için, c-a arasına bağlanan süseptans ($1/\Omega$)
- $B_{ca}^{(c)}$: ca fazını kompanze etmek için gerekli süseptans ($1/\Omega$)
- $B_{ab}^{(ca)}$: ca fazını kompanze etmek için, a-b arasına bağlanan süseptans ($1/\Omega$)
- $B_{bc}^{(ca)}$: ca fazını kompanze etmek için, b-c arasına bağlanan süseptans ($1/\Omega$)
- $B_{N,ab}^{(c)}$: Kompanzatörün ab fazına ait negatif bileşen süseptansı ($1/\Omega$)
- $B_{P,ab}^{(c)}$: Kompanzatörün ab fazına ait pozitif bileşen süseptansı ($1/\Omega$)
- $B_{N,bc}^{(c)}$: Kompanzatörün bc fazına ait negatif bileşen süseptansı ($1/\Omega$)
- $B_{P,bc}^{(c)}$: Kompanzatörün bc fazına ait pozitif bileşen süseptansı ($1/\Omega$)
- $B_{N,ca}^{(c)}$: Kompanzatörün ca fazına ait negatif bileşen süseptansı ($1/\Omega$)
- $B_{P,ca}^{(c)}$: Kompanzatörün ca fazına ait pozitif bileşen süseptansı ($1/\Omega$)
- C : Kondansatör kapasitesi (Farad)
- C_Δ : Üçgen bağlamadaki kondansatör kapasitesi (Farad)
- $\cos \phi$: Güç katsayısı

C_Y	: Yıldız bağlamadaki kondansatör kapasitesi (Farad)
E	: Kaynak gerilimi (V)
f	: Frekans (Hz)
G	: Yük kondüktansı ($1/\Omega$)
G_{ab}	: ab fazına ait yük kondüktansı ($1/\Omega$)
G_{bc}	: bc fazına ait yük kondüktansı ($1/\Omega$)
G_{ca}	: ca fazına ait yük kondüktansı ($1/\Omega$)
I	: Hat akımı (A)
I^*	: Hat akımının eşleniği (A)
I_a	: a fazına ait hat akımı (A)
$i_a(t)$: I_a faz akımının ani değeri (A)
I_{a0}	: I_a akımının sıfır bileşeni (A)
I_{a1}	: I_a akımının pozitif bileşeni (A)
I_{a2}	: I_a akımının negatif bileşeni (A)
I_{ae}	: I_a faz akımının etkin değeri (A)
I_0	: Motorun boş çalışma akımı (A)
I_b	: b fazına ait hat akımı (A)
I_c	: c fazına ait hat akımı (A)
I_C	: Kapasitif akım (A)
$I_L, I_L(\alpha)$: Endüktans akımı (A)
I_{LF}	: Endüktans akımının temel bileşeni (A)
I_{Ln}	: Endüktansın n. harmonik akımı (A)
I_{mI}	: Hat akımının sanal kısmı
I_n	: n. harmonik akımı (A)
I_p	: Aktif akım (A)
I_q	: Reaktif akım (A)
I_s	: Sistemin akımı (A)
L	: Yük endüktans değeri (H)
L_0	: Kompanzator endüktansı (H)
P	: Aktif güç (W)
P_L	: Yükün aktif gücü (W)
P_R	: R fazına ait aktif güç (W)

P_R^c	: Kompanzasyondan sonra R fazına ait aktif güç (W)
P_S	: S fazına ait aktif güç (W)
P_S^c	: Kompanzasyondan sonra S fazına ait aktif güç (W)
P_T	: T fazına ait aktif güç (W)
P_T^c	: Kompanzasyondan sonra T fazına ait aktif güç (W)
P_{Z1}	: Kompanzasyondan önceki kayıp güç (W)
P_{Z2}	: Kompanzasyondan sonraki kayıp güç (W)
Q	: Reaktif güç (VAR)
Q_C	: Kapasitif reaktif güç (VAR)
Q_I	: Endüktif reaktif güç (VAR)
Q_L	: Yükün reaktif gücü (VAR)
Q_R	: R fazına ait reaktif güç (VAR)
Q_R^c	: R fazına ait kompanzasyon için gerekli reaktif güç (VAR)
Q_S	: S fazına ait reaktif güç (VAR)
Q_S^c	: S fazına ait kompanzasyon için gerekli reaktif güç (VAR)
Q_T	: T fazına ait reaktif güç (VAR)
Q_T^c	: T fazına ait kompanzasyon için gerekli reaktif güç (VAR)
R	: Hattın direnci (Ω)
ReI	: Hat akımının reel kısmı
R_S	: Sistem direnci (Ω)
S	: Görünür güç (VA)
S_R	: R fazına ait görünür güç (VA)
S_R^c	: Kompanzasyondan sonra R fazına ait görünür güç (VA)
S_S	: S fazına ait görünür güç (VA)
S_S^c	: Kompanzasyondan sonra S fazına ait görünür güç (VA)
S_T	: T fazına ait görünür güç (VA)
S_T^c	: Kompanzasyondan sonra T fazına ait görünür güç (VA)
T	: Periyot
V	: Faz-nötr gerilimi (V)
V_0	: Gerilimin doğru bileşeni (V)
V_a	: a fazına ait gerilim (V)

$v_a(t)$: V_a faz geriliminin ani değeri (V)
V_{a1}	: Gerilimin pozitif bileşeni (V)
V_{a2}	: Gerilimin negatif bileşeni (V)
$V_{a1}^{(0)}$: Terminal gerilimin pozitif bileşeni (V)
$V_{a2}^{(0)}$: Terminal gerilimin negatif bileşeni (V)
V_b	: b fazına ait gerilim (V)
V_c	: c fazına ait gerilim (V)
V_C, V_{DC}	: Kondansatör gerilimi (V)
V_h	: Fazlar arası gerilim (V)
V_L	: Endüktans gerilimi (V)
V_{La}	: a fazına ait yük uçlarındaki gerilim (V)
V_{Lb}	: b fazına ait yük uçlarındaki gerilim (V)
V_{Lc}	: c fazına ait yük uçlarındaki gerilim (V)
V_m	: Gerilimin tepe değeri (V)
V_N	: Motorun nominal çalışma gerilimi (V)
V_{nm}	: n. harmonikli gerilimin tepe değeri (V)
V_s	: Sistem gerilimi (V)
V_x	: Evirici çıkış gerilimi (V)
VAR_C	: Kondansatörün sabit kapasitif reaktif gücü (VAR)
$VAR_ç$: Kompanzatorün çıkış reaktif gücü (VAR)
VAR_L	: Reaktörün değişken endüktif reaktif çıkış gücü (VAR)
X	: Hattın reaktansı (Ω)
X_C	: Kapasitif reaktans (Ω)
X_L	: Transformatorün reaktansı (Ω)
X_S	: Sistemin reaktansı (Ω)
Y	: Yük admitansı ($1/\Omega$)
Y_{ab}	: ab fazına ait yük admitansı ($1/\Omega$)
Y_{bc}	: bc fazına ait yük admitansı ($1/\Omega$)
Y_{ca}	: ca fazına ait yük admitansı ($1/\Omega$)
Z_a	: a fazının empedansı (Ω)
Z_b	: b fazının empedansı (Ω)
Z_c	: c fazının empedansı (Ω)

α	: Ateşleme açısı ($^{\circ}$)
ϕ	: Faz farkı ($^{\circ}$)
δ	: Generatörün iç gerilimi ile sonsuz bara gerilimi arasındaki güç açısı ($^{\circ}$)
ε	: Gerilim regülasyonu
ω	: Açısal hız
θ	: Kompanzatör tristörlerinin ateşleme açısı ($^{\circ}$)
ϕ_s	: Sistemin faz açısı ($^{\circ}$)

AA	: Alternatif akım
DA	: Doğru Akım
FFM	: Temel Frekans Modülasyonu
GSVK	: Gelişmiş Statik Var Kompanzatör
GTO	: Kapıdan Söndürmeli Tristör
MCT	: Mos Kontrollü Tristör
SHEM	: Seçimli Harmonik Yok Etme Modülasyonu
SK-TKR	: Sabit Kondansatör-Tristör Kontrollü Reaktör
SVK	: Statik Var Kompanzatör
TAK	: Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör
TAK-TKR	: Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör-Tristör Kontrollü Reaktör
TKR	: Tristör Kontrollü Reaktör

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Tek tek, merkezi ve grup kompanzasyon	8
Şekil 2.2.	Akım ve güç bileşenleri	10
Şekil 2.3.	Genel olarak aktif, reaktif güçler ve I_c kompanzasyon akımı	12
Şekil 2.4.	Bir fazlı kondansatörün bağlantı şekli ve fazör diyagramı	13
Şekil 2.5.	Üç fazlı AA şebekesinde kondansatörlerin üçgen ve yıldız bağlanması	14
Şekil 3.1.	Tek fazlı sistemin Thevenin eşdeğeri	16
Şekil 3.2.	Şekil 3.1'in fazör diyagramı (kompanze edilmemiş sistem).....	17
Şekil 3.3.	Kondansatörlü durumda fazör diyagramı	18
Şekil 3.4	a) İki makinalı güç sistemi b) Sistemin güç iletim karakteristiği	23
Şekil 3.5.	a) Senkron gerilim kaynağının hattın ortasına bağlanması b) Güç iletim karakteristiği	25
Şekil 4.1	a) Dengesiz üç fazlı yıldız bağlı yük b)Yükün üçgen bağlı eşdeğeri	27
Şekil 4.2.	Y_{ab} admitansının reaktif kısmının $-B_{ab}$ süseptansı ile kompanzasyonu ..	28
Şekil 4.3.	$B_{bc}^{(ab)}$ ve $B_{ca}^{(ab)}$ kapasitif ve endüktif kompanzasyon süseptansları ile reel G_{ab} yükünün dengelenmesi	29
Şekil 4.4	Yük adımı $I_{R,ab}$ ile kompanzasyon akımları $I_{L,ca}$, $I_{R,bc}$ ve hat akımları I_a , I_b , I_c arasındaki ilişkiyi gösteren fazör diyagramı	30
Şekil 4.5	Y_{bc} yükünün $-B_{bc}$, $B_{ca}^{(bc)}$ ve $B_{ab}^{(bc)}$ süseptansları ile kompanzasyonu ...	31
Şekil 4.6.	Y_{ca} yükünün $-B_{ca}$, $B_{ab}^{(ca)}$ ve $B_{bc}^{(ca)}$ süseptansları ile kompanzasyonu	31
Şekil 4.7.	Bir fazlı yük kompanzasyonu prensibinin üç fazlı dengesiz bir yüke uygulanması	32
Şekil 4.8.	Üçgen bağlı dengesiz yük ve kompanzatör	34
Şekil 4.9.	Kompanzatörün pozitif ve negatif bileşen üçgenlerine ayrılması	38
Şekil 4.10.	Şebeke terminaline bağlı kompanzatör	44

Şekil 4.11. Birbirinden bağımsız iki geri besleme çevrimi ile gerilim kompanzasyonuna ait şema	47
Şekil 5.1. İdeal kompanzator	57
Şekil 5.2. Tristör kontrollü reaktör ve dalga şekilleri	58
Şekil 5.3. 3., 5., 7. ve 9. harmoniklerin ateşleme açısına göre genliklerinin değişimi	61
Şekil 5.4. Reaktör gruplarının sıralı kontrolü ile harmoniklerin azaltılması	61
Şekil 5.5. 12 darbeli bağlantı ve ilişkin dalga şekilleri	62
Şekil 5.6. a) Tristör anahtarlama kondansatör b) Kondansatörün gerilim ve akım değişimleri	63
Şekil 5.8. Tristör anahtarlama kondansatör ile kompanzasyon	65
Şekil 5.9. Endüktif gücün, tristör anahtarlama kondansatör ile kompanzasyonu	65
Şekil 5.10. TAK-TKR'ün bağlantı şekli	66
Şekil 5.11. TAK-TKR'ün çıkış ve kayıp karakteristiği	68
Şekil 5.12. a) SK-TKR'ün temel bağlantı şekli b) Bu kompanzatora ait akım ve dalga şekilleri	69
Şekil 5.13. SK-TKR'ün basitleştirilmiş devresi	69
Şekil 5.14. $\phi_L = 45^\circ$ için güç faktörünün α ile değişimi	70
Şekil 5.15. SK-TKR'ün reaktif güç karakteristiği	71
Şekil 5.16. SK-TKR'ün çıkış reaktif gücü (birim değer) ve kayıpları arasındaki değişim	71
Şekil 5.17. GSVK'ün temel devresi	73
Şekil 5.18. a) Bir fazlı GSVK'ün devre şekli b) Geri modlu çalışma için fazör diyagramı c) İleri modlu çalışma için fazör diyagramı.....	74
Şekil 5.19. Tek fazlı GSVK devresinin iki konvertör ile gösterimi	75
Şekil 5.20. Üç fazlı GSVK devresi	76
Şekil 5.21. GSVK'ün blok diyagramı	77
Şekil 6.1. Kare dalga biçimli gerilimin 1., 3. ve 5. harmoniği	79
Şekil 6.2. Demir çekirdekli sargının mıknatıslama eğrisi ve mıknatıslama akımı	82

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 5.1. Harmonik akımların maksimum genliklerinin temel akıma göre yüzdeleri	60
Tablo 5.2. Çeşitli kompanzatörlerin özellikleri	72



1. GİRİŞ

Dünyamızın son yıllarda karşı karşıya kaldığı enerji krizi, araştırmacıları bir yandan yeni enerji kaynaklarına yöneltirken, diğer yandan da daha verimli sistemlerin tasarımı ve boşa giden elektrik enerjisinin geri kazanılması yönünde yapılan çalışmaların yoğunlaşmasına neden olmuştur.

Elektrik enerjisinin, santralden en küçük alıcıya kadar dağıtımında en az kayıpla iletimin yolları ve hesapları yapılmaktadır. Elektrik enerjisi genellikle tüketim merkezlerinden uzakta olan üretim yerlerinde elde edilmekte ve uzun iletim hatları aracılığı ile tüketilecek yere ulaştırılmaktadır. Elektrik enerjisine duyulan ihtiyacın her geçen gün biraz daha artması, enerji üretiminin gittikçe pahalılaşması sonucu, taşınan enerjinin kaliteli, ucuz ve gerçek iş gören aktif enerji olması zorunluluğu ön plana çıkmaktadır.

Alternatif gerilimin dalga şekli göz önüne alındığında, akımın bu eğriden ϕ açısı kadar ileride (kapasitif durum) veya geride (endüktif durum) olduğu görülür. Bu durum faz farkı ile açıklanır. Faz farkı alıcının ancak saf omik olduğu durumda sıfırdır. İşte bu fark, akımın aktif ve reaktif gibi iki bileşene ayrılmasına neden olmaktadır.

Aktif akımın oluşturduğu aktif güç, tüketici tarafından faydalı hale getirilir. Örneğin aktif güç, motorlarda mekanik güce, ısı tüketicilerinde aydınlatma gücüne dönüşür. Reaktif akımın meydana getirdiği reaktif güç ise faydalı güce çevrilemez. Reaktif güç, yalnız alternatif akıma bağlı bir özellik olup, elektrik tesislerine istenmeyen bir şekilde tesir eder; generatörleri, transformatörleri, hatları gereksiz yere işgal eder ve bunların üzerinde ilave ısı kayıplarına neden olur.

Aktif güç enerjisi normal sayaçlarla tespit edildiği halde, reaktif güç böyle bir sayaç ile kontrol edilemez, bunu kayıt etmek için ayrı bir reaktif güç sayacına ihtiyaç vardır.

Reaktif güç faydalı güce çevrilmez ise de bundan tamamen de vazgeçilemez. Çünkü elektrodinamik prensibine göre çalışan generatör, transformatör, bobin ve motor gibi bütün işletme araçlarının normal çalışmaları için gerekli olan magnetik alan, reaktif akım tarafından meydana getirilir. Bilindiği gibi, endüksiyon prensibine göre çalışan bütün makineler ve cihazlar, magnetik alanın meydana getirilmesi için bir mıknatıslama akımı çekerler. İşte bu mıknatıslama akımı reaktif akımdır. Bu nedenle faydalı aktif gücün yanında mutlaka reaktif güce de ihtiyaç vardır.

Bugün kullanılan motor transformatör ve reaktör gibi elemanlar endüktif karakterde; kondansatör, belli durumlarda hava hatları ve yeraltı kabloları da kapasitif karakterdedir. Bunların aktif ve reaktif akımın ortaya çıkışında doğrudan etkisi vardır. Şebekelerde meydana gelen güç genel olarak endüktif karakterdedir ve bunu kompanse etmek için kapasitif güç üreten cihazlardan yararlanır.

Reaktif güç akışı ve gerilimin dengelenmesi, elektrik şebekelerinde problem oluşturmaktadır. Reaktif güç akışının söz edilen istenmeyen etkilerini önlemek amacıyla, yükün ve şebekenin ihtiyacı olan reaktif gücün belli teknikler kullanılarak karşılanması reaktif güç kompanzasyonu olarak tanımlanır. İdeal bir alternatif akım şebekesi için reaktif güç kompanzasyonu gereklidir.

Kompanzasyon işlemi iki gruba ayrılabilir. Biri iletim sistemlerinde kullanılan gerilim kontrolü, diğeri ise alıcıların yakınında kurulan tesisler ile yapılan yük kompanzasyonudur. İkinci tip kompanzasyon yükün özelliği ile belirlenen akım ve gerilimin ölçümü ile yapılır. Enerji iletiminde kompanzasyon ise, iletim hatlarındaki gerilimin düzenlenmesi ve kararlılığın sağlanması amaçlarına yöneliktir.

Enerji üretimi için kullanılan senkron generatörlerde, aktif güç yanında, uyarma akımı değiştirilerek, yükün ihtiyacı olan reaktif güç temin edilebilmektedir. Şebekenin büyümesi ile yük sayısının artması ve generatörlerin yüklerden uzak noktalarda bulunması bu tip bir kontrolün ekonomik olmaması sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca senkron kompanzatörler gibi dinamik cihazların geçici hal cevapları, şebekenin kararlılığını etkilemektedir.

Büyük güçlü ark fırınları kullanan endüstri kuruluşları, fazlardan farklı aktif ve reaktif güçler çeken dengesiz yükler, güç faktörü anlık değişimler gösteren tüketiciler, besleme sisteminde dalgalanmalara yol açarlar. Gerilim dalgalanmalarını en aza indirmenin yolu, besleme sistemine değişken reaktif güç sağlayarak güç katsayısını sabit tutmaktır.

Ark fırınları gibi büyük ve ani değişen yüklerin kompanzasyonunda, sabit kondansatörler ve senkron kompanzatorler yeterli olmamaktadır. Tristörlerin kullanılması ile hareketli parçası bulunmayan statik var kompanzatorler (SVK) geliştirilmektedir. Bu cihazlar, tristör kontrollü reaktör ve sabit veya tristör anahtarlama kondansatör ile, GTO tristör kullanılarak yapılan güç dönüştürücüleridir.

Bir statik var kompanzatorü, kondansatör, reaktör ve statik anahtarlar gibi elemanların; hızlı sürekli ve denetlenebilir bir reaktif güç kompanzasyonu sağlamak amacıyla bir araya getirilmesinden oluşan bir sistemdir.

Tristör kontrollü reaktörlerde (TKR) ve güç dönüştürücüleri ile gerçekleştirilen statik var kompanzatorlerde harmoniklerin sisteme etkisi oldukça fazladır. Özellikle 3., 5. ve 7. harmoniklerin süzülmesi amacıyla filtre devreleri kullanılmaktadır.

2. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

2.1. Kompanzasyonun Tanımı ve Özellikleri

Reaktif güç kompanzasyonu, reaktif gücün kontrolü ile güç sistemlerinde kalitenin artırılması olarak tanımlanabilir. Burada “kalite” nin içine verimlilik, işletme kolaylığı, enerji tasarrufu, reaktif güç ihtiyacının optimal olarak sağlanması gibi özellikler girmektedir. Kompanzasyonun iyi bir yük karakteristiği sağlamak yanında, üç temel amacı vardır:

- Güç faktörünü düzeltme,
- Yük dengesini sağlama,
- Gerilim regülasyonunu artırma.

- **Güç faktörünü düzeltme:** Güç faktörünün düzeltilmesi, üretilecek olan reaktif gücün mümkün olduğu kadar yükün gerektirdiği güce eşit yapılması ya da diğer bir deyişle $\cos \phi$ 'nin 1'e yaklaştırılmasıdır. Güç faktörünü düzeltme nedenlerinin ilki, elektrik şebekesinin nominal değerinin %5 ve -%10 değerleri arasında sistem geriliminin düzenli olmasını sağlamasıdır. İkincisi ise; güç faktörünün 1'e yaklaşımı akımın en küçük değerinin çekilmesi sonucunu oluşturur ki, AA sistemler içindeki elemanlarda oluşan I^2R kayıplarını azaltır (Mohan et al 1995). Düşük güç faktörü üretici açısından, iletim ve dağıtımda verimin düşmesi, tüketici açısından ise gerilim düşümünün artması, kurulu bir tesisin kapasitesinin düşmesi gibi olumsuz etkilere neden olur.

- **Yük dengesini sağlama:** Üç fazlı AC güç sistemleri dengeli çalışma koşulları için tasarlanır ve dengeli yüklenebileceği varsayılır. Ancak pratikte, dengeli yükleme tam anlamıyla gerçekleşmez. Dengesiz çalışma, akımın doğru bileşeninin yanında negatif ve sıfır bileşenlerinin de ortaya çıkmasına neden olur. Negatif bileşenler istenmeyen

etkiler doğurur. Generatör ve motorlarda kayıpları, transformatörlerde doyma ve doğrultucularda dalgalanmaları oluştururlar. Aynı zamanda bu bileşenler, senkron generatörün çalışması sırasında rezonans salınımlara neden olan bir moment indüklerler. Bu nedenle azaltılmaları gerekmektedir (Wu et al 1994).

- **Gerilim regülasyonunu arttırma:** Gerilim regülasyonu; reaktif güç ihtiyacının değişmesi ile önem kazanmakta ve zaman zaman kritik duruma gelmektedir. Yüklerin reaktif güç istekleri, değişim gösterebilir. Ancak her durumda bu değişiklikler gerilim farklılıklarına neden olur. Sabit gerilimle çalışacak şekilde tasarlanan yükler bu yüzden verimsiz çalışacak ve istenmeyen durumlarla karşılaşılacaktır. Bunu önlemek için gerilim barasında, gerilimin ancak belirli sınırlar içinde değişmesine izin verilir. Kompanzasyon yapıldığında gerilim değişimleri bu sınırlar içinde kalmalıdır.

Günümüzde reaktif güç kompanzasyonu, statik sistemler ve dinamik sistemler ile yapılmaktadır. Statik sistemler, kondansatör ve reaktör (reaktans bobini) ya da bunların uygun kombinasyonları ile oluşmuş düzeneklerdir. Özellikle kondansatörler güç faktörünü düzeltmede birkaç kVA'den birkaç yüz MVA 'e kadar geniş bir ölçekte kurulabilirler. Reaktans bobinleri ise, şebekede üretilen aşırı reaktif gücü üzerine alır ve dengelemeyi sağlar.

Dinamik sistemler ise, senkron makina gibi döner düzenlerden oluşur. Senkron makineler, uyarma akımının değerine göre reaktif güç alma ve verme özelliğine sahiptir. Aşırı uyarma durumunda reaktif güç üretirler, düşük uyarımda ise reaktif güç çekerler. Ancak senkron makineler bu halde aktif güç alışverişi yapmazlar. Endüstride, asenkron motor yerine kullanılacak senkron motor, güç faktörünün düzeltilmesinde ve gerilim regülasyonu iyileştirilmesinde iyi sonuç verir.

Bir kompanzasyon sisteminin kurulması sırasında göz önüne alınacak önemli noktalar şöyle sıralabilir:

- Maksimum reaktif güç gereksinimi,
- Tesisin aşırı yüklenme sınırı ve süresi,

- Aşılması gereken gerilim sınırları,
- Frekans ve değişimi,
- Gerilim regülasyonu,
- Kompanzatorün cevap süresi,
- Maksimum harmonik bozulmaları,
- Dengesiz gerilim ve yükte çalışma verimi,
- Koruma donanımı ve koordinasyonu,
- İşletmenin ileriye dönük genişleme olanakları,
- Güvenilirlik ve bakım,
- Çevresel faktörler, gürültü seviyesi, sıcaklık, nem, soğutma sistemi, kirlenme.

2.2. İdeal Kompanzator

İdeal kompanzator, yük ile paralel bağlanabilen, güç faktörünü 1'e yaklaştırabilen, gerilimi kontrol eden, yük akımlarını ya da faz gerilimlerini dengeleyen bir sistemdir. İdeal bir kompanzator, yük akımları ya da kaynak geriliminden doğacak harmonik bozulmalarını yok etmesi beklenmez. Bu görev uygun harmonik filtreler ile temin edilir, fakat ideal kompanzator de ek harmonikler üretmemelidir.

İdeal bir kompanzator, yükün durumuna göre gereken reaktif gücü gecikmesiz ve tam olarak kontrol edip değiştirerek sisteme verebilmeli, bağlı olduğu noktada sabit bir gerilim sağlayabilmeli ve üç fazda bağımsız kontrol yapabilmelidir.

Gerçekte gerilim kontrolü ve güç kompanzasyonu birbirine bağlı olan kontrol işlemleridir. Bilindiği gibi akımın reaktif bileşeni, yükün reaktif gücüne karşı düşer. Reaktif güçlere ilişkin bu reaktif akımların reaktanslar üzerindeki gerilim düşümleri, boyuna gerilim düşümlerini oluştururlar. Boyuna gerilim düşümleri ise gerilim değişmelerine yol açarlar. Reaktanslarda enine gerilim düşümlerini meydana getiren, yükün aktif gücüne karşı düşen, aktif akımların neden olduğu gerilim değişmeleri ihmal edilecek kadar küçüktür. İşte bu nedenlerle, gerilim kontrolü, reaktif gücün kompanse edilmesi ve reaktif gücün kompanse edilmesi ise güç faktörü kontrolü

sonucunu doğurduğundan, gerilim kontrolü ve güç faktörü kontrolü birbirinden ayrılmaz iki kontrol işlemidir (Miller 1982).

2.3. Kompanzasyon Tesislerinin Sınıflandırılması

Tesise bağlı alıcıların durumuna göre, kompanzasyonu gerçekleştirecek olan kondansatörler, temelde üç şekilde düzenlenirler. Bunlar; tek tek kompanzasyon, grup kompanzasyon ve merkezi kompanzasyondur.

Tek tek kompanzasyonda, devamlı olarak işletmede bulunan oldukça büyük güçte tüketicilerin reaktif güç ihtiyacını temin etmek için kondansatörler tüketicinin uçlarına doğrudan doğruya paralel bağlanırlar ve ortak bir anahtar üzerinden tüketici ile birlikte işletmeye sokulup çıkarılırlar. Kondansatörler her alıcı ile beraber devreye girip çıktığından ayrı bir donanıma (sigorta, anahtar, deşarj direnci) gerek yoktur. Bu kompanzasyon aynı zamanda en güvenilir olanıdır. Çünkü bir kondansatörün bozulması halinde meydana gelen arıza, arızalı bölümü devre dışı bırakır. Tek tek kompanzasyonun bir çok üstünlükleri yanında sakıncaları da vardır. Bu kompanzasyon tipi pahalıdır, ayara elverişli değildir. Ancak sabit güç ile çalışan tüketiciler için uygun ve ekonomik olabilir. Tek tek kompanzasyonda alıcı bir motor ise, gerekli kondansatör gücü;

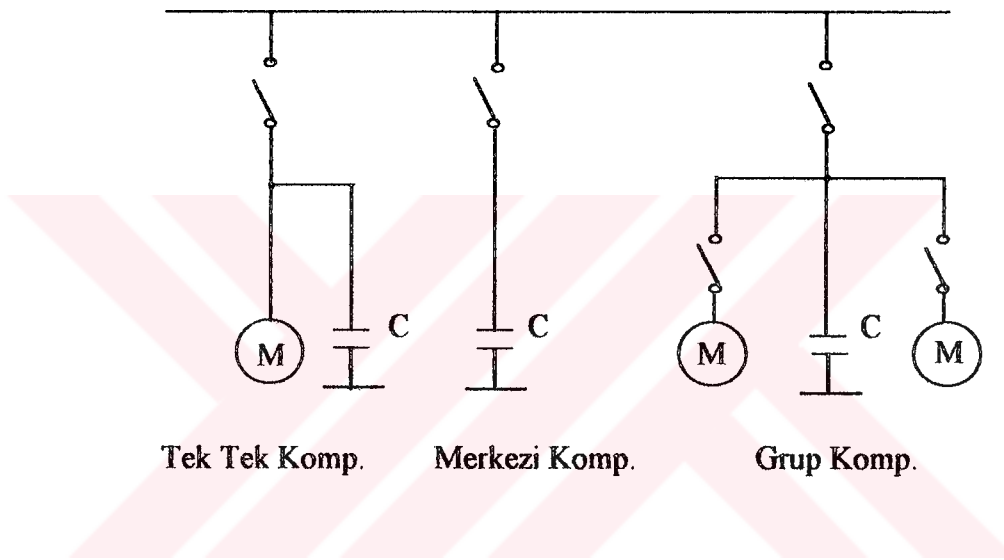
$$Q_C = 0.9.I_0.V_N.10^{-3} \quad (2.1)$$

bağıntısı ile hesaplanır. I_0 motorun boş çalışma akımı, V_N ise nominal çalışma gerilimidir.

Grup kompanzasyonu ise beraber devreye girip çıkan bir çok yük için uygun bir tekniktir. Tek tek kompanzasyonda olduğu gibi kondansatörler için ek sigorta ve deşarj direncine gerek yoktur. Beraber ve aynı kontaktör veya şalter üzerinden devreye girip çıkan motor, lamba ve transformatörler ortak kompanze edilebilirler. Böylece her tüketicinin ayrı ayrı kondansatörler ile donatılacağı yerde bunların ortak

bir kompanzasyon tesisi tarafından beslenmesi daha pratik ve ekonomik sonuçlar verir.

Merkezi kompanzasyon, bir noktaya bağlı çok sayıda alıcının ve zamanla değişen reaktif güç isteğinin olduğu durumlarda kullanılır. Sistem iyi bir $\cos\phi$ değerini elde etmeye çalışır. Kondansatörlerin küçük kademelerle devreye girip çıkması sınımları azaltır. Grup ve merkezi kompanzasyon özellikle, fabrika tesisleri için maliyet ve proje bakımından uygundur. Şekil 2.1. 'de bu üç tip bağlama şekli görülmektedir.



Şekil 2.1. Tek tek, merkezi ve grup kompanzasyon (Gümeli 1990)

2.4. Reaktif Güç Tüketicileri

Reaktif güç sarfiyatı bakımından tüketicileri iki ana gruba ayırmak mümkündür. Birincisi safi ısı enerji üreten tüketiciler ile akkor flamanlı lambalar, elektroliz ve galvanoplasti tesisleridir. Bunlar sadece aktif güç tüketirler. İkinci grup ise manyetik ve statik alan ile çalışan bütün işletme araçlarıdır. Sanayi motorları, balastlı lambalar ve bazı cihazlar, elektrik enerjisini istenilen (mekanik,ısı) enerji şekline dönüştürürlerken, yapıları gereği elektrik şebekesinden aktif güç ile beraber reaktif güç de çekerler (Buzlupınar 1982).

Endüstride, kompanzasyonu gerektiren en önemli yükler şunlardır:

- Düşük uyarmalı senkron makineler,
- Transformatörler,
- Bobinler,
- Havai hatlar,
- Doğrultucular,
- Endüksiyon fırınları,
- Elektrik ark ocakları,
- Kaynak makineleri,
- Lamba balastları,
- Haddehaneler,
- Haddehanelerin elektrik tesisatı,
- Asenkron motorlar.

Bu yükler işletmede doğrusal olmayan özellik gösterirler ve bundan dolayı harmonik üretirler, darbeleri çalışırlar. Bu tip yüklerde reaktif güçteki değişme çok hızlı bir kaç periyot ve reaktif güç ihtiyacı da büyük değerler arasında değişir. Bu durumda kullanılan kompanzator çok kısa zamanda gerekli reaktif gücü verebilmelidir.

2.5. Reaktif Güç ile Gerilim Arasındaki İlişki

Bir tüketicinin şebekeden çektiği görünür güç (S) ;

$$S = \sqrt{3} V_h I \quad (2.2)$$

formülü ile bulunabilir. Aktif güç (P) ve aktif akım (I_p), gerilim ile aynı fazda oldukları halde, S görünür gücü ve I hat akımı, V_h hat geriliminden ϕ açısı kadar geride kalır. Buna göre, akım, gerilim ve güçler arasındaki bağıntılar aşağıdaki gibi yazılabilirler:

$$I_p = I \cdot \cos \phi \quad (2.3)$$

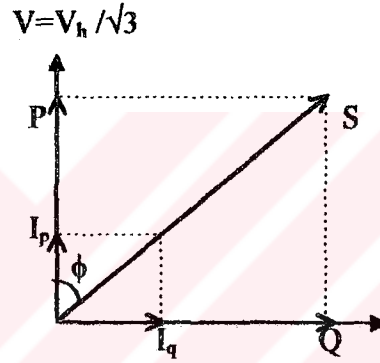
$$P = S \cdot \cos \phi \quad (2.4)$$

$$I_q = I \cdot \sin \phi \quad (2.5)$$

$$Q = S \cdot \sin \phi = \sqrt{3} V_h \cdot I \cdot \sin \phi \quad (2.6)$$

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (2.7)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.8)$$



Şekil 2.2. Akım ve güç bileşenleri

Şekil 2.2’de akım ve güç fazörlerinin birbirine göre durumları gösterilmektedir. Burada reaktif akım ve gücün saf endüktif karakterde olduğu kabul edilmiş ve gerilime göre 90° geri fazda çizilmiştir. Faz gerilimi doğrultusundaki I_p akımı ile I hat akımı arasındaki ϕ açısına “faz açısı” ve bunun kosinüsüne “güç katsayısı” denir.

Üç fazlı bir yükün sürekli sinüsoidal çalışmada tek faz için; şebekeden aldığı aktif, reaktif ve görünür güçler arasındaki bağıntılar aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$S = V \cdot I^* = V [V^* (G - jB)^*] = V^2 G + jV^2 B \quad (2.9)$$

$$S = P + jQ \quad (2.10)$$

$$I = V(G - JB) = VG - JVB \quad (2.11)$$

Burada S ; görünür gücü (volt-amper, VA), G ; yük kondüktansını ($1/\Omega$), B ; yük süseptansını ($1/\Omega$), V ; faz gerilimini (V), I ; hat akımını (A) ve I^* ise akımın eşleniğini ifade eder.

Dengesiz üç fazlı yük için ise, fazlar R, S, T olmak üzere:

$$S_R = P_R + JQ_R = V^2 G_R + JV^2 B_R \quad (2.12a)$$

$$S_S = P_S + JQ_S = V^2 G_S + JV^2 B_S \quad (2.12b)$$

$$S_T = P_T + JQ_T = V^2 G_T + JV^2 B_T \quad (2.12c)$$

yazılabilir.

Güç faktörü, kompanzasyon kontrol sisteminin çalışma ilkesi yükün dengesiz olan Q_R , Q_S , Q_T reaktif bileşenlerini tamamen yok ederek güç faktörünü 1'e çıkartmak şeklinde tanımlandığına ve kompanzasyon sistemi kayıpsız olduğuna göre, yukarıda kullanılan bağıntılar yardımı ile gerekli Q_R^c, Q_S^c, Q_T^c kompanzasyon reaktif güçleri için;

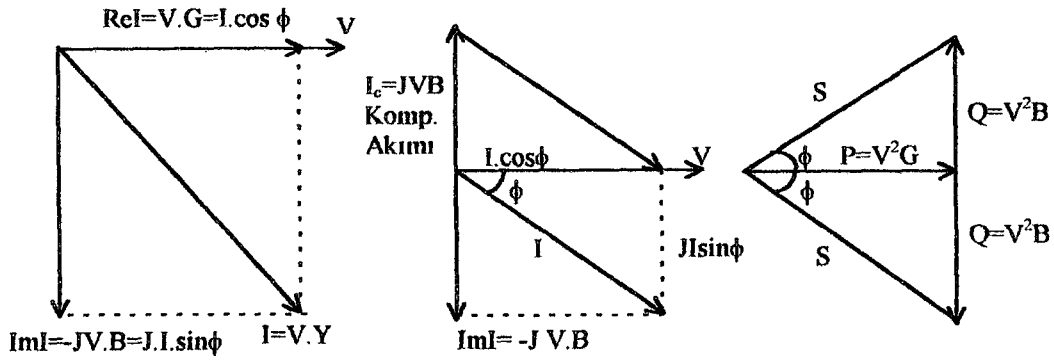
$$S_R^c = P_R^c + JQ_R^c, \quad P_R^c = 0, \quad J(Q_R + Q_R^c) = 0, \quad Q_R^c = -JV^2 B_R \quad (2.13a)$$

$$S_S^c = P_S^c + JQ_S^c, \quad P_S^c = 0, \quad J(Q_S + Q_S^c) = 0, \quad Q_S^c = -JV^2 B_S \quad (2.13b)$$

$$S_T^c = P_T^c + JQ_T^c, \quad P_T^c = 0, \quad J(Q_T + Q_T^c) = 0, \quad Q_T^c = -JV^2 B_T \quad (2.13c)$$

bağıntıları elde edilir.

Şekil 2.3'te aktif ve reaktif güçler, yük akımları ve kompanzasyon akımları görülmektedir.



Şekil 2.3. Genel olarak aktif, reaktif güçler ve I_c kompanzasyon akımı

Gerilim değişimleri ile reaktif güç arasındaki ilişki Bölüm 3.1’de açıklanacaktır.

2.6. Kondansatörde Akım, Gerilim ve Güç İfadeleri

Kondansatörler alternatif akım şebekesinde bir reaktans gibi tesir ederler. Kapasitif reaktans;

$$X_C = \frac{1}{\omega.C} \quad (2.14)$$

olup, C; kondansatörün kapasitesi (Farad) ve

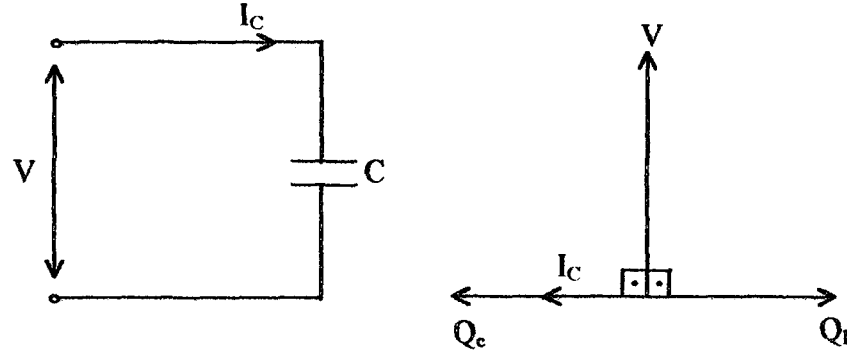
$$\omega = 2 \pi f \quad (2.15)$$

açısal hızdır. $f=50$ Hz olan şebekelerde $\omega=314$ 1/s alınır. Ohm kanuna göre V gerilimine bağlanan bir kondansatörün çektiği I_C kapasitif akım,

$$I_C = \frac{V}{X_C} = V.\omega.C \quad (2.16)$$

formülü ile bulunur. Bu akım, V gerilimine göre 90° öndedir. O halde şebekeye bağlı bir kondansatörün, şebekeden kapasitif bir akım çekmesi, şebekeye endüktif bir akım

vermesine eşdeğerdir. Kondansatörün bu özelliği onun statik kompanzasyon elemanı olarak kullanılmasına neden olan yanıdır.



Şekil 2.4. Bir fazlı kondansatörün bağlantı şekli ve fazör diyagramı

Kondansatörün gücü için;

$$Q_c = V \cdot I_c \cdot 10^{-3} \quad (2.17)$$

veya denklem (2.16) kullanılarak;

$$Q_c = V^2 \cdot \omega \cdot C \cdot 10^{-3} = \frac{I_c^2}{\omega \cdot C} \cdot 10^{-3} \quad (2.18)$$

elde edilir. Biliniyor ki Q_c kapasitif reaktif güç, endüktif reaktif güce göre 180° ileridedir, yani her iki reaktif güç aynı doğrultuda fakat ters yöndedir. Böylece kapasitif gücün, endüktif gücü yok ederek kompanzasyonu gerçekleştirdiği kolayca anlaşılır.

Üç fazlı alternatif akım tesislerinde kondansatörler şebekeye veya tüketici uçlarına üçgen veya yıldız olarak bağlanabilirler. Üçgen bağlamada her iki hat arasındaki kondansatörün kapasitesi C_Δ ve yıldız bağlamada ise C_Y ile gösterilir ise, üçgen bağlama için;

$$Q_c = 3.V_h^2.\omega.C_\Delta.10^{-3} \quad (2.19)$$

$$Q_c = \sqrt{3}.V_h.I_C.10^{-3} \quad (2.20)$$

$$Q_c = \frac{I_C^2}{\omega.C_\Delta}.10^{-3} \quad (2.21)$$

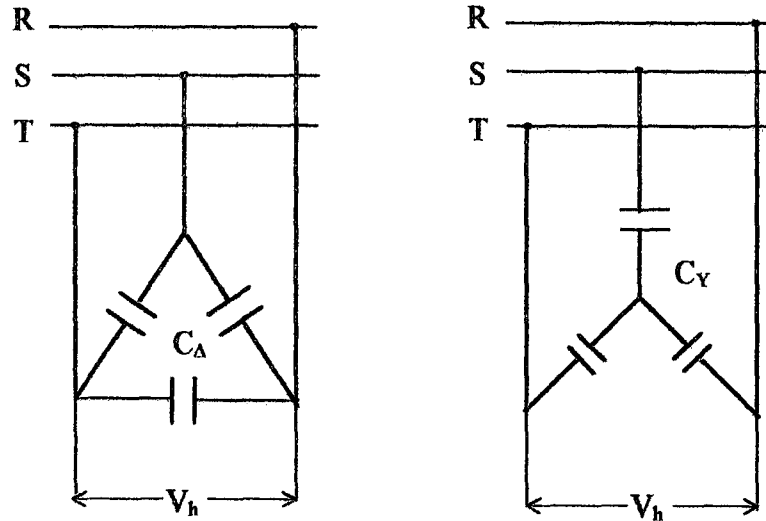
denklemleri yazılabilir. Yıldız bağlama için ise;

$$Q_c = V_h^2.\omega.C_Y.10^{-3} \quad (2.22)$$

$$Q_c = \sqrt{3}.V_h.I_C.10^{-3} \quad (2.23)$$

$$Q_c = 3 \frac{I_C^2}{\omega.C_Y}.10^{-3} \quad (2.24)$$

bağıntıları yazılabilir. Burada V_h ; iki hat arası gerilimi, I_C ; kapasitif hat akımını gösterir. Şekil 2.5'de üçgen ve yıldız bağlamalar görülmektedir.



Şekil 2.5. Üç fazlı AA şebekesinde kondansatörlerin üçgen ve yıldız bağlanması

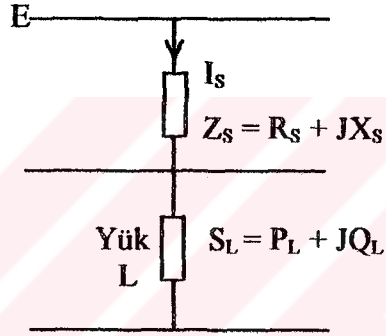
Her iki sistemde Q_c gücünün eşit olduğu kabul edilirse $C_Y = 3C_\Delta$ eşitliği bulunur. Buradan, yıldız bağlamada her bir faza bağlanan kondansatör kapasitesinin, üçgen bağlamadaki kondansatör kapasitesinin üç katına eşit olduğu anlaşılır. Bundan dolayı bir çok yerde üçgen bağlama tercih edilir.



3. KOMPANZASYONUN SİSTEME GETİRDİĞİ YARARLAR

3.1 Gerilim Düşümünün Azalması

Güç sisteminin tek fazlı Thevenin eşdeğeri ve buna bağlı bir yük Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Tek fazlı sistemin Thevenin eşdeğeri

Şekil 3.1'de ;

R_s, X_s : Sistemin direnci ve reaktansı,

P_L, Q_L : Yükün aktif ve reaktif gücü,

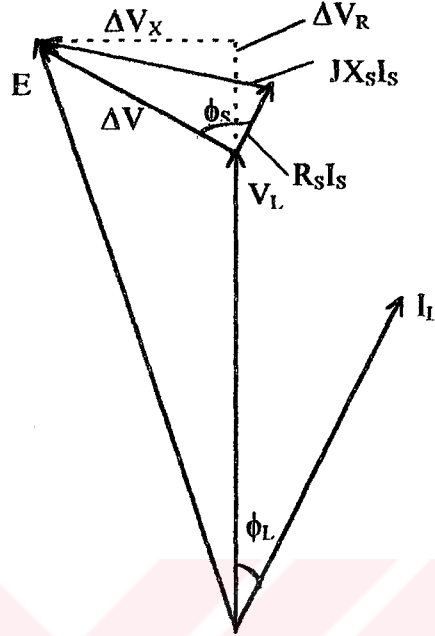
E : Kaynak gerilimi,

V_L : Yük gerilimidir.

Buna göre gerilim regülasyonu,

$$\epsilon = \frac{|E| - |V_L|}{|V_L|} \quad (3.1)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Bu sisteme ait fazör diyagramı Şekil 3.2'de verilmektedir.



Şekil 3.2. Şekil 3.1'in fazör diyagramı (kompanze edilmemiş sistem) Miller 1982

Kompanzatorün olmadığı durumda yük akımı,

$$I_L = \frac{P_L - jQ_L}{V_L} \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir. Fazör büyüklüklerle,

$$\Delta V = E - V_L = Z_s \cdot I_L \quad (3.3)$$

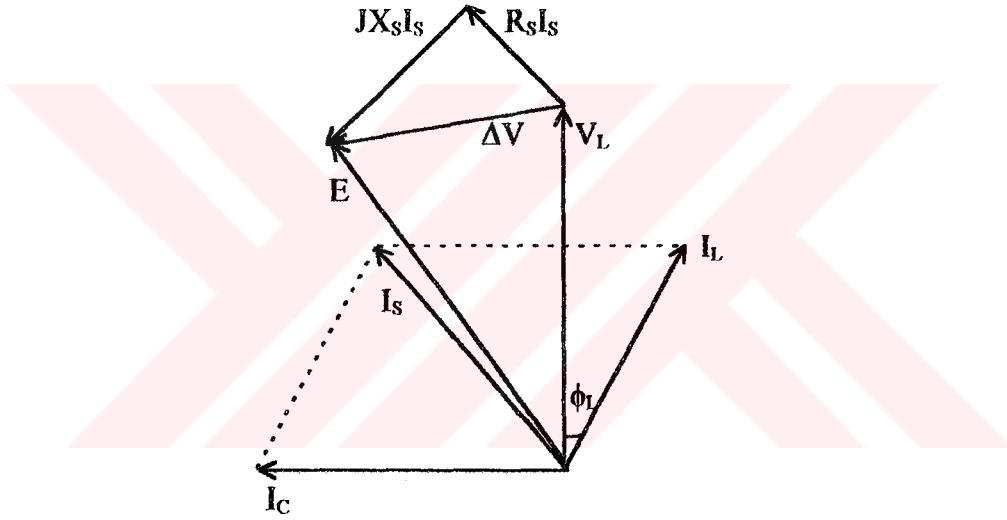
$$\Delta V = (R_s + jX_s) \left[\frac{P_L - jQ_L}{V_L} \right] \quad (3.4)$$

$$\Delta V = \frac{R_s P_L + X_s Q_L}{V_L} + j \left(\frac{X_s P_L - R_s Q_L}{V_L} \right) \quad (3.5)$$

$$\Delta V = \Delta V_R + J\Delta V_X \quad (3.6)$$

V_L geriliminin, E kaynak gerilimine göre genliği ve fazı, yük akımının genliği ve fazı ile ilgilidir. Diğer bir deyişle, gerilim değişimi yükün aktif ve reaktif gücü ile değişmektedir.

Yüke paralel bir kondansatör bağlayarak $|E| = |V_L|$ yapılabilir. Bunun anlamı, gerilim regülasyonu ϵ' 'nin sıfır olması, yani yüklü durumda kaynak geriliminin E değerinde sabit tutulmasıdır. Bu durum Şekil 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3.3. Kondansatörlü durumda fazör diyagramı (Miller 1982)

Kondansatörün akımı I_C olmak üzere sistemin akımı,

$$\vec{I}_s = \vec{I}_L + \vec{I}_C \quad (3.7)$$

bağıntısına eşittir. Kondansatörlü durumda reaktif güç, yükün ve kondansatörün reaktif güçleri olacaktır. Bu durumda,

$$Q_S = Q_C + Q_L \quad (3.8)$$

eşitliği yazılabilir. (3.3) ve (3.5) eşitlikleri kullanılarak,

$$|E|^2 = \left[V_L + \frac{R_S P_L + X_S Q_S}{V_L} \right]^2 + \left[\frac{X_S P_L - R_S Q_S}{V_L} \right]^2 \quad (3.9)$$

elde edilir.

Gerekli Q_C değeri, (3.9) denkleminde $|E| = |V_L|$ yapılarak Q_S için çözülmesi ile bulunabilir. (3.8)'den,

$$Q_C = Q_S - Q_L \quad (3.10)$$

yazılabilir. (3.9) denklemini uygun şekilde düzenlenerek $aQ_S^2 + bQ_S + c = 0$ biçimine getirilir. Buradaki a,b,c katsayıları,

$$a = R_S^2 + X_S^2 \quad (3.11a)$$

$$b = 2X_S V_L^2 \quad (3.11b)$$

$$c = P_L^2 X_S^2 - E^2 V_L^2 + (V_L^2 + R_S P_L)^2 \quad (3.11c)$$

biçimindedir. Buradan,

$$Q_S = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.12)$$

kullanılarak (3.10) ile birlikte Q_C hesaplanır. Burada önemli bir nokta da, yükün P_L aktif gücü ne değerde olursa olsun, Q_S için her zaman bir çözüm olduğudur. Saf bir reaktif kompanzator, yükün aktif ve reaktif gücünün değişmesi ile ortaya çıkan

oynamalarını yok edebilir. Bunun dışında eğer kompanzator sadece güç faktörünü düzeltecek şekilde tasarlanırsa, ($Q_s=0$) (3.5) denkleminde Q_L yerine $Q_s=Q_L+Q_c$ yazılır. Buradan,

$$\Delta V = \frac{R_s P_L + J X_s P_L}{V_L} \quad (3.13)$$

elde edilir. (3.13) denklemini Q_L 'den bağımsızdır. Daha açık bir ifade ile, saf reaktif bir kompanzator, gerilim ayarını (sabit tutulması) ve güç faktörünün 1 yapılmasını aynı anda sağlayamaz (Miller 1982).

Güç sistemlerinde gerilim kontrolü, generatörler ve transformatörlerin gerilim kademeleri ile yapılır. Bunlar yeterli değil ise kompanzasyona gidilmelidir.

3.2. Sistem Kayıplarının Azalması

Endüstriyel tesislerde I^2R şeklindeki enerji kayıpları, toplam tüketilen enerjinin %2.5-7.5 arasında bir değerdedir. Kayıplar akımın karesine, akım da güç faktöründeki düzeltmeye doğrudan bağımlı olduğundan, kayıplar güç faktörünün karesinin tersi ile orantılıdır.

Kompanzasyondan önceki ve sonraki durumlar sırasıyla 1 ve 2 indisi ile gösterilirse, kayıp güçler;

$$P_{Z1} = R I_1^2 = R \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \phi_1} \quad (3.14)$$

$$P_{Z2} = R I_2^2 = R \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \phi_2} \quad (3.15)$$

olarak ifade edilir. Burada R hattın direnci, P sistemin aktif gücü ve V şebeke gerilimidir. Bu iki kayıp gücün farkı,

$$\Delta P_Z = \frac{R.P^2}{V^2} \left[\frac{1}{\cos\phi_1^2} - \frac{1}{\cos\phi_2^2} \right] \quad (3.16)$$

olarak yazılabilir. (3.16) denklemini kompanzasyondan önceki kayıp güce oranlanırsa,

$$\frac{\Delta P_Z}{\Delta P_{Z1}} = 1 - \frac{\cos\phi_1^2}{\cos\phi_2^2} \quad (3.17)$$

olarak bulunur. Bu formülden de kayıpların, güç faktörünün karesi oranında azaldığı görülmektedir.

Eğer güç faktörü düzeltilerek sistem kapasitesine bir artış getirilecek ise; P aktif gücün büyümesiyle orantılı, yüzde olarak kayıplar azalacaktır.

3.3. Tesisin Enerji Verme Kapasitesinin Artması

Güç kompanzasyonu yapıldığında, reaktif akım kurulan kompanzator aracılığı ile karşılanacağı için, şebekeden daha düşük değerlerde akım çekilecektir. Bunun sonucu olarak transformatörler ve hatlar daha az yüklenecektir. Buna bağlı olarak aşırı yüklenmeler önlenmiş veya böyle bir durum yoksa tesisin yüklenme kapasitesi artmış olacaktır.

Şebekeye bağlı tesisin aktif gücü sabit ise, kompanzasyondan önceki görünür gücü,

$$S_1 = \frac{P}{\cos\phi_1} \quad (3.18)$$

ve sonraki görünür gücü,

$$S_2 = \frac{P}{\cos\phi_2} \quad (3.19)$$

olarak yazılır. Bu iki güç arasındaki fark,

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (3.20)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Bu farkın S_1 gücüne oranı ise,

$$\frac{\Delta S}{S_1} = 1 - \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \quad (3.21)$$

şeklindedir. Sistemin kapasitesindeki artış güç faktörü ile orantılı olmaktadır.

3.4. İletim Sistemlerinde Geçici Durumlarda Kararlılığın Artması

Güç sistemlerinde kararlılık, bir bozucu etkiye maruz kalan sistemin bozucu etki sonrası tekrar eski çalışma şartlarına dönme yeteneği anlamındadır. Geçici durumlarda kararlılık, iki makinalı sistem üzerinde incelenebilir.

Şekil 3.4'de iki makinalı bir güç sistemi görülmektedir. Şekil 3.4'de görülen v_S ; hattın verici ucundaki gerilim, v_R hattın alıcı ucundaki gerilim olarak ifade edilir ve;

$$v_S = V \sin \omega t \quad (3.22)$$

$$v_R = V \sin (\omega t - \delta) \quad (3.23)$$

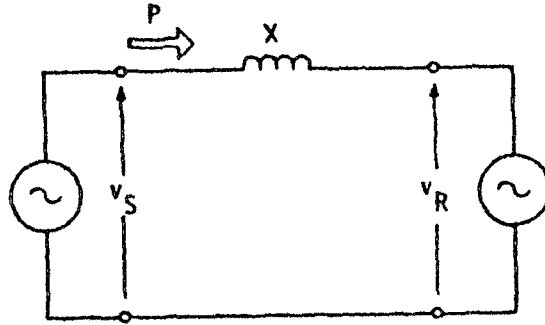
bağıntılarına eşittir. Hattın direnci ihmal edildiğinde iletilen aktif güç,

$$P = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (3.24)$$

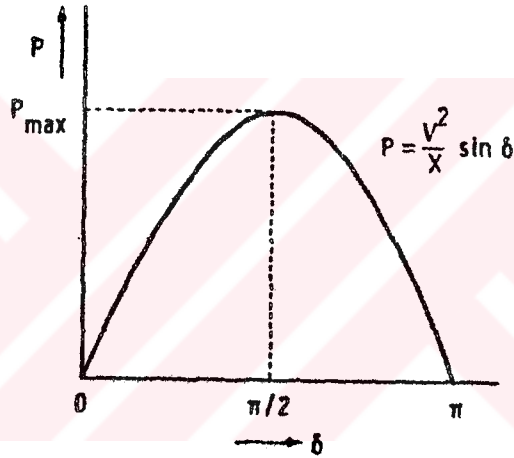
olarak yazılır. Burada V , generatör ve sonsuz baranın gerilimi, δ ise güç açısıdır. Maksimum güç $\delta = \pi/2$ değerinde elde edilir:

$$P = \frac{V^2}{X} \quad (3.25)$$

bağıntısı yazılır.



a)



b)

Şekil 3.4 a) İki makinalı güç sistemi

b) Sistemin güç iletim karakteristiği (Gyugyi 1988).

Geçici kararlılık sınırı, geçici bir olay sonunda sistemi tekrar normal çalışma koşullarına getiren maksimum kararlı hal güç seviyesi olarak tanımlanır.

Denklem (3.24)'de görüldüğü gibi, V gerilimi genelde sabit olduğundan aktif güçteki artış δ 'nın büyümesi ile ya da X 'in azalması ile sağlanabilir. Genelde sistemin büyük yük darbelerinde tekrar kararlı rejime dönebilmesi için δ değerinin mümkün olduğu

kadar küçük değerlerde, örneğin 30° civarında tutulması gerekmektedir. Dolayısıyla daha fazla aktif güç taşıyabilmek için, sınır δ değerine ulaşılmış durumlarda, seri kapasitörler ile X değerinin azaltılması gerekmektedir.

Seri kompanzasyon her bir faz iletkenine seri kapasitör grupları yerleştirmek suretiyle yapılır. Böylece hattın empedansı küçültülerek hatta düşen gerilim azaltılır.

Seri kompanzasyonun uygulanmasının nedeni, üretim tesislerinin genellikle tüketim merkezlerinden yüzlerce kilometre uzakta olması ve büyük güçlerin uzun mesafelere iletilmesi zorunluluğudur. Ayrıca seri kapasitörler paralel bağlı hatlarda gerilim düşümünün dengelenmesinde de kullanılır.

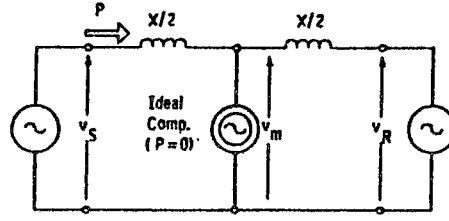
Ülkemizde uygulanan seri kompanzasyonun bir örneği Keban-Gölbaşı hattında bulunmaktadır (Çakır 1989).

Paralel kompanzasyon ise her bir hat ile nötr arasına endüktör yerleştirmek suretiyle gerçekleştirilir. Arızalardan dolayı meydana gelen darbelerde gerilimin de düşeceği göz önüne alınırsa, çok hızlı devreye girip çıkan (tristör kontrollü) şönt reaktif kompanzasyonu da bu durumda gerilimleri arttırarak sistem karalılığını arttırıcı yönde olur.

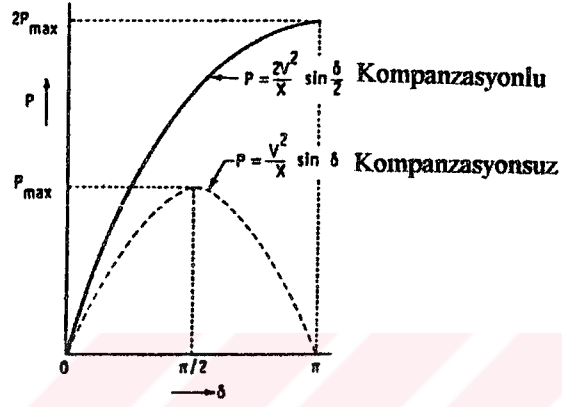
Şekil 3.5.a 'da ideal bir senkron gerilim kaynağının ($P=0$) hattın orta noktasına bağlanması, Şekil 3.5.b 'de ise kompanze edilmiş ve edilmemiş iki sistemin güç iletim karakteristiği görülmektedir. Şekil 3.5a 'da görülen v_m değeri (senkron generatörün uçlarındaki gerilim),

$$v_m = V \sin (\omega t - \delta / 2) \quad (3.26)$$

değerine eşittir.



a)



b)

Şekil 3.5.a) Senkron gerilim kaynağının hattın ortasına bağlanması

b) Güç iletim karakteristiği (Gyugyi 1988)

Şekil 3.5.a 'da orta noktanın geriliminin sabit olduğu varsayılırsa, (3.24) denklemini yeniden yazılabilir. Bu durumda iletilen güç,

$$P = \frac{V^2}{\frac{X}{2}} \sin \frac{\delta}{2} \quad (3.27)$$

ile ifade edilir. Eğer sistem n eşit parçaya (senkron kompanzatorlerle) bölünürse, güç iletimi,

$$P = \frac{V^2}{\frac{X}{n}} \sin \frac{\delta}{n} \quad (3.28)$$

ile ifade edilebilir. Bu durumda, iletilen maksimum güç,

$$P = n \frac{V^2}{X} \quad (3.29)$$

olmaktadır. Bu değer ise kompanze edilmemiş durumdaki güçten n defa büyüktür.



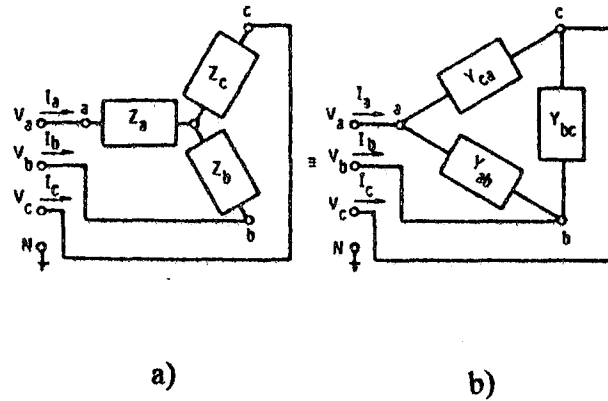
4. KOMPANZASYON PROBLEMİNİN MATEMATİKSEL OLARAK İNCELENMESİ

4.1. Giriş

Büyük ve ani değişen yüklerin kompanzasyonu için temelde iki neden vardır. Bunlardan birincisi; alternatif akım sisteminin yük uçlarındaki gerilim değişimini bir seviyede tutmak için çok zayıf olması, ikincisi ise alternatif akım sisteminden reaktif güç çekmenin ekonomik ve pratik olmamasıdır.

4.2. Yük Kompanzasyonunun Temelleri

Nötr noktası topraklanmamış; yıldız bağlı dengesiz bir yük, dengeli üçgen bağlı bir yüke dönüştürülebilir ve hesaplar yıldız bağlı yük yerine eşdeğeri olan üçgen bağlı yük üzerinde yapılabilir. Bu dönüşüm, Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1 a) Dengesiz üç fazlı yıldız bağlı yük
b) Yükenin üçgen bağlı eşdeğeri

Şekil 4.1'de Z_a , Z_b , Z_c yükün empedansları, Y_{ab} , Y_{bc} , Y_{ca} ise üçgen bağlı eşdeğerin admitanslarıdır. Yükün bağlı olduğu alternatif akım şebekesinin nötre göre gerilimleri;

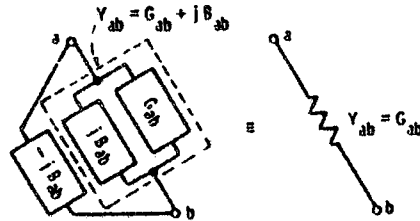
$$V_a = V \quad V_b = V.e^{-j2\pi/3} \quad V_c = V.e^{j2\pi/3} \quad (4.1)$$

olacak şekilde seçilmiştir. V ise faz - nötr geriliminin etkin değeridir. Genelde Y_{ab} , Y_{bc} ve Y_{ca} zamanın fonksiyonlarıdır. Bu parametrelerin zamana göre değişimlerinin yavaş olduğu ve değişme hızının şebeke frekansına göre küçük kaldığı varsayılarak yapılan incelemenin zamana göre değişen yükler için de geçerli olduğu kabul edilecektir.

Kompanzasyon elemanı; kayıpsız, üç fazlı kontrol elemanıdır ve yükün dengesiz olan reaktif bileşenini kompanze eder. Ayrıca yükü, dengeli üç fazlı bir yük haline getirir. Şekil 4.1b'de eşdeğer devrenin kullanılmasıyla, üç yük admitansları ayrı kompanze edilebilirler. Sadece ab fazını göz önüne alalım. Admitans Y_{ab} , reel ve sanal iki bileşenden meydana gelir.

$$Y_{ab} = G_{ab} + jB_{ab} \quad (4.2)$$

G_{ab} yük kondüktansı ve B_{ab} yük süseptansıdır. Kompanzasyonun birinci adımı Y_{ab} yüküne paralel bir $-jB_{ab}$ kompanzasyon süseptansı bağlayarak yükün sanal kısmını yok etmektir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Y_{ab} admitansının reaktif kısmının $-B_{ab}$ süseptansı ile kompanzasyonu

Kompanzasyonun ikinci adımı olarak, reel admitans G_{ab} reaktif admitans ile tamamlanmalıdır ki devre kaynağa karşı dengeli bir yük oluştursun. C.P Steinmetz tarafından araştırılan ve aşağıda gösterilen ekler ile devre istenilen hale gelir.

Buna göre b ve c fazları arasında kapasitif süseptans;

$$B_{bc}^{(ab)} = \frac{JG_{ab}}{\sqrt{3}} \quad (4.3)$$

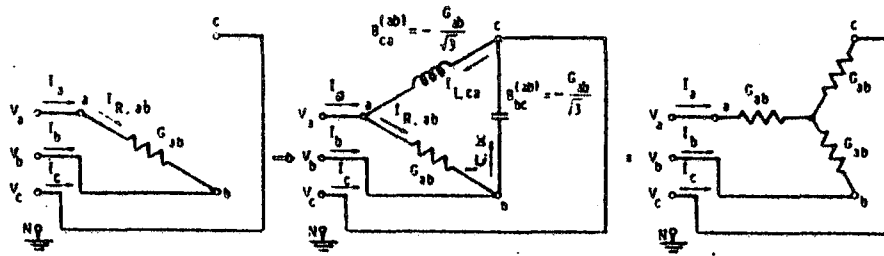
c ve a fazları arasında endüktif süseptans,

$$B_{ca}^{(ab)} = -\frac{JG_{ab}}{\sqrt{3}} \quad (4.4)$$

bağlanır. Buradaki (ab) üst indisi, ab fazını kompanze etmek için gereken süseptansları belirtmek için kullanılır. Kompanzasyondan önce alternatif akım kaynağından temin edilen bir faz aktif güç;

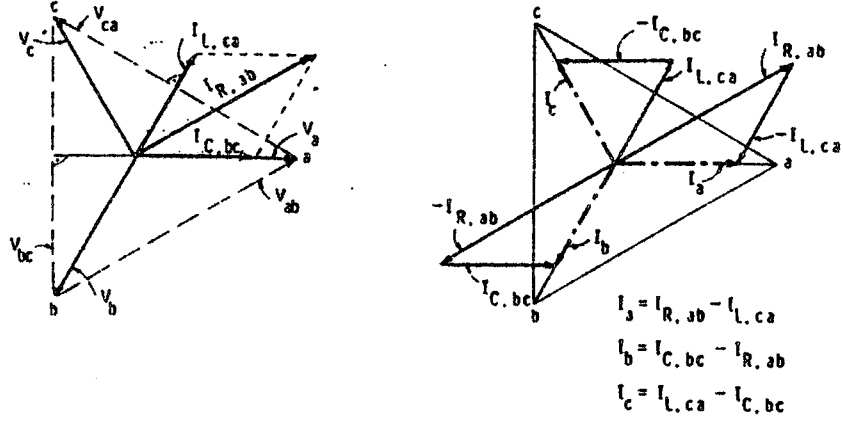
$$P = 3V^2G_{ab} \quad (4.5)$$

kompanzasyondan sonraki üç faz aktif güç miktarına eşit olmalıdır. Kompanze edilen yük üç fazlı yıldız bağlı ve G_{ab} dirençlerinden oluşan dengeli yük olarak gösterilebilir. Şekil 4.3'de bu durum görülmektedir.



Şekil 4.3. $B_{bc}^{(ab)}$ ve $B_{ca}^{(ab)}$ kapasitif ve endüktif kompanzasyon süseptansları ile reel G_{ab} yükünün dengelenmesi

Şekil 4.4 ise Şekil 4.3'deki işlemi fazör diyagramı ile açıklamaktadır. Şekil 4.4'de hat akımları I_a , I_b ve I_c , faz arası gerilimleri pozitif bileşenleri V_{ab} , V_{bc} ve V_{ca} ile gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Yük akımı $I_{R,ab}$ ile kompanzasyon akımları $I_{L,ca}$, $I_{C,bc}$ ve hat akımları I_a , I_b , I_c arasındaki ilişkiyi gösteren fazör diyagramı

Hat akımları yalnız dengeli değil aynı zamanda V_a , V_b , V_c faz gerilimleri ile aynı fazdadır. Yıldız bağlı yükün her fazı gerekli aktif gücün üçte birini sağlayacak ve reaktif güç kullanmayacaktır. Her faz G_{ab} kondüktansından meydana gelecek ve toplam güç (4.5) denklemindeki gibi olacaktır. Burada V dengeli durumda faz-nötr gerilimin etkin değeridir. Güç faktörü de 1'e eşit olacaktır. Şekil 4.3 'de üçgen devredeki faz arası akımlar dengesiz olmalarına rağmen, üçgen içinde bir reaktif denge vardır. Yani "bc" fazı arasındaki kapasitenin ürettiği reaktif gücü, "ca" fazı arasındaki bobin tüketecektir. Böylece şebekeye herhangi bir reaktif güç verilmeyecek ve alınmayacaktır.

Yukarıda oluşturulan benzer adımlar bc ve ca faz aralarındaki yük admitanslarını kompanze etmek için de kullanılabilir. Önce B_{bc} ve B_{ca} süseptansları, zıt işaretli $-JB_{bc}$ ve $-JB_{ca}$ iki kompanzasyon süseptansı tarafından yok edilir. İkinci adımda G_{bc} ve G_{ca} kondüktansları iki çift süseptans tarafından,

$$B_{ca}^{(bc)} = \frac{JG_{bc}}{\sqrt{3}} \quad (4.6)$$

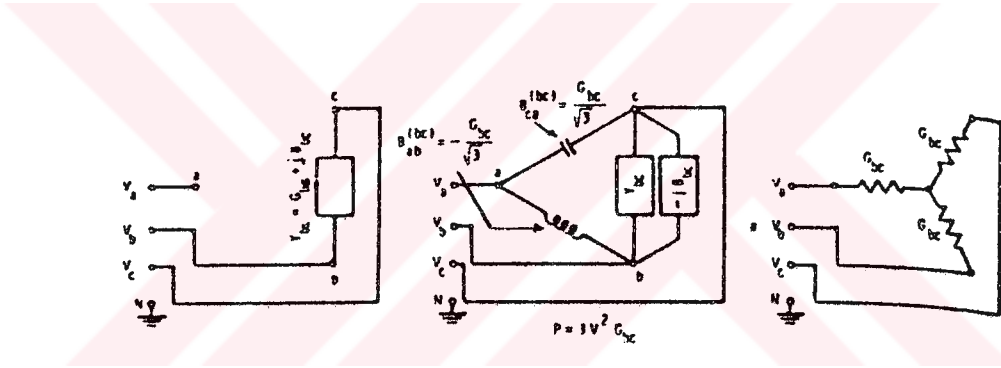
$$B_{ab}^{(bc)} = -\frac{JG_{bc}}{\sqrt{3}} \quad (4.7)$$

ve

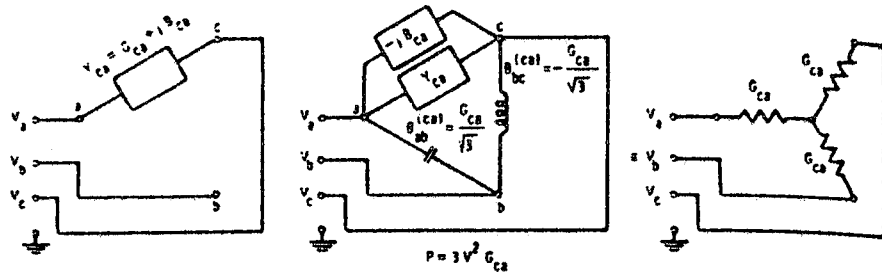
$$B_{ab}^{(ca)} = \frac{JG_{ca}}{\sqrt{3}} \quad (4.8)$$

$$B_{bc}^{(ca)} = -\frac{JG_{ca}}{\sqrt{3}} \quad (4.9)$$

olacak şekilde dengelenirler. Y_{bc} ve Y_{ca} admitanslarının kompanzasyonu Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 ile gösterilebilir.

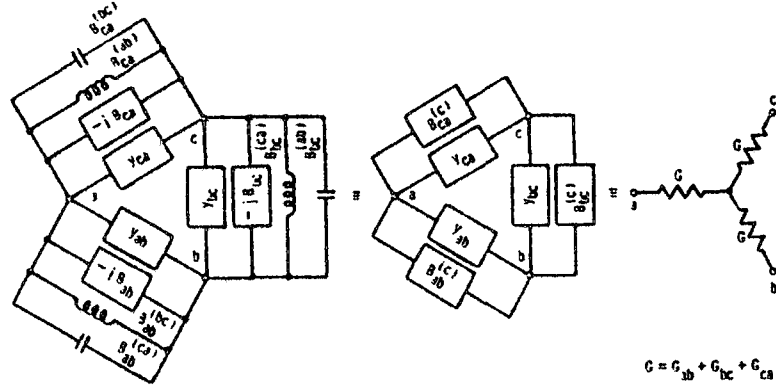


Şekil 4.5 Y_{bc} yükünün $-B_{bc}$, $B_{ca}^{(bc)}$ ve $B_{ab}^{(bc)}$ süseptansları ile kompanzasyonu



Şekil 4.6. Y_{ca} yükünün $-B_{ca}$, $B_{ab}^{(ca)}$ ve $B_{bc}^{(ca)}$ süseptansları ile kompanzasyonu

Üç fazlı yükün tam kompanzasyonu Şekil 4.7'de gösterildiği gibi her bir faza bütün kompanzasyon süseptanslarının eklenmesi ile elde edilir.



Şekil 4.7. Bir fazlı yük kompanzasyonu prensibinin üç fazlı dengesiz bir yüke uygulanması

Böylece elde edilen kompanzasyon süseptansları $B_{ab}^{(c)}$, $B_{bc}^{(c)}$, $B_{ca}^{(c)}$ her bir fazı kontrol etmek için kullanılan süseptansların toplamıdır ve aşağıdaki denklemler ile ifade edilirler:

$$B_{ab}^{(c)} = -B_{ab} + B_{ab}^{(bc)} + B_{ab}^{(ca)} \quad (4.10a)$$

$$B_{bc}^{(c)} = -B_{bc} + B_{bc}^{(ca)} + B_{bc}^{(ab)} \quad (4.10b)$$

$$B_{ca}^{(c)} = -B_{ca} + B_{ca}^{(ab)} + B_{ca}^{(bc)} \quad (4.10c)$$

Burada (c) indisi kompanzasyonu gösterir.

(4.10) denklemlerindeki ilk terim göz önüne alınan fazdaki yükün reaktif bileşenini, ikinci ve üçüncü terimler diğer iki fazda bu yükün reel kısmını dengelemek için kullanıldığını gösterir. Genel dengesiz bir yükü kompanze etmek için gerekli

kompanzasyon süseptansları, yük admitansının reel ve reaktif kısımları cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilirler:

$$B_{ab}^{(c)} = -JB_{ab} + \frac{J(G_{ca} - G_{bc})}{\sqrt{3}} \quad (4.11a)$$

$$B_{bc}^{(c)} = -JB_{bc} + \frac{J(G_{ab} - G_{ca})}{\sqrt{3}} \quad (4.11b)$$

$$B_{ca}^{(c)} = -JB_{ca} + \frac{J(G_{bc} - G_{ab})}{\sqrt{3}} \quad (4.11c)$$

Eğer yükün reel kısmı dengeli ise ($G_{ab} = G_{bc} = G_{ca}$), kompanzasyon probleminin her fazda, yükün reaktif kısmının yok edilmesine indirgendiği görülebilir. Genelde, (4.11)'de verilen kompanzasyon süseptansları herhangi bir dengesiz lineer yükü, dengeli reel yüke dönüştürürler. Yüke alternatif akım kaynağı tarafından bakıldığında, yıldız bağlı ve sadece dirençlerden oluşmuş olduğu görülür. Her bir fazdaki kondüktansların toplamı, G orjinal bağlı yük devresindeki kondüktansların toplamıdır.

$$G = G_{ab} + G_{bc} + G_{ca} \quad (4.12)$$

Yükün güç faktörü (4.11) denklemlerinde tanımlanan kompanzasyon süseptanslarının her birine kapasitif ya da endüktif değerler ekleyerek, 1 değerinden istenen değerlere kadar, kaynaktan bakıldığında endüktif veya kapasitif yük ya da saf direnç görülecek şekilde değiştirilebilir.

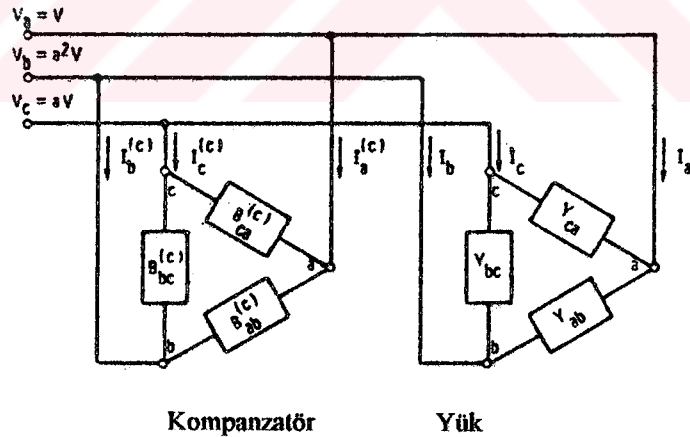
Burada sunulan temel düşüncelerden aşağıdaki sonuçlar elde edilebilir:

1. Herhangi bir dengesiz topraklanmamış doğrusal yük; kaynak ve yük arasında güç alışverişi değişmeksizin, üç fazlı dengeli bir yüke dönüştürülebilir.
2. Bu dönüşüm her fazdaki yükün, reaktif gücünün uygun bir şekilde değiştirilmesini gerektirir. Bu işleme genelde yük kompanzasyonu denir.

3. Yük kompanzasyonu birbirinden ayrılabilir iki olay içerir. Bunlardan birincisi güç faktörünün düzeltilmesi, ikincisi ise yükün dengelenmesidir. Her iki durum birden gerçekleşir ise kompanzasyon için gerekli reaktif güç ihtiyacını birlikte saptarlar.
4. Herhangi doğrusal sürekli bir yük, üç faz arasında bağlanmış (kapasitif veya endüktif) üç uygun reaktif empedans tarafından kompanze edilebilir.
5. Eğer yük zaman içinde değişir ise kompanzasyon yükün değişimiyle uyarılıp ayarlanabilen değişken reaktanslar gerektirir.

4.3. Simetrik Bileşenler Cinsinden Yük Kompanzasyonu

Bu bölümde, simetrik bileşenler cinsinden genel dengesiz bir yükün kompanzasyonu incelenecektir. Bu inceleme, önceki bölümdeki temel düşünceleri tamamlar ve elde edilen sonuçların değişik bir şekilde ifadesini sağlar. Ayrıca (4.11) denklemleri kullanılarak, yük admitanslarının ölçümü ile kompanzasyon süseptansını hesaplamak, yük akım ve gerilimlerini ölçerek hesaplamaktan daha zordur.



Şekil 4.8. Üçgen bağlı dengesiz yük ve kompanzator

Şekil 4.8.'deki gibi dengesiz üç fazlı yükün eşdeğeri tekrar göz önüne alınsın. Burada eşdeğer admitanslar Y_{ab} , Y_{bc} ve Y_{ca} kullanılmaktadır. Denklem (4.1) ve (4.2) 'de tanımlandığı üzere kaynak gerilimleri pozitif faz dönüş yönünde olmak üzere,

$$V_a = V, \quad V_b = a^2 V, \quad V_c = a V \quad (4.13)$$

dengeli bir yapı oluştururlar. Burada a;

$$a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4.14)$$

ile ifade edilir. Faz sıraları abc olmak üzere fazörler arasındaki açı 120° 'dir. Yük tarafından çekilen hat akımları:

$$I_a = [Y_{ab}(1-a^2) - Y_{ca}(a-1)] \cdot V \quad (4.15a)$$

$$I_b = [Y_{bc}(a^2 - a) - Y_{ca}(1-a^2)] \cdot V \quad (4.15b)$$

$$I_c = [Y_{ab}(a-1) - Y_{ca}(a^2 - a)] \cdot V \quad (4.15c)$$

Üç hat akımı cinsinden simetrik bileşenler;

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (4.16a)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (4.16b)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (4.16c)$$

şeklinde verilir. I_{a0} , I_{a1} ve I_{a2} sırasıyla sıfır, pozitif ve negatif bileşen akımlarının referans fazörleridir. (4.15) ifadelerinin (4.16) 'da kullanılmasıyla, simetrik bileşenlerin yük admitansları cinsinden ifadeleri bulunmuş olur:

$$I_{a0} = 0 \quad (4.17a)$$

$$I_{a1} = (Y_{ab} + Y_{bc} + Y_{ca}).V \quad (4.17b)$$

$$I_{a2} = -(a^2 Y_{ab} + Y_{bc} + a Y_{ca}).V \quad (4.17c)$$

Simetrili hat akımı bileşenleri cinsinden yük kompanzasyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

1. Negatif bileşeni yok etmek(dengeleme için).
2. Pozitif bileşenin reaktif kısmını yok etmek veya azaltmak(güç faktörünü düzeltmek için).

(4.2) alt bölümündeki sonuçlar da göz önüne alınarak yukarıda ifade edilen iki hedefe, reaktif elemanlardan oluşmuş kompanzasyon devresinin eleman değerlerinin değiştirilmesi ile ulaşılabacağı açıktır. Bu amaçla kompanzasyon süseptansları ile yük akımının simetrili bileşenleri arasındaki ilişki bulunmalıdır. Üçgen bağlı kompanzasyon tarafından çekilen akımın simetrili bileşenleri (4.17) 'de verildiği gibi benzer şekilde kompanzasyon süseptansları cinsinden ifade edilebilir:

$$I_{a0}^{(c)} = 0 \quad (4.18a)$$

$$I_{a1}^{(c)} = J(B_{ab}^{(c)} + B_{bc}^{(c)} + B_{ca}^{(c)}).V \quad (4.18b)$$

$$I_{a2}^{(c)} = -J(a^2 B_{ab}^{(c)} + B_{bc}^{(c)} + a B_{ca}^{(c)}).V \quad (4.18c)$$

Yük kompanzasyonunda yükün dengelenmesi (4.19) ifadesi ile verilir:

$$I_{a2} + I_{a2}^{(c)} = 0 \quad (4.19)$$

Güç faktörünün düzeltilmesi ise (4.20) ifadesi ile verilir:

$$\text{Im} I_{a1} + I_{a1}^{(c)} = 0 \quad (4.20)$$

(4.17) ve (4.18) ifadelerinin incelenmesi $I_{a1}^{(c)}$ 'in sadece imajiner kısmının bulunduğunu gösterir. Oysa I_{a2} ve $I_{a2}^{(c)}$ 'nin reel ve imajiner kısımları vardır. Anlaşılacağı gibi $I_{a1} + I_{a1}^{(c)} = 0$ 'dır. Buradan (4.19) ifadesinin reel ve imajiner kısımlarını ayrı ayrı sıfıra eşitlemek mümkündür.

$$\text{Re } I_{a2} + \text{Re } I_{a2}^{(c)} = 0 \quad (4.21)$$

$$\text{Im } I_{a2} + \text{Im } I_{a2}^{(c)} = 0 \quad (4.22)$$

(4.20), (4.21) ve (4.22) denklemleri yük kompanzasyonu şartlarını oluştururlar. (4.18) ifadesinin reel ve imajiner kısımları (4.20), (4.21) ve (4.22) 'de yerlerine konur ve üç kompanzasyon süseptansı cinsinden elde edilen denklemler çözümlerse aşağıdaki ifadeler bulunur.

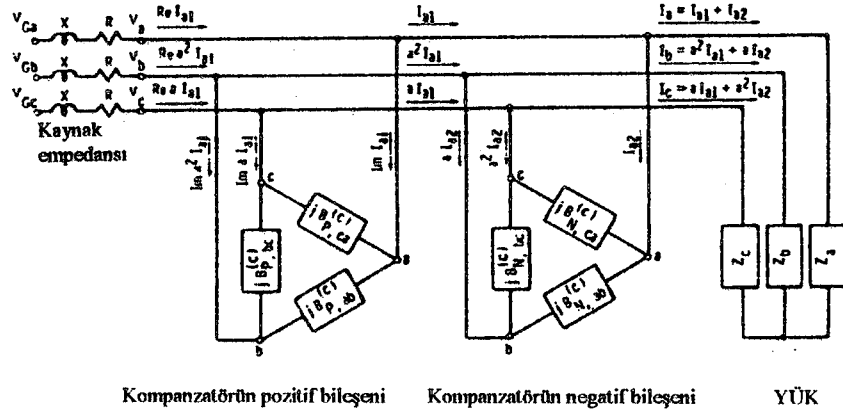
$$B_{ab}^{(c)} = -\frac{1}{3V} \text{Im } I_{a1} - \frac{1}{3V} \text{Im } I_{a2} + \frac{1}{\sqrt{3}V} \text{Re } I_{a2} \quad (4.23a)$$

$$B_{bc}^{(c)} = -\frac{1}{3V} \text{Im } I_{a1} + \frac{2}{3V} \text{Im } I_{a2} \quad (4.23b)$$

$$B_{ca}^{(c)} = -\frac{1}{3V} \text{Im } I_{a1} - \frac{1}{3V} \text{Im } I_{a2} - \frac{1}{\sqrt{3}V} \text{Re } I_{a2} \quad (4.23c)$$

(4.23) denklemleri yük akımının simetrik bileşenleri cinsinden kompanzasyon süseptanslarını verir. Üç kompanzasyon süseptansı yük akımı pozitif bileşenin imajiner kısmı ile orantılıdır. Oysa her bir süseptans yük akımı negatif bileşenin farklı fonksiyonları ile orantılıdır. Çekilen pozitif ve negatif bileşen akımları birbirlerinden bağımsızdır.

Kompanzasyon devresini üçgen bağlı iki devre gibi düşünebiliriz. Birinci üçgen pozitif bileşen, reaktif yük akımını, diğeri ise negatif bileşen yük akımını verir. Şematik gösterim Şekil 4.9'da verilmektedir.



Şekil 4.9. Kompanzatrörün pozitif ve negatif bileşen üçgenlerine ayrılması

Pozitif bileşen kompanzasyon akımını temin eden üçgen devrede süseptansların toplamı yükün reaktif güç ihtiyacı ile orantılıdır. (4.17) ifadelerinin (4.23)'de kullanılmasıyla, pozitif ve negatif bileşen üçgenlerindeki kompanzasyon süseptansları yük admitanslarının reel ve imajiner kısımları cinsinden ifade edilebilirler.

$$B_{P,ab}^{(c)} = B_{P,bc}^{(c)} = B_{P,ca}^{(c)} = -\frac{1}{3}(B_{ab} + B_{bc} + B_{ca}) \quad (4.24)$$

$$B_{N,ab}^{(c)} = -\frac{2}{3}B_{ab} + \frac{1}{3}B_{bc} + \frac{1}{3}B_{ca} + \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{ca} - G_{bc}) \quad (4.25a)$$

$$B_{N,bc}^{(c)} = +\frac{1}{3}B_{ab} - \frac{2}{3}B_{bc} + \frac{1}{3}B_{ca} + \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{ab} - G_{ca}) \quad (4.25b)$$

$$B_{N,ca}^{(c)} = \frac{1}{3}B_{ab} + \frac{1}{3}B_{bc} - \frac{2}{3}B_{ca} + \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{bc} - G_{ab}) \quad (4.25c)$$

Burada $B_{P,ab}^{(c)}$, $B_{P,bc}^{(c)}$ ve $B_{P,ca}^{(c)}$ kompanzatrör pozitif bileşen süseptanslarını, $B_{N,ab}^{(c)}$, $B_{N,bc}^{(c)}$ ve $B_{N,ca}^{(c)}$ ise negatif bileşen süseptanslarını verir. (4.24) ve (4.25) denklemlerinin toplamı bize (4.11) ifadelerini verecektir. Ayrıca (4.24) ve (4.25) ifadeleri (4.17) ve (4.23)'den elde edilmişti. Öyleyse, kompanzasyon süseptanslarının (4.11) ile sağlanması ya da (4.23) ile kullanılması aynı şey demektir.

Pratik olarak kompanzasyon devresi Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi iki üçgene bölünmez. Bu bölünme sadece görüş açısı kazandırmak içindir. Sadece bir kompanzasyon üçgeni ile (4.23) ifadelerinden görüldüğü gibi imajiner ve reel simetrik bileşenlerin birbirinden bağımsız olmalarından faydalanarak kompanzasyonu sağlamak mümkündür (Gyugyi et al 1978).

4.4. Kompanzasyon Süseptanslarının Hat Akımları Cinsinden İfadeleri

(4.2) ve (4.3) alt bölümlerde kompanzasyon süseptansları, yük admitansları ya da yük akımının simetrik bileşenleri cinsinden ifade edilmişlerdi. Her iki ifade pratik kontrol yaklaşımı için temel oluşturmakla birlikte, kompanzasyon süseptanslarına ilişkin denklemlerin doğrudan ölçülebilir yük akımları veya güçleri cinsinden olması pratik yaklaşımlarda tercih edilir.

Üç hat akımı reel ve imajiner kısımları ile ifade edilebilirler:

$$I_a = \text{Re } I_a + j \text{Im } I_a \quad (4.26a)$$

$$I_b = \text{Re } I_b + j \text{Im } I_b \quad (4.26b)$$

$$I_c = \text{Re } I_c + j \text{Im } I_c \quad (4.26c)$$

(4.23)'deki simetrik bileşen akımları, (4.16) kullanılarak hat akımları cinsinden ifade edilebilirler. Burada (4.17)'deki sıfır bileşeninin $I_{a0}=0$ olacağı da göz önüne alınmalıdır. (4.26) ifadeleri (4.16)'da kullanılırsa;

$$\text{Re } I_a + \text{Re } I_b + \text{Re } I_c = 0 \quad (4.27a)$$

$$\text{Im } I_a + \text{Im } I_b + \text{Im } I_c = 0 \quad (4.27b)$$

$$\text{Re } I_{a1} = \frac{1}{3} \text{Re } I_a - \frac{1}{6} \text{Re } I_b - \frac{1}{6} \text{Re } I_c - \frac{\sqrt{3}}{6} \text{Im } I_b + \frac{\sqrt{3}}{6} \text{Im } I_c \quad (4.28a)$$

$$\text{Im} I_{a1} = \frac{1}{3} \text{Im} I_a - \frac{1}{6} \text{Im} I_b - \frac{1}{6} \text{Im} I_c + \frac{\sqrt{3}}{6} \text{Re} I_b - \frac{\sqrt{3}}{6} \text{Re} I_c \quad (4.28b)$$

$$\text{Re} I_{a2} = \frac{1}{3} \text{Re} I_a - \frac{1}{6} \text{Re} I_b - \frac{1}{6} \text{Re} I_c + \frac{\sqrt{3}}{6} \text{Im} I_b - \frac{\sqrt{3}}{6} \text{Im} I_c \quad (4.29a)$$

$$\text{Im} I_{a2} = \frac{1}{3} \text{Im} I_a - \frac{1}{6} \text{Im} I_b - \frac{1}{6} \text{Im} I_c - \frac{\sqrt{3}}{6} \text{Re} I_b + \frac{\sqrt{3}}{6} \text{Re} I_c \quad (4.29b)$$

ifadeleri elde edilir. (4.28) ve (4.29) ifadeleri (4.23)'de kullanılırsa kompanzator süseptans ifadeleri:

$$B_{ab}^{(c)} = \left[\frac{1}{3\sqrt{3}} \text{Re} I_a - \frac{1}{6\sqrt{3}} \text{Re} I_b - \frac{1}{6\sqrt{3}} \text{Re} I_c - \frac{2}{9} \text{Im} I_a + \frac{5}{18} \text{Im} I_b - \frac{1}{18} \text{Im} I_c \right] \frac{1}{V} \quad (4.30a)$$

$$B_{bc}^{(c)} = \left[-\frac{1}{2\sqrt{3}} \text{Re} I_b + \frac{1}{2\sqrt{3}} \text{Re} I_c + \frac{1}{9} \text{Im} I_a - \frac{1}{18} \text{Im} I_b - \frac{1}{18} \text{Im} I_c \right] \frac{1}{V} \quad (4.30b)$$

$$B_{ca}^{(c)} = \left[-\frac{1}{3\sqrt{3}} \text{Re} I_a + \frac{1}{6\sqrt{3}} \text{Re} I_b + \frac{1}{6\sqrt{3}} \text{Re} I_c - \frac{2}{9} \text{Im} I_a - \frac{1}{18} \text{Im} I_b + \frac{5}{18} \text{Im} I_c \right] \frac{1}{V} \quad (4.30c)$$

olur. (4.30) ifadelerinde (4.27) koşulu da kullanılırsa;

$$B_{ab}^{(c)} = \left[\frac{1}{2\sqrt{3}} \text{Re} I_a - \frac{2}{9} \text{Im} I_a + \frac{5}{18} \text{Im} I_b - \frac{1}{18} \text{Im} I_c \right] \frac{1}{V} \quad (4.31a)$$

$$B_{bc}^{(c)} = \left[-\frac{1}{2\sqrt{3}} \text{Re} I_b + \frac{1}{2\sqrt{3}} \text{Re} I_c + \frac{1}{6} \text{Im} I_a \right] \frac{1}{V} \quad (4.31b)$$

$$B_{ca}^{(c)} = \left[-\frac{1}{2\sqrt{3}} \text{Re} I_a - \frac{2}{9} \text{Im} I_a - \frac{1}{18} \text{Im} I_b + \frac{5}{18} \text{Im} I_c \right] \frac{1}{V} \quad (4.31c)$$

denklemleri elde edilir (Gümeli 1990). (4.31) denklemleri, kompanzasyon süseptanslarının hat akımları cinsinden ifadesidir. V'nin dengeli durum faz-nötr gerilimin etkin değeri unutulmamalıdır.

Kompanzasyon kontrol işaretleri özel elektronik ya da mikroişlemci devreleri ile gerçekleştirileceğinden fazör değerler yerine gerçek ani akım ve gerilim değerlerine göre süseptansları ifade etmek gerekir. Bunun için, örneğin I_a hat akımı ile $i_a(t)$ ani değeri arasında ilişki kurulmalıdır. I_a fazörü için:

$$I_a = I_{ae} e^{-j\phi_a} \quad (4.32)$$

ve $i_a(t)$ ani akım için ise,

$$i_a(t) = \sqrt{2} I_{ae} \cos(\omega t - \phi_a) \quad (4.33)$$

$$i_a(t) = \sqrt{2} I_{ae} \operatorname{Re} \left[e^{j(\omega t - \phi_a)} \right] = \sqrt{2} \operatorname{Re} \left[I_a e^{j\omega t} \right] \quad (4.34)$$

ifadeleri yazılabilir. Burada I_{ae} ; hat akımının etkin değeri, ϕ_a ; akım ve gerilim fazörleri arasındaki açı, ω ; şebekenin açısal hızıdır.

$$I_a = I_{ae} e^{-j\phi_a} = \operatorname{Re} I_a - j \operatorname{Im} I_a \quad (4.35)$$

$\operatorname{Re} I_a$ ve $\operatorname{Im} I_a$, I_a hat akımı fazörünün reel ve imajiner kısımlarıdır. (4.34) ifadesi ile fazör değerlerden ani değerlere geçildiğine göre;

$$i_a(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \left[(\operatorname{Re} I_a - j \operatorname{Im} I_a) e^{j\omega t} \right] \quad (4.36a)$$

$$i_a(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \left[(\operatorname{Re} I_a - j \operatorname{Im} I_a) (\cos \omega t + j \sin \omega t) \right] \quad (4.36b)$$

$$i_a(t) = \sqrt{2} [\operatorname{Re} I_a \cos \omega t + \operatorname{Im} I_a \sin \omega t] \quad (4.36c)$$

ifadeleri elde edilir. (4.36)'dan $\text{Re}I_a$ ve $\text{Im}I_a$ 'nın bulunması gerekir. $\omega t = \pi/2$ için $\cos\omega t=0$ ve $\sin\omega t=1$ olacağı (4.36c)'den görülmektedir. Buradan imajiner kısım ;

$$\text{Im}I_a = \frac{i_a(t)}{\sqrt{2}} \Big|_{\omega t = \pi/2} \quad (4.37)$$

şeklinde bulunabilir. Benzer şekilde (4.36c)'den $\omega t=0$ için $\cos\omega t=1$ ve $\sin\omega t=0$ olacaktır. Reel kısım için ise;

$$\text{Re}I_a = \frac{i_a(t)}{\sqrt{2}} \Big|_{\omega t=0} \quad (4.38)$$

olacaktır. I_a hat akımı için faz-nötr geriliminin ani değeri referans olarak alınırsa;

$$v_a(t) = \sqrt{2}V \cos\omega t = \sqrt{2} \text{Reel}(V.e^{j\omega t}) \quad (4.39)$$

bulunur. Bu ifadenin türevi;

$$\frac{dv_a(t)}{dt} = -\sqrt{2}V\omega \sin\omega t \quad (4.40)$$

olacaktır. $\omega t = -\pi/2$ için $v_a(t)=0$ ve $\frac{dv_a(t)}{dt} > 0$ olur. Akımın imajiner kısmını bulmak için koşul;

$$\text{Im}I_a = \frac{i_a(t)}{\sqrt{2}} \Big|_{\substack{v_a(t)=0 \\ \frac{dv_a(t)}{dt} > 0}}, \quad \omega t = -\pi/2 \quad (4.41)$$

şeklinde ifade edilir. Bunun anlamı ani akımın, referans gerilimin sıfır ve türevi pozitif (gerilim negatiften pozitive geçtiğinde) iken ölçülen değerinin imajiner akımı vereceğidir.

Akımın reel kısmı $\omega t=0$ anında belirleniyordu. (4.39) ve (4.40) denklemleri $\omega t=0$ iken $v_a(t) = \sqrt{2} V = V_{\max}$ ve $dv_a(t)/dt=0$ olacağı açıktır.

Reel akım aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\text{Re}I_a = \frac{i_a(t)}{\sqrt{2}} \Bigg|_{\substack{v_a(t)=V_{\max} \\ \frac{dv_a(t)}{dt}=0}}, \quad \omega t=0 \quad (4.42)$$

Ani akımın, referans gerilim maksimum ve türevinin sıfır olduğu (gerilim tepe değerinde) anda alınan değeri reel akımı verecektir. b ve c fazları için de (4.41) ve (4.42) benzeri ifadeler bulunabilir.

4.5. Enerji İletiminde Kompanzasyon

Yük kompanzasyonunda kompanzatör süseptanslarının yük akımı ve admitansları cinsinden ifadesi, pratik uygulamalarda kontrol stratejilerinin uygulanması açısından kolaylık sağlar. Çoklu terminalleri bulunan enerji iletim hatlarında bir çok yük grupları ve üretim birimleri hep birlikte bir ağ teşkil ederler.

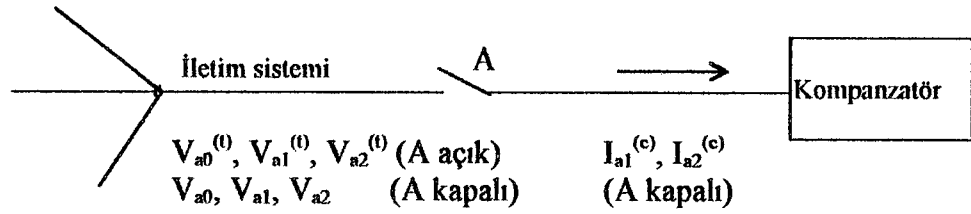
Yüke ait büyüklüklerin ölçülmesi mümkün olmayabilir. İletim sistemi terminallerindeki gerilimin ölçümü amaç olarak alınacaktır. Çünkü gerilim:

1. İletilen gücü belirler.
2. Alıcılar için sabit olması istenen, sistemin kalitesini belirleyen büyüklüktür.

Bu nedenlerden dolayı iletimde kompanzasyon, yük kompanzasyonundan değişik bir yaklaşım gerektirir. Yük kompanzasyonunda amaç, dengesiz ve güç faktörü 1 olmayan yükten çekilen akımı reel ve dengeli hat akımına dönüştürmektir. Yükü tanımlayan büyüklükler ölçülüp hat akımları kontrol ediliyordu. Alternatif akım şebeke empedansı, terminal gerilimi kontrol edilmediği için, önemli bir rol oynamıyordu.

İletim sisteminde kompanzasyonun amacı, gerilimin regüle edilmesi (desteklenmesi) ve gerilim değişmesinin gerçek nedeni göz önüne alınmaksızın terminal geriliminin dengelenmesidir. Kompanzator süseptansları (veya akımları), gerilimler cinsinden tanımlanmalıdır.

Genel bir iletim sistemi kompanzasyon problemi Şekil 4.10'da verilmektedir.



Şekil 4.10. Şebeke terminaline bağlı kompanzator

Kompanzatorun bağlı olduğu terminale çeşitli yük grupları ya da generatörlerin bağlı olduğu düşünülebilir. Terminaldeki gerilimler genellikle dengesiz ve sıfır, pozitif, negatif bileşenlerdir. Terminal gerilimleri sırası ile ve kompleks ifadeler olmak üzere;

$$V_{a0}^{(t)}, V_{a1}^{(t)}, V_{a2}^{(t)} \quad (4.43)$$

şeklinindedir. Şekil 4.8'i örnek alırsak, kompanzator pozitif bileşen reaktif akımı $I_{a1}^{(c)}$ ve negatif bileşen $I_{a2}^{(c)}$ üretilebilir. Sıfır bileşen akımı $I_{a0}^{(c)}$, üçgen bağlamadan dolayı sıfırdır. Bu yüzden kompanzatorun, terminal geriliminin sıfır bileşenini doğrudan etkilemesi mümkün değildir. (Pratikte sıfır bileşen gerilimi olmaz. Bundan sonra bu bileşen göz önüne alınmayacaktır.)

Şebeke terminalindeki gerilimin simetrik bileşenleri, V_{a1} ve V_{a2} kompleks ifadeleri, kompanzator sisteme bağlı iken (anahtar kapalı) kompanzatorun akımları cinsinden ifade edilebilir ve orjinal terminal gerilimi aşağıdaki gibi olur.

$$V_{a1} = V_{a1}^{(t)} - Z_{11}I_{a1}^{(c)} - Z_{12}I_{a2}^{(c)} \quad (4.44a)$$

$$V_{a2} = V_{a2}^{(t)} - Z_{21}I_{a1}^{(c)} - Z_{22}I_{a2}^{(c)} \quad (4.44b)$$

Z_{11} , Z_{12} , Z_{21} ve Z_{22} şebekenin simetrik bileşen empedans katsayılarıdır. (4.44) denklemleri ile birlikte kompanzasyonun amacı aşağıdakilere göre belirlenir:

1. Negatif bileşen geriliminin yok edilmesi

$$V_{a2} = 0 \quad (4.45)$$

2. Pozitif bileşen geriliminin sabit tutulması

$$V_{a1} = V = \text{sabit} \quad (4.46)$$

(4.44) ifadeleri $I_{a1}^{(c)}$ ve $I_{a2}^{(c)}$ 'ye göre çözümlerse:

$$I_{a1}^{(c)} = Y_{11}(V_{a1}^{(t)} - V_{a1}) + Y_{12}(V_{a2}^{(t)} - V_{a2}) \quad (4.47)$$

$$I_{a2}^{(c)} = Y_{21}(V_{a1}^{(t)} - V_{a1}) + Y_{22}(V_{a2}^{(t)} - V_{a2}) \quad (4.48)$$

ifadeleri bulunur. Burada Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} ve Y_{22} denklem (4.44) ile verilen empedanslara karşı gelen admitanslardır. (4.45) ve (4.46) şartları da kullanılırsa:

$$I_{a1}^{(c)} = Y_{11}(V_{a1}^{(t)} - V_{a1}) + Y_{12}V_{a2}^{(t)} \quad (4.49)$$

$$I_{a2}^{(c)} = Y_{21}(V_{a1}^{(t)} - V_{a1}) + Y_{22}V_{a2}^{(t)} \quad (4.50)$$

bulunur. (4.49) ve (4.50) denklemleri kompanzatör simetrik bileşen akımları, simetrik bileşen admitansları ve terminal gerilimleri arasındaki ilişkiyi verir. (4.49) ve (4.50) ifadeleri pratikte uygulanabilir değildir. Çünkü alternatif akım şebekesi admitans kayıpları, yükdeki ve enerji iletiminde kayıplardan dolayı tam bilinemez. Aynı zorluk

simetrik bileşen terminal gerilimleri $V_{a1}^{(t)}$ ve $V_{a2}^{(t)}$ 'nin belirlenmesinde de vardır. (4.49) ve (4.50) ifadeleri pratikte uygulanabilir olmamasına rağmen gerilim kompanzasyonu probleminin anlaşılmasına yardımcı olur. İlk olarak (4.49) ve (4.50) ifadelerinden (4.18)'de olduğu gibi pozitif bileşen kompanzasyon akımı $I_{a1}^{(c)}$ 'in imajiner ($\text{Re}I_{a1}^{(c)}=0$) olacak şekilde çözümlenip çözülmeyeceğini inceleyelim.

$$I_{a1}^{(c)} = JB_P^{(c)} V_{a1} \quad (4.51)$$

şeklinde olmalıdır. (4.18) ile karşılaştırma yapılırsa;

$$B_P^{(c)} = B_{ab}^{(c)} + B_{bc}^{(c)} + B_{ca}^{(c)} \quad (4.52)$$

olacağı açıktır. (4.49)'dan V_{a1} çözümlerse

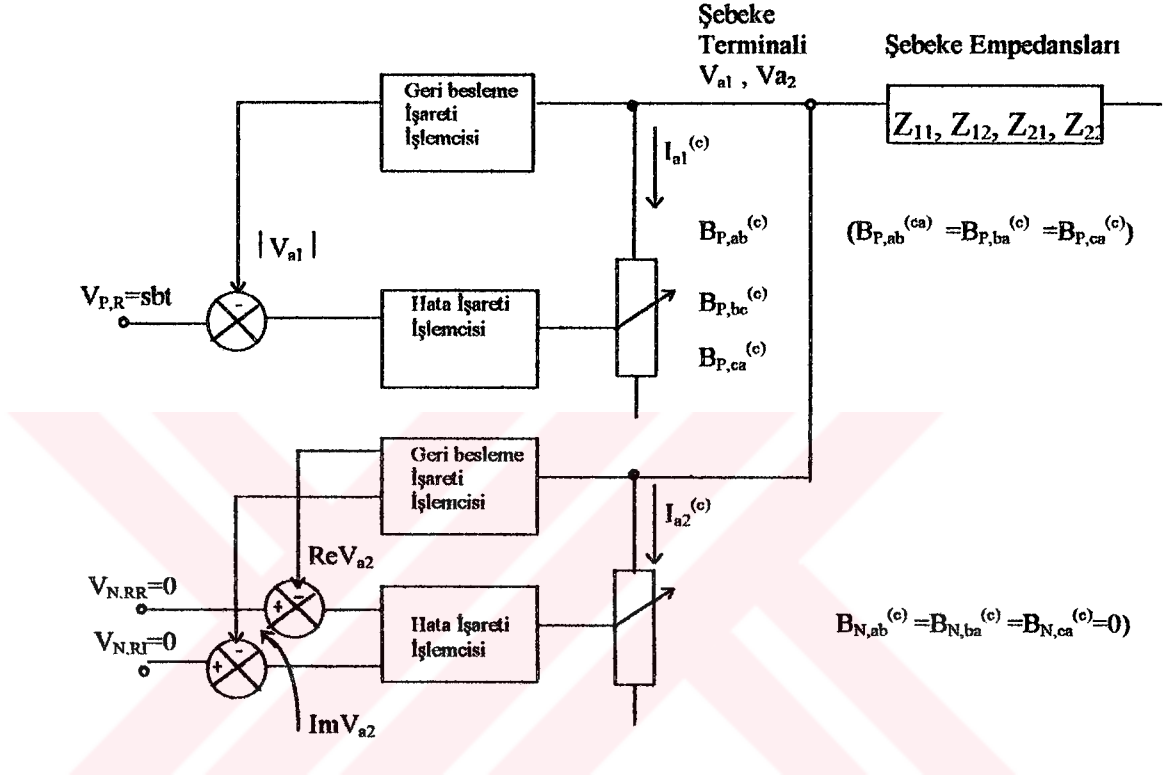
$$V_{a1} = \frac{Y_{11} V_{a1}^{(t)} + Y_{21} V_{a2}^{(t)}}{JB_P^{(c)} + Y_{11}} \quad (4.53)$$

bulunur. (4.53) ifadesinde pay sabit ve kompleks bir sayıdır. V_{a1} pozitif bileşen faktörünün $|V_{a1}|$ büyüklüğü, $B_P^{(c)}$ kompanzasyon süseptansı (veya $I_{a1}^{(c)}$) ile değişir. (4.53)'den görüldüğü gibi sistem parametrelerindeki bir değişim, $B_P^{(c)}$ kompanzasyon süseptansı ile karşılanır ve $|V_{a1}|$ sabit kalır. (V_{a1} fazörünün faz açısı $B_P^{(c)}$ ile değişmektedir). (4.53) ile verilen V_{a1} , (4.50)'de yerine konursa $I_{a2}^{(c)}$ ifadesi bulunur. Böylece (4.23)'e benzer ifadeler elde edilir. Bu yük kompanzasyonu için gerekli olan süseptans değerleriydi. Öyleyse (4.45) ve (4.46) ifadeleri gerilim regülasyonu için yeterlidir. Eğer iletim şebekesi dengeli ve fazlar arasında bağlantı yok ise kompanzasyon problemi daha basit olur. Ortak bileşen empedanları Z_{11} ve Z_{12} sıfır olur. Böylece (4.49) ve (4.50) ifadeleri basitleşir ve aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$I_{a1}^{(c)} = (V_{a1}^{(t)} - V_{a1})/Z_{11} \quad (4.54a)$$

$$I_{a2}^{(c)} = V_{a2}^{(t)}/Z_{22} \quad (4.54b)$$

(4.49), (4.50) ve (4.54) ifadelerindeki sistem parametreleri bilinmediğine göre kompanzator süseptanslarını hesaplayabilmek için uygun geri besleme kontrol tekniklerinden faydalanmak gerekir. Bu tip sistem şeması Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11. Birbirinden bağımsız iki geri besleme çevrimi ile gerilim kompanzasyonununua ait şema

Şekil 4.11'deki devrede, gerilim regülasyonu için pozitif bileşen gerilimi fazörü V_{a1} 'in $|V_{a1}|$ etkin değeri hesaplanır ve geri besleme işareti olarak verilir. Uygun bir $V_{P,R} = \text{sabit}$ referansı ile karşılaştırılır. Elde edilen hata işareti kuvvetlendirilir. Bu işlenmiş hata işareti ile kompanzator süseptansları $B_{P,ab}^{(c)}$, $B_{P,bc}^{(c)}$ ve $B_{P,ca}^{(c)}$ hesaplanır. Böylece gerekli $I_{a1}^{(c)}$ akımı bulunmuş olur. Anlatılan işlem $V_{a1} = V = \text{sabit}$ şartını sağlar. Yük kompanzasyonunda (4.21) ile verilen $I_{a1}^{(c)} + \text{Im}I_{a1} = 0$ koşulu (4.46) gerilim regülasyonu ile aynı doğrultudadır. Her iki koşul da gerilimi sabit tutar ya da tersine sistemin ihtiyacı olan reaktif gücü temin eder.

İkinci kontrol çevrimi, gerilimin dengelenmesi için kullanılır. Negatif bileşen gerilimi V_{a2} 'nin reel ve imajiner kısımları geri besleme işaretleridir. Referans gerilimler $V_{a2}=0$ koşuluna uygun olarak sıfır değerindedir. (4.45)'deki $V_{a2}=0$ koşulu ile yük kompanzasyonunda negatif bileşen akımını yok eden (4.21) ve (4.22) ifadeleri aynı amaca yöneliktir. Sonuçta fazlar arasındaki dengesizlik kaldırılmaktadır.

Şekil 4.11'de anlatılan örnekte faz gerilimlerine göre çalışılmıştır. Daha çok tercih edilen bir işlem şekli ise kompanzatörün üçgen bağlı olması koşulu ile her faz için birbirinden bağımsız çalışan ve her biri bir faz arasını kontrol eden üç ayrı kompanzatör kullanmaktır (Gyugyi et al 1978).

4.6. Örnek Kompanzasyon Hesabı

Reaktif güç harcayan dengesiz üç fazlı yük için, yük kompanzasyonu koşulları uygulanacak, gerekli kompanzatör süseptansları hesaplanacaktır. Kompanzasyon öncesi ve sonrasında akımın ve gerilimin simetrik bileşenleri hesaplanacaktır.

Üçgen bağlı yükün admitansları (değerler per-unit = birim):

$$Y_{ab} = 2 + j4 \text{ (pu)}, \quad Y_{bc} = 1 + j3 \text{ (pu)}, \quad Y_{ca} = 3 + j5 \text{ (pu)}$$

olsun ve yük dengeli bir kaynaktan beslensin (Şekil 4.8). Kaynak faz gerilimleri:

$$V_a = 1 \angle 0 \text{ (pu)}, \quad V_b = 1 \angle -120 \text{ (pu)}, \quad V_c = 1 \angle 120 \text{ (pu)}$$

değerindedir. Bölüm 4.3'de hat akımları ile ilgili (4.15) ifadelerinde yukarıdaki admitanslar yerlerine konulursa;

$$I_a = [Y_{ab}(1-a^2) - Y_{ca}(a-1)] \cdot V = 15.15 \angle 56.59 \quad \text{(pu)}$$

$$I_b = [Y_{bc}(a^2 - a) - Y_{ab}(1-a^2)] \cdot V = 11.02 \angle 59.11 \quad \text{(pu)}$$

$$I_c = [Y_{ca}(a-1) - Y_{bc}(a^2 - a)] \cdot V = 14.37 \angle -167.27 \quad (\text{pu})$$

hat akımları bulunur. Görüldüğü gibi fazlar dengesiz yüklenmiştir.

Kompanzasyon, önce Bölüm 4.2'de verilen yük admitansları cinsinden kompanzatör süseptanslarını hesaplayan (4.11) denklemine göre yapılsın.

$$B_{ab}^{(c)} = -B_{ab} + J \frac{(G_{ca} - G_{bc})}{\sqrt{3}} = -J4 + J \frac{(3-1)}{\sqrt{3}} = -J2.845 \quad (\text{pu})$$

$$B_{bc}^{(c)} = -B_{bc} + J \frac{(G_{ab} - G_{ca})}{\sqrt{3}} = -J3 + J \frac{(2-3)}{\sqrt{3}} = -J3.577 \quad (\text{pu})$$

$$B_{ca}^{(c)} = -B_{ca} + J \frac{(G_{bc} - G_{ab})}{\sqrt{3}} = -J5 + J \frac{(1-2)}{\sqrt{3}} = -J5.577 \quad (\text{pu})$$

Kompanzatör süseptansları, hat akımlarının simetrik bileşenleri cinsinden, (4.23) denklemleri kullanılarak da hesaplanabilir.

Önce hat akımlarını simetrik bileşenler cinsinden ifade etmek için (4.16) ifadeleri kullanılır.

$$I_{a0} = \frac{(I_a + I_b + I_c)}{3} = 0$$

$$I_{a1} = \frac{(I_a + I_b + a^2 I_c)}{3} = 5.999 + J11.995 \quad (\text{pu})$$

$$I_{a2} = \frac{(I_a + a^2 I_b + a I_c)}{3} = 2.323 + J0.683 \quad (\text{pu})$$

(4.23) ifadesi kullanılırsa;

$$B_{ab}^{(c)} = -\frac{1}{3V} \text{Im} I_{a2} + \frac{1}{\sqrt{3}V} \text{Re} I_{a2} - \frac{1}{3V} \text{Im} I_{a1} = -2.845 \text{ (pu)}$$

$$B_{bc}^{(c)} = -\frac{2}{3V} \text{Im} I_{a2} - \frac{1}{3V} \text{Im} I_{a1} = -3.577 \text{ (pu)}$$

$$B_{ca}^{(c)} = -\frac{1}{3V} \text{Im} I_{a2} - \frac{1}{\sqrt{3}V} \text{Re} I_{a2} - \frac{1}{3V} \text{Im} I_{a1} = -5.577 \text{ (pu)}$$

değerleri bulunur.

Her iki yoldan gidilerek aynı kompanzator süseptansları bulunmuştur. Kompanzasyondan sonra Şekil 4.8'e göre yük ve kompanzatorün birlikte süseptansları şöyle olacaktır.

$$Y_{ab} = 2 + j(4 - 2.845) = 2 + j1.155 \text{ (pu)}$$

$$Y_{bc} = 1 + j(3 - 3.577) = 1 - j0.577 \text{ (pu)}$$

$$Y_{ca} = 3 + j(5 - 5.577) = 3 - j0.577 \text{ (pu)}$$

Tekrar (4.15) ifadeleri ile hat akımları bulunursa:

$$I_a = 6 \angle 0 \text{ (pu)} , \quad I_b = 6 \angle 240 \text{ (pu)} , \quad I_c = 6 \angle 120 \text{ (pu)}$$

değerindedir. Hat akımları hem dengeli bir yapıda hem de gerilim fazörleri ile aynı doğrultudadır. Yani yük için gereken reaktif güç kompanzator tarafından sisteme verilmiş, güç faktörü 1 yapılmıştır.

Kompanzasyon öncesi ve sonrasında gerilimleri ve simetrik bileşenlerini incelemeye fayda vardır. Bunun için Şekil 4.9'daki gibi kaynak ile yük arasındaki hat empedansını belirtmek gerekir. Direnci ihmal ederek hattın sadece reaktansı olduğu varsayılın ve

değeri $X=1(\text{pu})$ seçilsin. V_a, V_b, V_c dengeli kaynak gerilimleri ve V_{La}, V_{Lb}, V_{Lc} ise yük uçlarındaki faz gerilimleri olarak seçilebilir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilirler.

$$V_a = 1 \angle 0 \text{ (pu)} , \quad V_b = 1 \angle -120 \text{ (pu)} , \quad V_c = 1 \angle 120 \text{ (pu)}$$

Yük uçlarındaki gerilimler, fazör ifadeler ile;

$$V_{La} = V_a - JX I_a \quad (4.55a)$$

$$V_{Lb} = V_b - JX I_b \quad (4.55b)$$

$$V_{Lc} = V_c - JX I_c \quad (4.55c)$$

şeklinde yazılabilirler. Kompanzasyondan önceki hat akımları (4.55)'de kullanılırsa yük uçlarındaki gerilimler;

$$V_{La} = 13.628 - J8.357 \text{ (pu)}$$

$$V_{Lb} = -9.962 - J6.524 \text{ (pu)}$$

$$V_{Lc} = -3.666 - J14.880 \text{ (pu)}$$

ve simetrik bileşenleri ;

$$V_{La0} = 0$$

$$V_{La1} = 12.989 - J5.985 \text{ (pu)}$$

$$V_{La2} = 0.636 - J2.360 \text{ (pu)}$$

olacaktır. Yük uçlarındaki gerilimler dengesizdir. Kompanzasyon sonrasında yük uçlarındaki gerilimler (4.55) denklemleri kullanılarak aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$V_{La} = 1 - j6 \text{ (pu)}$$

$$V_{Lb} = -5.696 - j2.134 \text{ (pu)}$$

$$V_{Lc} = 4.696 - j3.865 \text{ (pu)}$$

Yeni durumda simetrik bileşenler için,

$$V_{La0} = 0, \quad V_{La1} = 1 - j6, \quad V_{La2} = 0 \text{ (pu)}$$

ifadeleri bulunur (El -Sadek 1987).

Kompanzasyona gerilimler açısından bakılırsa, kompanzasyon sonucunda negatif bileşen gerilimi sıfır olmuş (fazlar dengeli) ve yük uçlarındaki gerilimler dengeli bir yapı oluşturan pozitif bileşen gerilimden meydana gelmiştir.

Üç fazlı üçgen bağlı dengesiz bir yükün, güç faktörünün iyileştirilmesi için gerekli kompanzasyon süseptanslarını hesaplayan bilgisayar programı aşağıda verilmektedir. Uygulanan gerilimler ve yük admitansları birim değerdedir (pu).

Şebeke gerilimleri; $V_a = 1 \angle 0^\circ$, $V_b = 1 \angle -120^\circ$, $V_c = 1 \angle 120^\circ$ ve üçgen bağlı yük admitansları, $Y_{ab} = 2 + j4$, $Y_{bc} = 1 + j3$ ve $Y_{ca} = 3 + j5$ şeklindedir.

Program Simetrik Bileşenler;

Uses Crt;

Var Yabr, Yabs, Ybcr, Ybcs, Ycar, Ycas:Real;

Bab, Bbc, Bca, Gca, Gbc, Gab, Babk, Bbck, Bcak:Real;

Iar, Ias, Ibr, Ibs, Icr, Ics:Real;

Procedure Hat (Yabr, Yabs, Ybcr, Ybcs, Ycar, Ycas:Real);

Begin

Iar:=(Yabr*1.5-Yabs*0.866)+(Ycar*1.5+Ycas*0.866);

Ias:=(Yabs*1.5+Yabr*0.866)+(Ycas*1.5-Ycar*0.866);

Ibr:=(Ybcs*1.732)-(Yabr*1.5-Yabs*0.866);

Ibs:=(-Ybcr*1.732)-(Yabs*1.5+Yabr*0.866);

Icr:=(-Ycar*1.5-Ycas*0.866)-(Ybcs*1.732);

Ics:=(-Ycas*1.5+Ycar*0.866)+(Ybcr*1.732);

```

Writeln(' Ia=',Iar:7:3,' + j(',Ias:7:3,' )');
Writeln(' Ib=',Ibr:7:3,' + j(',Ibs:7:3,' )');
Writeln(' Ic=',Icr:7:3,' + j(',Ics:7:3,' )');

```

End;

```

Procedure Ref (Iar,Ias,Ibr,Ibs,Icr,Ics:Real);
  Var Ia1r,Ia1s,Ia2r,Ia2s:Real;

```

Begin

```

Ia1r:=(Iar+(-0.5*Ibr-0.866*Ibs)+(-0.5*Icr+0.866*Ics))/3;
Ia1s:=(Ias+(-0.5*Ibs+0.866*Ibr)+(-0.5*Ics-0.866*Icr))/3;
Ia2r:=(Iar+(-0.5*Ibr+0.866*Ibs)+(-0.5*Icr-0.866*Ics))/3;
Ia2s:=(Ias+(-0.5*Ibs-0.866*Ibr)+(-0.5*Ics+0.866*Icr))/3;

```

```

Writeln(' Ia0=',0:7);
Writeln(' Ia1=',Ia1r:7:3,' + j(',Ia1s:7:3,' )');
Writeln(' Ia2=',Ia2r:7:3,' + j(',Ia2s:7:3,' )');

```

End;

Begin

```

Textcolor(3);
Clrscr;
Writeln('      üç fazlı üçgen bağlı simetrisiz bir yükün dengeli hale getirilmesi ve
      simetrik bileşenlerle incelenmesi');

```

```

Gotoxy(10,3);
Write('a-b Fazlarına bağlı Yab admitansının reel kısmı=');
Readln(Yabr);

```

```

Gotoxy(10,4);
Write('a-b Fazlarına bağlı Yab admitansının sanal kısmı=');
Readln(Yabs);

```

```

Gotoxy(10,5);
Write('b-c Fazlarına bağlı Ybc admitansının reel kısmı=');
Readln(Ybcr);

```

```

Gotoxy(10,6);
Write('b-c Fazlarına bağlı Ybc admitansının sanal kısmı=');
Readln(Ybcs);

```

```

Gotoxy(10,7);
Write('c-a Fazlarına bağlı Yca admitansının reel kısmı=');
Readln(Ycar);

```

```

Gotoxy(10,8);
Write('c-a Fazlarına bağlı Yca admitansının sanal kısmı=');
Readln(Ycas);

Textcolor(4);
Write('Hat Akımları:':44);
Hat(Yabr,Yabs,Ybcr,Ybcs,Ycar,Ycas);

Textcolor(2);
Write('Referans Akımların Simetrik Bileşenleri:':44);
Ref(Iar,Ias,Ibr,Ibs,Icr,Ics);

Textcolor(5);
Write('Yüke Bağlanacak Kompanzasyon Suseptansları:':44);

Babk:=-Yabs+(Ycar-Ybcr)/1.73;
Bbck:=-Ybcs+(Yabr-Ycar)/1.73;
Bcak:=-Ycas+(Ybcr-Yabr)/1.73;

Writeln(' Bab= j(',Babk:7:3,')');
Writeln(' Bbc= j(',Bbck:7:3,')');
Writeln(' Bca= j(',Bcak:7:3,')');

Yabs:=Yabs+Babk;
Ybcs:=Ybcs+Bbck;
Ycas:=Ycas+Bcak;

Textcolor(4);
Write(' Sistem Gerçek Akımları:':44);
Hat (Yabr,Yabs,Ybcr,Ybcs,Ycar,Ycas);

Textcolor(2);
Write('Referans Akımların Simetrik Bileşenleri:':44);
Ref(Iar,Ias,Ibr,Ibs,Icr,Ics);
Readln;

End.

```

Programın çalıştırılması ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir:

Üç fazlı üçgen bağlı simetrisiz bir yükün dengeli hale getirilmesi ve simetrik bileşenlerle incelenmesi

- a-b Fazlarına bağlı Y_{ab} admitansının reel kısmı =2
- a-b Fazlarına bağlı Y_{ab} admitansının sanal kısmı =4
- b-c Fazlarına bağlı Y_{bc} admitansının reel kısmı =1
- b-c Fazlarına bağlı Y_{bc} admitansının sanal kısmı =3
- c-a Fazlarına bağlı Y_{ca} admitansının reel kısmı =3
- c-a Fazlarına bağlı Y_{ca} admitansının sanal kısmı =5

Hat Akımları:

$$I_a = 8.366 + j(12.634)$$

$$I_b = 5.660 + j(-9.464)$$

$$I_c = -14.026 + j(-3.170)$$

Referans Akımların Simetri Bileşenleri:

$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = 6.000 + j(12.000)$$

$$I_{a2} = 2.366 + j(0.634)$$

Yüke Bağlanacak Kompanzasyon Süseptansları:

$$B_{ab} = j(-2.844)$$

$$B_{bc} = j(-3.578)$$

$$B_{ca} = j(-5.578)$$

Sistemin Gerçek Akımları:

$$I_a = 5.998 + j(0.001)$$

$$I_b = -3.000 + j(-5.198)$$

$$I_c = -2.998 + j(5.197)$$

Referans Akımların Simetri Bileşenleri:

$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = 6.000 + j(0.000)$$

$$I_{a2} = -0.001 + j(0.001)$$

5. STATİK VAR KOMPANZATÖRLER

5.1. Giriş

Kondansatörler yapıları gereği bir alternatif akım güç sistemine bağlandıklarında, reaktif güç üretir, reaktörler (bobinler) ise reaktif güç tüketir. Bunlar reaktif gücün kontrolünde mekanik anahtarlar ile beraber kullanılmaktadır. Sürekli değişim gösteren var (volt amper reaktif) üretimi ve tüketimi, önceleri aşırı veya düşük uyarılmış senkron makineler ile ve sonraları reaktörler ve bunlara bağlı kondansatörler ile yapılmaktadır. Özellikle son yıllarda yüksek güçlü yarı iletkenlerin üretilmesi ile, reaktif gücün kontrolünde gelişmeler sağlanmıştır. Yarı iletkenlerin kullanılması ile gerçekleştirilen sistemlere “statik var kompanzatorleri” adı verilir.

Değişken reaktif güç sağlanmasında senkron reaktör kullanımı bir çözümdür. Bilindiği gibi, büyük güçlü enerji sistemi ile paralel çalışan bir senkron makinenin uyarma akımı değiştirilerek reaktif güç denetimi yapılabilir. Yükün aktif ve reaktif güçleri sürekli ölçülüp uyarma akımı geri beslemeli olarak ayarlanırsa, güç katsayısının sabit kalması sağlanmış olur. Dinamik kompanzasyon adı verilen bu yöntemin aşağıdaki sakıncaları vardır:

- Döner makina kullanılması ve eylemsizlik momentinin bulunması,
- Cevap süresinin yeterince yüksek olmayışı,
- Üç fazda ayrı ayrı denetim olanağının bulunmayışı (Soysal 1989).

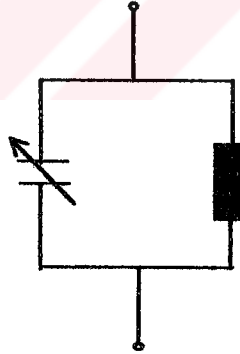
Bu yüzden dinamik kompanzasyon düzenekleri yaygın biçimde kullanılmamaktadır. Dinamik kompanzasyonun yukarıda sayılan sakınca ve kısıtlamaları tristörlü devreler ile ortadan kaldırılmıştır. Besleme sistemine tristörler üzerinden denetimli olarak reaktif güç veren statik var kompanzasyonu düzenekleri, endüstride özellikle güç katsayısının hızlı değiştiği uygulamalarda dinamik kompanzasyona tercih edilmektedir.

Statik var kompanzatorler, genelde ark ocakları ve demiryolu şebekeleri gibi yüksek güç sistemlerinde kullanılırlar. Güç iletim sistemlerinde gerilim destekleyici, endüstriyel yüklerde güç faktörünü düzeltmek ve yükü dengelemek amacı ile kullanım alanı bulurlar (Best and La Parra 1996).

İlk kurulan ve hala çalışan statik var kompanzatorlerden biri, Amerika'da, 40 MVAR gücündeki Minnesota Güç Merkezi Shannon Alt İstasyonu (1978)'dur. 1978'den bu yana statik var kompanzatorlerin güç sistemlerinde uygulanmasında oldukça büyük bir artış vardır.

5.2. Statik Var Kompanzatorlerin Temel Özellikleri

Statik var kompanzatorler temel olarak, ayarlanabilen bir reaktör ile kondansatörden oluşmaktadır. Şekil 5.1'de ideal bir kompanzator görülmektedir. İdeal kompanzator, sürekli reaktif güç ayarlaması yapabilen, cevap gecikmesi olmayan ve sınırsız bir aralıkta çalışabilen cihaz olarak tanımlanabilir. Pratikte, sınırsız ayarlama yapabilen kompanzatorün gerçekleştirilmesi imkansızdır.



Şekil 5.1. İdeal kompanzator (Miller 1982)

Statik kompanzatorler; güvenilirlik, hızlı cevap verme ve işletme esnekliği gibi özelliklere sahiptir. Kompanzatorün reaktif gücü, terminal gerilimindeki küçük bir değişikliğe hızlı cevap verecek şekilde değişmelidir. Özellikle fliker etkisini azaltmak, ancak çok hızlı cevap yeteneğine sahip kompanzator tipleriyle gerçekleştirilebilir.

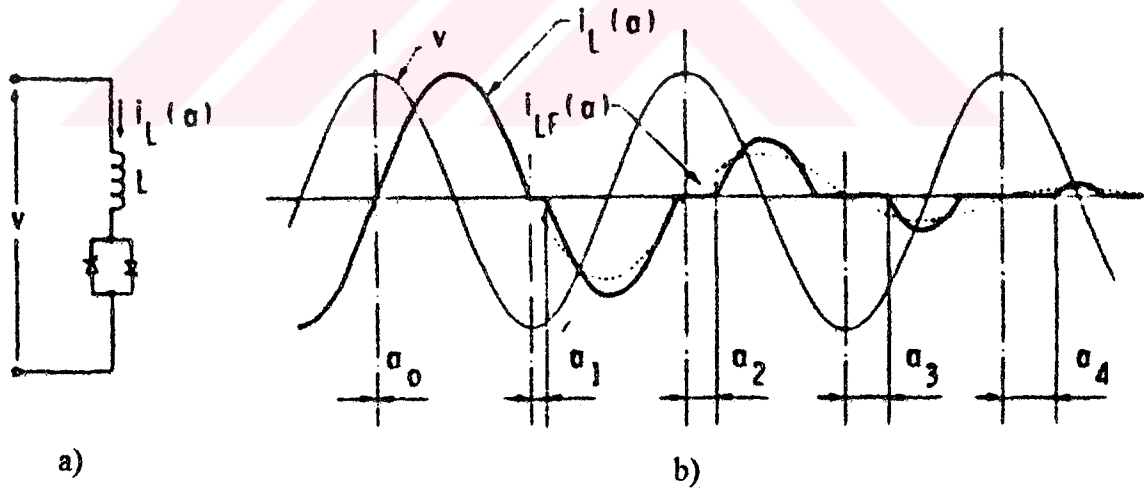
Reaktif akımın değeri ileri veya geri güç faktöründe, kompanzatörün çalışma prensibi ve tasarım özellikleriyle sınırlıdır.

5.3. Statik Var Kompanzatörlerin Sınıflandırılması

Kondansatörlerin ve reaktörlerin uygun bağlantı kombinasyonları ile çok çeşitli kompanzatör tipleri geliştirilmiştir. Uygun olanının seçilmesi bazı faktörlere bağlıdır. Bunlar; reaktif güç gereksinimi, kayıp karakteristiği, harmonik üretimi ve maliyetidir. Aşağıda statik var kontrolü için kullanılan yüksek güçlü anahtarlı devreler incelenmektedir.

5.3.1. Tristör kontrollü reaktör

Tristör kontrollü reaktörler (TKR), endüktif kaynağın hızla değiştirilebildiği ayarlı bir bobin gibi davranır. Tristör kontrollü reaktörün temel prensibi Şekil 5.2'deki tek fazlı devreden anlaşılabilir. Devre, bir reaktör ile birbirine ters paralel bağlı iki tristörden oluşur.



Şekil 5.2 a) Tristör kontrollü reaktör

b) Reaktöre ait akım ve gerilim dalga şekilleri (Gyugyi 1989)

Şekil 5.2'deki reaktörün akımı maksimum değerden sıfıra kadar, tristörlerin ateşleme açısı (α) kontrolü ile ayarlanabilir. Her yarım periyotta, uygulanan gerilimin tepe noktasına göre, tristörün ateşleme anı geciktirilerek, akım iletme süresi kontrol edilir.

$\alpha=90^\circ$ için akım en büyük değerini alır ve $\alpha=180^\circ$ için sıfır olur. Reaktif güç ayarı, gerçekte akım iletme süresi ile orantılıdır.

Reaktörün devreye sokulması için, tristörün kapısına bir darbe verilirse tristör iletme geçer ve devreden bir i_L akımı akar. Eğer reaktör devresine $v=V_m \sin\omega t$ şeklinde bir gerilimin uygulandığı kabul edilirse, reaktör uçlarındaki gerilim,

$$v_L = L \frac{di}{dt} \quad (5.1)$$

formülü ile ifade edilir. Devreden geçen akım, herhangi α ateşleme açısı için,

$$i_L = \frac{V}{\omega L} \int_{\alpha}^{\omega t} \sin\omega t dt \quad (5.2)$$

$$i_L = \frac{V}{\omega L} (\cos\alpha - \cos\omega t) \quad (5.3)$$

olacaktır.

Şekil 5.2b'de reaktör akımı i_L ve bunun temel bileşeni i_{LF} 'nin değişik α ateşleme açılarına göre ($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) değişimi görülmektedir (Gyugyi 1988).

Reaktör akımının temel bileşeninin etkin değeri,

$$I_{LF} = \frac{V}{\omega L} \left[1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right] \quad (5.4)$$

olarak verilebilir. Burada V ; uygulanan gerilimin genliği, L ; reaktörün endüktansı ve ω gerilimin açısal hızıdır.

Şekil 5.2b'de görüldüğü gibi, iletim açısının kontrolü sinüsoidal olmayan akımların oluşması ile sonuçlanır. Akımın dalga şekli 3.5.7.9.11.13.....gibi sıralı harmoniklerin

eklenmesinden oluşmuştur. Bu harmoniklerin genlikleri α ateşleme açısına bağlıdır (Mohan et al 1995).

Akımın pozitif ve negatif dalga biçiminin aynı olduğu durumda, sadece tek nolu harmonikler üretilir. Harmoniklerin genliği,

$$I_{Ln} = \frac{V}{\omega L} \frac{4}{\pi} \left[\frac{\sin \alpha \cos(n\alpha) - n \cos \alpha \sin(n\alpha)}{n(n^2 - 1)} \right] \quad (5.5)$$

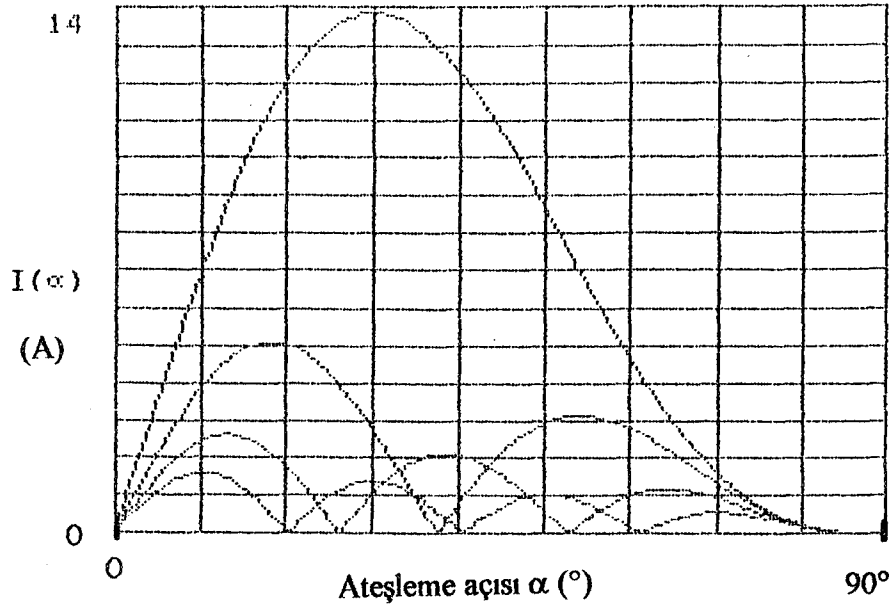
denklemleri ile ifade edilir. ($n=2k+1$, $k=1,2,3,\dots$)

Tablo 5.1'de harmonik akımların maksimum genliği, 23. harmoniğe kadar temel akımın yüzdesi olarak verilmektedir.

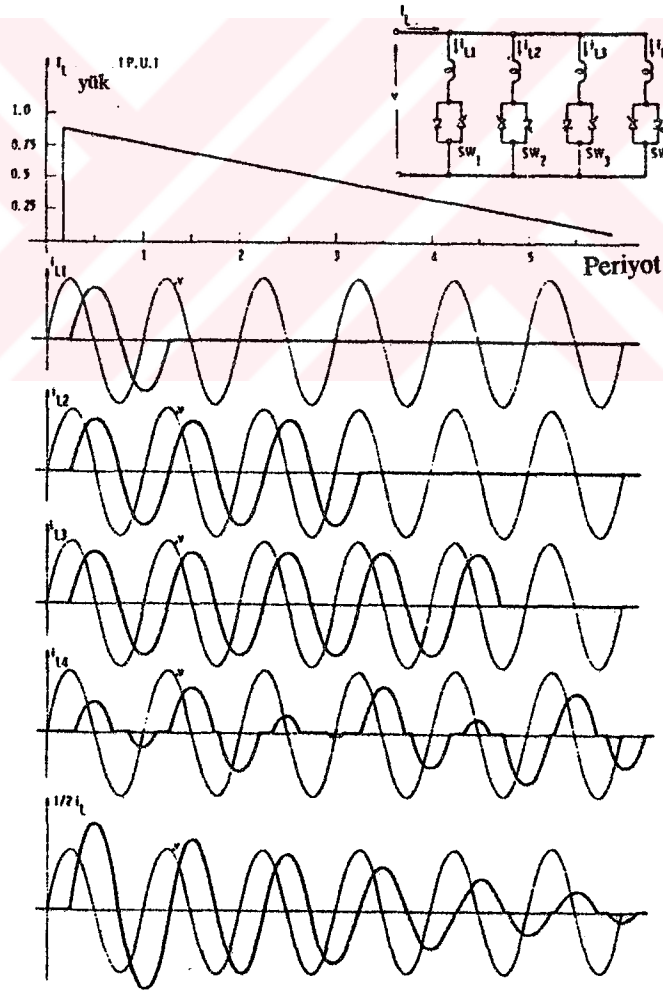
Tablo 5.1. Harmonik akımların maksimum genliklerinin temel akıma göre yüzdeleri

Harmonik derecesi	Temel akıma göre oranı %
1	100
3	13.78
5	5.05
7	2.59
9	1.57
11	1.05
13	0.75
15	0.57
17	0.44
19	0.35
21	0.29
23	0.24

Şekil 5.3'de ise 3., 5., 7. ve 9. harmoniklerin genliklerinin α 'ya bağlı olarak değişimleri görülmektedir



Şekil 5.3. 3., 5., 7. ve 9. harmoniklerin ateşleme açısına göre genliklerinin değişimi

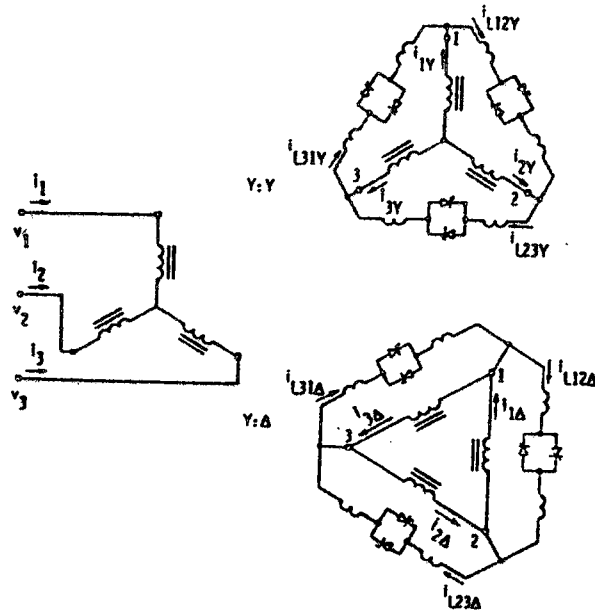


Şekil 5.4. Reaktör gruplarının sıralı kontrolü ile harmoniklerin azaltılması

Tristör kontrollü reaktörün ürettiği harmoniklerin genliği iki metod ile azaltılabilir. İlk metod, tek bir büyük reaktör kullanmak yerine, her biri toplam değerin $1/n$ 'i kadar n tane reaktör grubu kullanmaktır. Bu düzenlemede, n adet reaktör grubundan sadece biri tristör ile belli ateşleme açısı verilerek kontrol edilir. Geri kalan (n-1) reaktörün her biri, toplam reaktif güç çıkışına göre devrede veya devre dışındadır. Şekil 5.4'de dört reaktör için dalga şekilleri verilmektedir. Her harmoniğin genliği n faktörü ile azalmış olur. Bu metod dengesiz sistemlerde uygulanır.

Diğer metod ise 12 darbeli düzenleme diye adlandırılır. Bu metotta iki adet üçgen bağlı tristör kontrollü reaktör kullanılmaktadır. Reaktörlerden biri, kaynak transformatörün yıldız bağlı, diğeri üçgen bağlı sekonder sargılarına irtibatlıdır. Transformatörün iki sargı gerilimi arasındaki 30° 'lik faz farkı nedeniyle, 5., 7., 17., 19., ...; ya da genel olarak $6(2k-1)-1$ ve $6(2k-1)+1$, $k=1,2,\dots$ dereceden harmonik akımlar ortadan kalkar. Böyle bir düzenek Şekil 5.5'de görülmektedir. Bu metotta harmonik iptalinin etkiliği, kontrolün doğru yapılması ve devrenin dengeli olmasına bağlıdır.

Üç fazlı sistemlerde üç adet tek fazlı tristör kontrollü reaktör üçgen bağlı olarak kullanılır. Böylece 3 ve 3'ün katı olan harmonikler üçgen bağlantının içinde kalır ve şebekeye geçmez (Gyugyi and Taylor 1980).

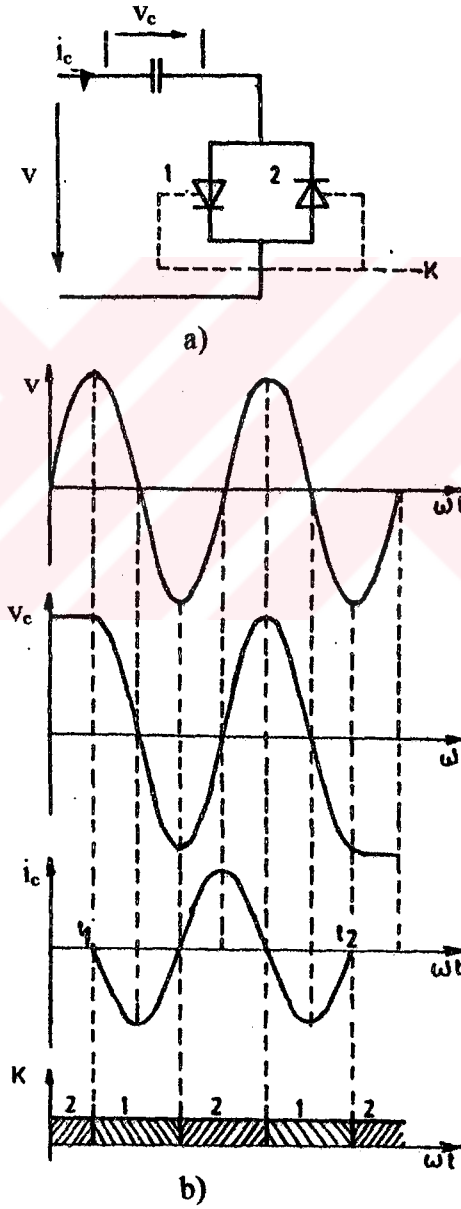


Şekil 5.5. 12 darbeli bağlantı (Gyugyi and Taylor 1980)

5.3.2. Tristör anahtalamalı kondansatör

Tristör anahtalamalı kondansatör (TAK) ile yapılan kompanzasyonda, her bir faza isabet eden toplam kondansatör birbirine eşit bir çok ünitelere ayrılmıştır. Her bir fazda yükün çektiği değişken endüktif gücün değerine göre kondansatör üniteleri tristörler aracılığı ile kademeli olarak devreye sokulup çıkarılırlar.

Şekil 5.6.a'da tek fazlı tristör anahtalamalı kondansatörün temel bağlantısı görülmektedir.



Şekil 5.6.a) Tristör anahtalamalı kondansatör

b) Kondansatörün gerilim ve akım değişimleri

Devre sabit bir kondansatör ve ters paralel bağlı iki tristörden oluşur. Kondansatörler devreye sokulurken aşırı gerilimlerin meydana gelmemesi için gerekli tedbirler alınmalıdır. Bu amaçla hazır bekleyen kondansatörler, alternatif şebeke geriliminin tepe değerine eşit bir doğru gerilim ile doldurulurlar. Tristörler aracılığı ile kondansatörler, gerilimin tepe değerinde devreye sokulurlar. Böylece kondansatör akımın sıfırdan geçtiği andan itibaren akım geçirmeye başlar. Aynı şekilde tristör aracılığı ile kondansatör yine, akımın sıfırdan geçtiği anda devreden çıkarılır. Bu sayede geçici olaylar ve aşırı gerilimler önlenmiş olur.

Tristör anahtarlamalı kondansatörün gerilimi ve akımı Şekil 5.6.b'de görülmektedir. Burada v_s şebeke gerilimini, v_c kondansatör uçlarındaki gerilimi, i_c devreden geçen kapasitif akımı, t_1 kondansatörlerin devreye girdiği anı, t_2 ise kondansatörlerin devreden çıktığı anı göstermektedir.

Kondansatör devresine $v=V_m \sin \omega t$ şeklinde bir sinüsoidal gerilim uygulandığında kondansatör uçlarındaki gerilim,

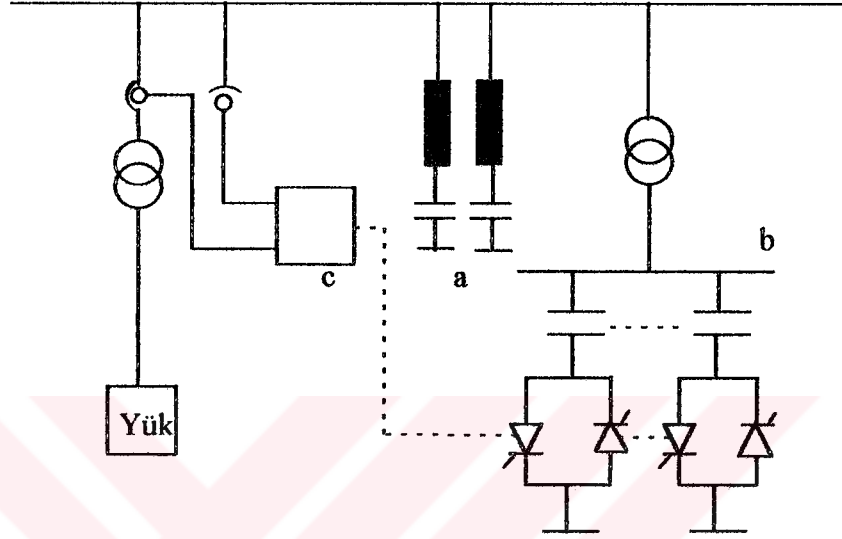
$$v_c = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (5.6)$$

değerine eşit olur. Devreden geçen akım ise,

$$i_c = \omega.C.V.\cos \omega t \quad (5.7)$$

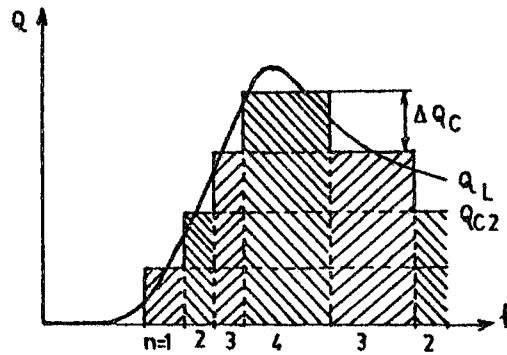
bağıntısına eşittir. Gerilim tepe değerinde iken tristörün devresine bir sinyal verilir ise, tristörden i_c akımı akar. Sinyal kaldığı sürece, akım sinüsoidal olarak geçmeye devam eder. Gerilim tepe değerinde iken sinyal kaldırılırsa, akım sıfırdan geçerken sıfır değerinde kalır. Reaktif güç değişimi karşısında kondansatörün reaksiyon zamanı, ölçme ve faaliyete geçme zamanlarının toplamına eşittir. Reaktif gücün tespiti için ölçme süresi teoride bir periyoda eşittir. Fakat pratikte görülmüştür ki, yarım periyot esnasında yapılan ölçü ile de yeteri kadar hassas sonuç elde edilmektedir.

Şekil 5.8'de tristör anahtarlama ile yapılan kompanzasyona ait bir kutuplu bağlantı şeması görülmektedir. Şekildeki kompanzasyonda tristör anahtarlama ile kondansatörün yanı sıra sabit kondansatörler de yer almaktadır. Endüktif yük gücünün zamana bağlı olarak değişimi ve buna göre devreye sokulup çıkarılan kondansatör üniteleri Şekil 5.9'da verilmektedir.



Şekil 5.8. Tristör anahtarlama ile yapılan kompanzasyon

- a- Sabit kondansatör (Q_{C1})
- b- Grup kondansatörler (Q_{C2})
- c- Ölçme ve kumanda düzeni



Şekil 5.9. Endüktif gücün, tristör anahtarlama ile kompanzasyonu

- Q_L : Değişken endüktif güç
- Q_{C2} : Kademeli kondansatör gücü
- ΔQ_C : Kondansatör kademesi

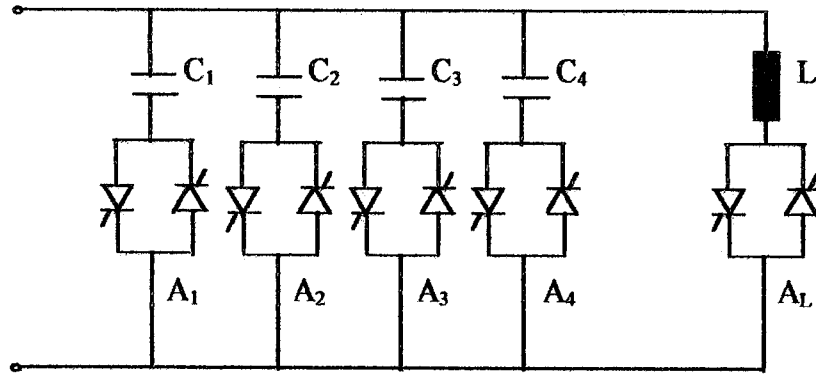
Burada her bir kondansatör kademesinin değeri o şekilde tespit edilir ki, her bir kademenin devreye sokulup çıkarılması sırasında, bağlantı noktasındaki gerilim değişmesi, sınırın altında yani yaklaşık %0.25 mertebesinde kalması sağlanmalıdır.

Tam yükte çekilen ortalama reaktif güç Q_0 ise, güç katsayısı yaklaşık 0.7 ile çalışırken, reaktif gücün $Q_0 (1 \pm 0.7)$ değerleri arasında değiştiği kabul edilsin. Bu durumda $Q_{C1}=Q_0 (1-0.7) = 0.3 Q_0$ değerinde sabit bir kondansatör tesis edilir ve geri kalan $Q_{C2}=1.4 Q_0$ değerindeki kondansatör devreye sokulup çıkarılır.

Bu kompanzasyon sistemi, özellikle dengesiz reaktif güç tüketiminin beklendiği zamanlarda yararlı olmaktadır. Her faz ayrı ayrı kompanze edilebilir. Ancak teoride basit olmasına rağmen bu sistemin bazı sakıncaları vardır. Her kondansatör grubu, ayrı tristör grubu gerektirir ve alçaltıcı transformatör kullanılmayan yüksek gerilim uygulamalarında ekonomik değildir. Kararlı durumda, iletimde olmayan tristörler üzerinde uygulanan gerilim tepe değerinin iki katı kadar gerilim bulunur.

5.3.3. Tristör anahtarlama kondansatör-tristör kontrollü reaktör

Tristör anahtarlama kondansatör- tristör kontrollü reaktör (TAK-TKR), daha önce açıklanan iki kompanzasyonun birleşiminden oluşur. Güç sistemlerinde sahip olduğu düşük kayıplar nedeniyle geliştirilmiştir. Şekil 5.10'da tek fazlı bağlantı şekli verilmektedir.



Şekil 5.10. TAK-TKR'ün bağlantı şekli (Gyugyi and Taylor 1980)

Kompanzatör n adet kondansatör ve bir adet reaktörden oluşmuştur. Böylece toplam kapasitif çıkış n adet aralığa bölünmüştür. Burada n sayısı, çalışma gerilimi, maksimum kompanzasyon ihtiyacı, tristörlerin taşıyacağı akım değeri ve fiyat göz önüne alınarak saptanır.

Tristör kontrollü reaktörün akımı, çıkışta istenen kapasitif (veya endüktif) etkiyi verecek şekilde kontrol edilir. Sistemin endüktif özelliği ek reaktör grupları yerleştirilerek değiştirilebilir.

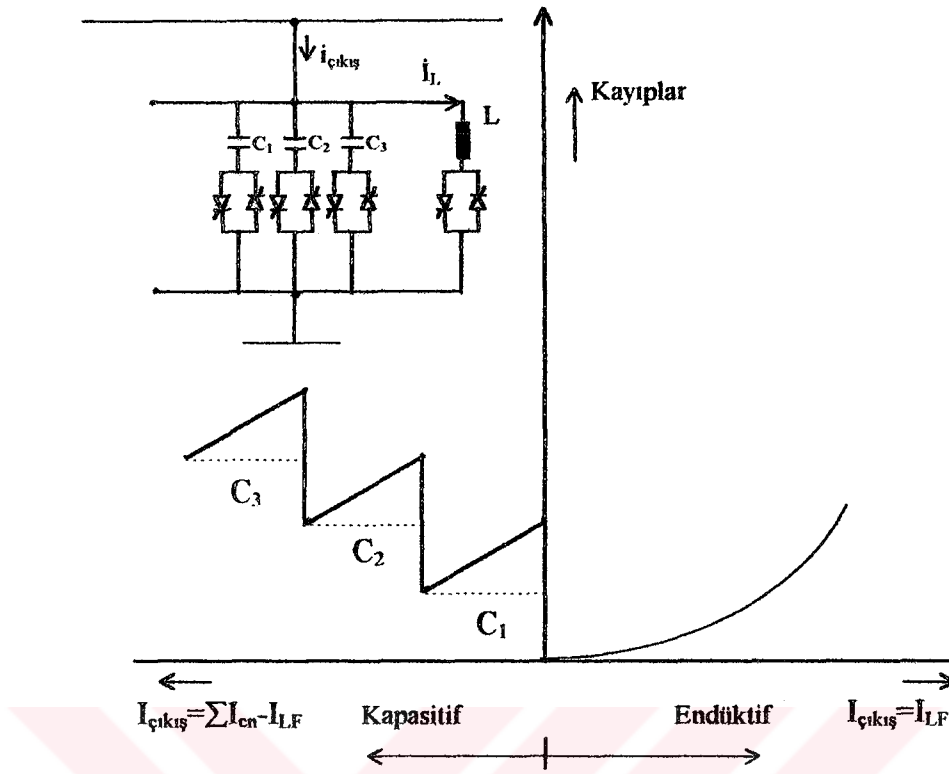
Pratikte, her kondansatör grubuna seri reaktörler bağlanabilir. Böylece muhtemel bir darbe veya aşırı akım ile, güç sisteminin empedansından dolayı meydana gelebilecek rezonans olayları önlenmiş olur. Bu tip bir kondansatör, endüktif bir çıkışı, sıfır ile maksimum bir değer arasında ayarlayabilir.

Kondansatör uçlarındaki gerilim ile güç sisteminin gerilimi birbirine eşit olduğu anda kondansatörler devreye alınırsa, geçici olaylar ortaya çıkmaz. Kondansatör grupları, en fazla yarım periyotluk gecikme içinde devreden çıkarılabilir. Bu kompanzatör tipi de harmonik üretir. Reaktör, kontrol edilebilen toplam gücün küçük bir kısmını teşkil ettiğinden üretilen harmonikler de toplam akımın temel harmoniğine oranla daha küçük olurlar. Bu nedenle özel devre düzenlenmesine veya filtrelere çok fazla ihtiyaç duyulmaz.

Şekil 5.11'de tristör anahtarlamalı kondansatör-tristör kontrollü reaktör sisteminin çıkış karakteristiği ve kayıpları görülmektedir.

Sıfır veya sıfıra çok yakın çıkış durumunda, tüm kondansatör grupları devre dışıdır ve reaktörün akımı sıfır ya da ihmal edilebilir bir değerdedir. Buna bağlı olarak da kayıplar sıfıra çok yakındır.

Şekil 5.11'de her kondansatörün (C_1, C_2, \dots) devreye girmesi ile kayıplar sabit olarak bir miktar artar. Bunun yanı sıra bir de sıfır ile maksimum arasında değişen reaktörün kayıpları vardır. Tüm sistemin kaybı çıkış ile orantılı bir değişim gösterir.



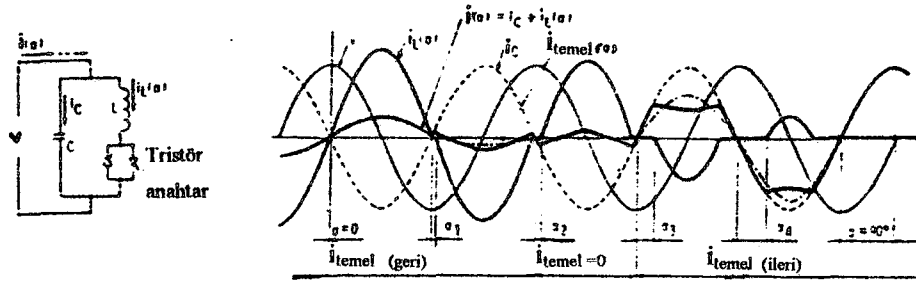
Şekil 5.11. TAK-TKR'ün çıkış ve kayıp karakteristiği (Gyugyi 1988)

5.3.4. Sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktör

Sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktör (SK-TKR) tipi kompanzatorler, endüstride doğrusal olmayan yüklerin güç faktörünü düzeltmede yaygın olarak kullanılır. SK-TKR 'de kondansatörler yük tarafından tüketilen maksimum reaktif güce eşit reaktif güç verirler. Kondansatörlerin reaktif gücü Q_C ve yük tarafından tüketilen gerçek reaktif güç arasındaki farkı tristör kontrollü reaktörler karşılar (Blajszczak 1994).

Şekil 5.12.'de SK-TKR'a ait temel devre ve akım, gerilim dalga şekilleri görülmektedir. Şekil 5.12b'den anlaşıldığı gibi reaktör akımı ve toplam kompanze edilen akım, ateşleme açısının kontrolü ile değiştirilebilir.

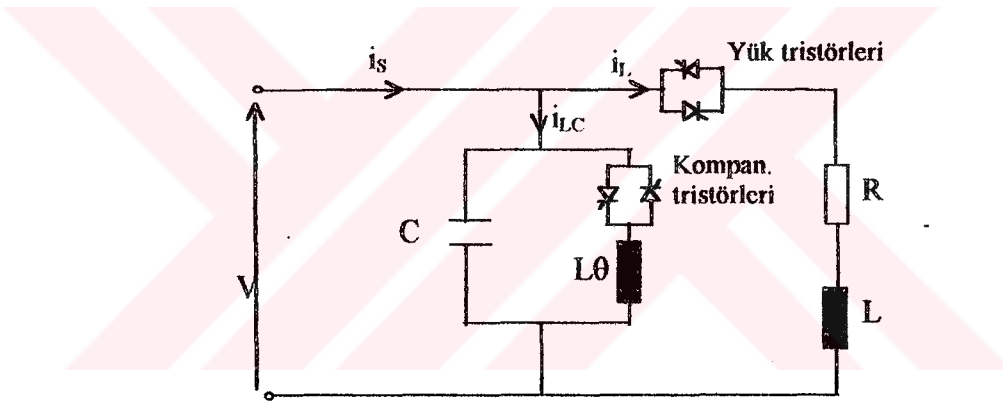
Kapasitif çıkışı azaltmak için reaktörün akımı, α ateşleme açısı azaltılarak yükseltilir. Sıfır çıkış durumunda kapasitif ve endüktif akımlar birbirine eşittir.



Şekil 5.12.a) SK-TKR'ün temel bağlantı şekli

b) Bu kompanzatore ait akım ve dalga şekilleri

Şekil 5.13'de, tristör kontrollü bir yük için basitleştirilmiş devre görülmektedir.



Şekil 5.13. SK-TKR'ün basitleştirilmiş devresi

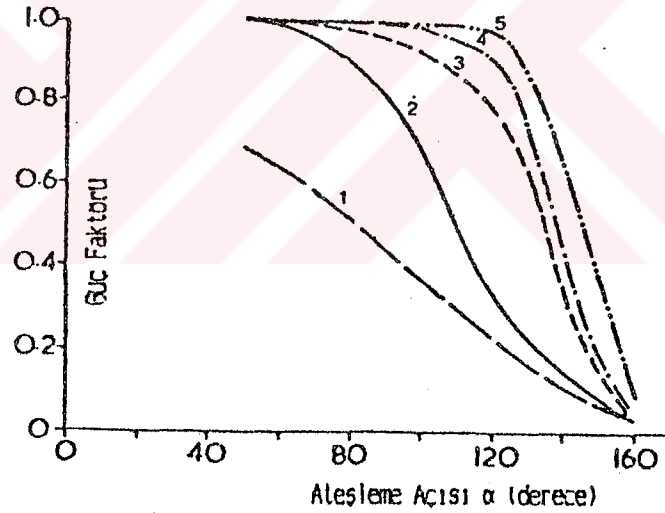
Şekil 5.13'de tristör kontrollü endüktif yük, L endüktansı ve R direncinden oluşmuştur. Kompanzator sabit bir C kondansatörü ile tristör kontrollü L_0 endüktansını içerir. Yük akımının reaktif (geri) temel bileşeni, yükün empdans açısına, ϕ_L ($\phi_L = \tan^{-1} \omega L/R$) ve yük tristörlerinin ateşleme açısı α 'ya bağlıdır. Eğer besleme geriliminin $v = V_m \sin \omega t$ biçiminde değiştiği varsayılırsa, kompanzasyon için;

$$I_L \cdot \sin \phi_L + V \cdot \omega \cdot C \left[\frac{2\theta}{\pi} - 1 - \frac{1}{\pi} \sin 2\theta \right] = 0 \quad (5.8)$$

yazılabilir. Bu denklemde, θ kompanzator tristörlerinin ateşleme açısı, I_L ; yük akımının temel bileşeninin etkin değeri, V ; uygulanan gerilimin etkin değeri, ϕ_{L1} ise terminal gerilimi ile yük akımının temel bileşeni arasındaki faz açısıdır.

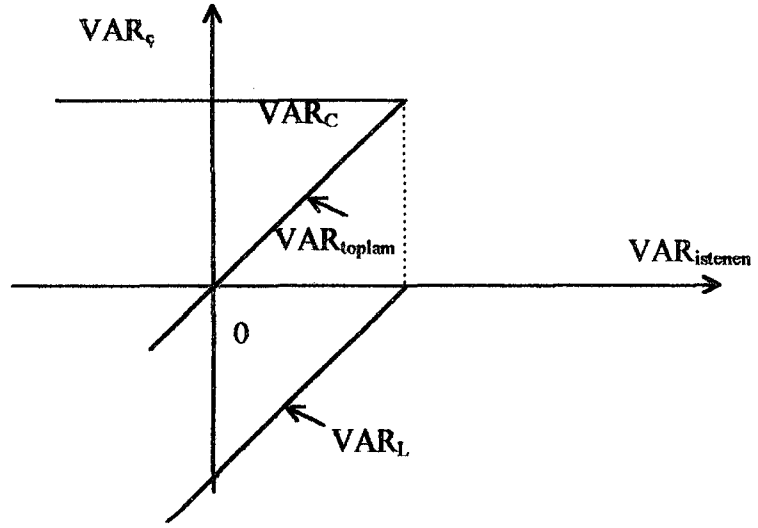
Sistemde üretilen tüm harmonikler; α , θ ve ϕ_L 'nin etkisindedir. Güç faktörü de harmonik akımların etkisi altındadır ve değeri 1'den küçüktür. Şekil 5.14'de ise yük tristörünün ateşleme açısı α ile güç faktörünün değişimi verilmektedir. Burada $\phi_L=45^\circ$ dir.

Şekil 5.14'deki 1 ve 2 nolu eğriler, sırasıyla kompanzasyondan önceki ve sonraki durumu gösterir. 3. eğri 3. harmoniğin sıfır olduğu hali ve 4. eğri de 3. ve 5. harmoniklerin sıfır olduğu durumları gösterir. 5. eğri ise 3., 5. ve 7. harmoniklerin ortadan kaldırılması daha iyi güç faktörü elde edilmesini sağlar.



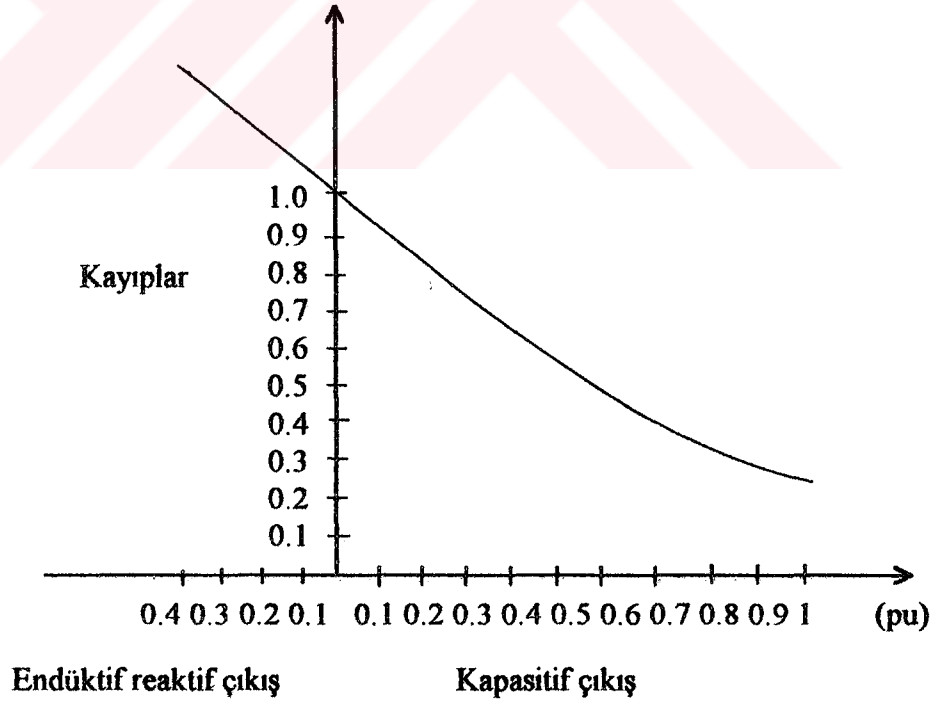
Şekil 5.14. $\phi_L = 45^\circ$ için güç faktörünün α ile değişimi

SK-TKR tipi kompanzatorün çıkış reaktif gücüne karşılık (VAR_C), kayıp karakteristiği onun çalışma prensibi yardımı ile belirlenebilir. Sabit kondansatörün, sabit kapasitif reaktif gücü (VAR_C); reaktörün değişken endüktif reaktif çıkış gücü (VAR_L) tarafından karşılanır. Bu durum Şekil 5.15'de görülmektedir.



Şekil 5.15. SK-TKR'nin reaktif güç karakteristiği

Kondansatör grubu toplam akımı, tristör aracılığı ile reaktörün içine doğru devamlı bir şekilde akar ve kayıplar (yüksüz iken) meydana gelir. Kayıplar kapasitif reaktif çıkış gücünün artması ile birlikte azalır ve bunun tersi olarak, endüktif çıkışın artmasıyla birlikte artar (Şekil 5.16).



Şekil 5.16. SK-TKR'nin çıkış reaktif gücü (birim değer) ve kayıpları arasındaki değişim (Gyugyi and Taylor 1980)

Tablo 5.2’de çeşitli kompanzator tiplerinin özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Anahtarlama düzeneklerinde (TAK) kademeli denetim yapılırken, sabit kondansatörlü-tristör kontrollü reaktör tipi kompanzatorlerde sürekli ve kesintisiz denetim yapılabilmektedir. Buna karşılık, SK-TKR tipi kompanzatorde, TAK tipi kompanzatorde göre harmonikler sisteme çok daha fazla zarar vermektedir. Ancak her tip kompanzator, çeşitli özellikte tasarlanabildiğinden, birinin diğerine göre daha iyi olduğuna dair genel bir karar verilememektedir. Örneğin, reaktif güç tespit edilmeden tristör anahtarlama kondansatörün kayıplarının tristör kontrollü reaktörden daha az olduğunu söylemek anlamsız olacaktır.

Tablo 5.2. Çeşitli kompanzatorlerin özellikleri (Miller 1982)

Nitelik	Senkron Kompanzator	TKR (veya SK-TKR)	TAK (veya TKR-TAK)
Yapı	Dönen Makina	Tristörlü Statik Reaktör	Tristörlü Statik Kondansatör
Reaktif Güç Kapasitesi	İleri / Geri	İleri / Geri	İleri /Geri
Kontrol	Sürekli	Sürekli	Süreksiz
Cevap Hızı	Yavaş	Hızlı, Fakat Sistem Bağımlı	Hızlı, Fakat Sistem Bağımlı
Harmonik	Çok iyi	Filtre Gerekli	İyi (TKR-TAK iken Filtre Gerekli)
Kayıplar	Orta	İyi, Fakat Geri Akımla Artar	İyi, Fakat İleri Akımla Artar
Faz Dengeleme	Sınırlı	İyi	Sınırlı
Aşırı Gerilim Sınırlaması	İyi	Orta	Yok
Kompanzasyon Mükemmelliği	İyi	Çok İyi	İyi (Eğer TKR Eklenirse Çok İyi)
İşletmeye Alma	Yavaş	Hızlı	Hızlı
Dönen Kütle	Var	Yok	Yok

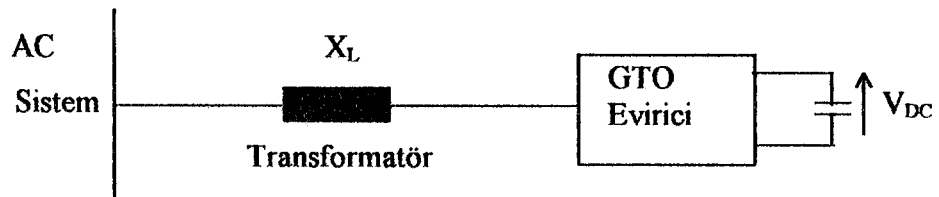
5.4. Gelişmiş Statik Var Kompanzatörler

Elektrik güç sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonunda; senkron kompanzatörler, doymuş reaktörler, anahtarlama kondansatörler ve bobinler sistem gerilimini kontrol etmek için kullanılmaktadır. 1970'lerden sonra, sabit kondansatörlü tristör kontrollü reaktörler (SK-TKR) ya da tristör anahtarlama kondansatörler (TAK) reaktif güç kompanzasyonunda kullanıldılar. Tüm bu sistemlerden sonra, sadece DA tarafta bulunan küçük kondansatörlü gerilim beslemeli evirici (voltage-source inverter) tabanlı statik var kompanzatörler reaktif güç kontrolü için incelenmektedir. Bunlar "Gelişmiş Statik Var Kompanzatörler" (Advanced Static Var Compensator=ASVC) olarak bilinmektedir.

Gelişmiş statik var kompanzatör (GSVK) uygulamalarında, değişik gerilim beslemeli eviriciler içinde çok-fazlı ve çok-seviyeli çeşitleri kullanılmaktadır. Her ikisinde de harmonik bozulmalar en aza indirilirken; anahtarlama stresleri ve anahtarlama kayıplarını azaltmak için anahtarlama frekansı düşük tutulabilir. Çok-fazlı tipi daha karışık transformatör dizisine ihtiyaç gösterdiğinden, çok-seviyeli gerilim beslemeli evirici daha fazla kullanılmaktadır.

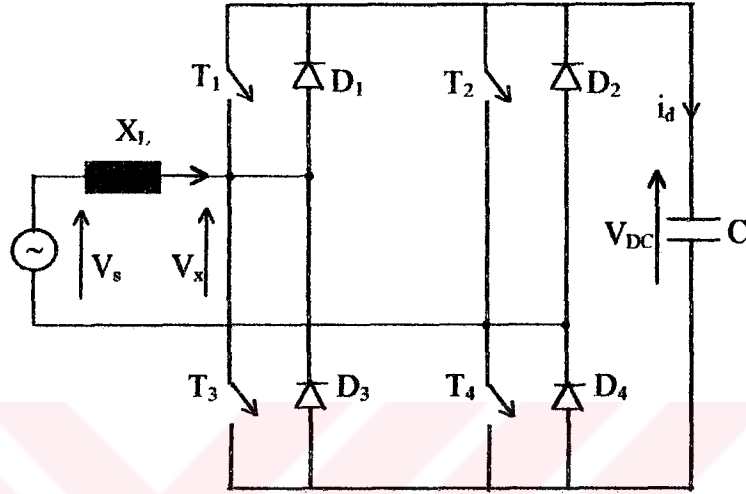
5.4.1. GSVK'ün Çalışma Prensibi

GSVK'ün temel devresi Şekil 5.17'de şematik olarak verilmektedir. Bu devre, reaktörler veya bir transformatör üzerinden AA güç sistemine bağlanan, gerilim beslemeli evirici devresinden oluşmaktadır.

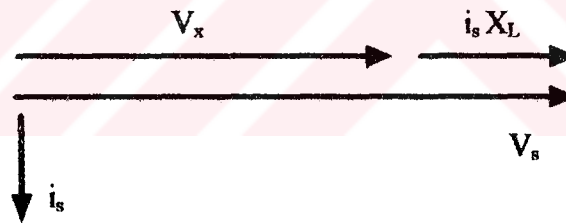


Şekil 5.17. GSVK'ün temel devresi

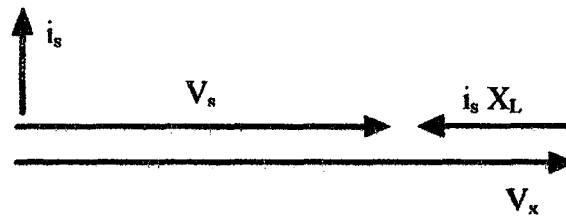
GSVK'ün temel çalışma prensibi Şekil 5.18'de görülen tek fazlı GSVK devresi ve fazör diyagramları yardımı ile açıklanabilir. Genellikle eviricileri beslemek için kullanılan DA güç kaynağı yerine, reaktif gücü hem ürettiği hem de üzerine aldığı için, şarj edilen bir kondansatör konur.



(a)



(b)



(c)

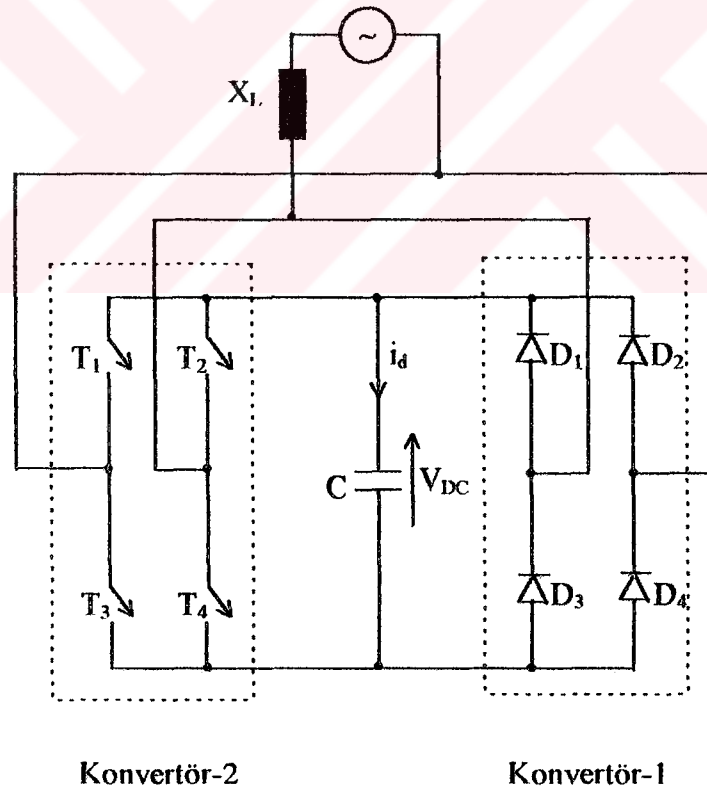
Şekil 5.18a) Bir fazlı GSVK'ün devre şekli (Ekanayake and Jenkins 1996)

b) Geri modlu çalışma için fazör diyagramı

c) İleri modlu çalışma için fazör diyagramı

Şekil 5.18a'daki gerilim beslemeli evirici, yüksek gerilim şebekesine bağlantı için yükseltici transformatörün kaçak reaktansı olan X_L üzerinden sisteme bağlanır. Eğer evirici temel çıkış gerilimi V_x , sistem gerilimi V_s ile aynı fazda ise, evirici içine ve dışına akan hat akımı, şebeke gerilimine daima 90° 'dir. Şekil 5.18b'de görüldüğü gibi temel evirici gerilimi V_x , AC sistem geriliminden daha küçük olduğu zaman, kondansatörün gerilimi düşer ve reaktif güç GSVK tarafından alınır. Diğer yandan V_x gerilimi, sistem geriliminden daha büyük olduğunda reaktif güç GSVK'den sisteme doğru akar. Bu durum ise Şekil 5.18c.'de görülmektedir.

Şekil 5.18a'daki tek fazlı GSVK devresinin ters paralel bağlı iki konvertörden oluştuğu söylenebilir. Devre, Şekil 5.19'da farklı bir açıdan görülmektedir. Bu devrede Konvertör-1, kontrolsüz bir doğrultucu gibi davranır. Konvertör-2 ise inverter olarak çalışır.

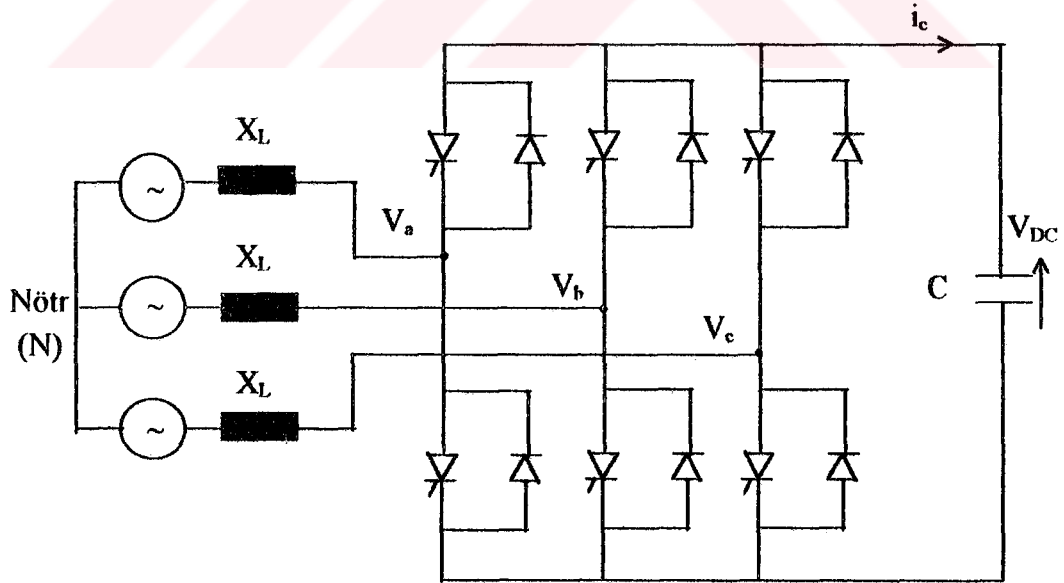


Şekil 5.19. Tek fazlı GSVK devresinin iki konvertör ile gösterimi (Ekanayake and Jenkins 1996)

Konvertör-2 iletimde değilken, C kondansatörü Konvertör-1'in içinden kaynak geriliminin maksimum değerine kadar şarj olur. Eğer Konvertör-2'nin anahtarları GSVK temel çıkış gerilimini elde etmek için çalıştırılırsa, kondansatör üzerindeki gerilim düşer ve böylece reaktif güç GSVK tarafından alınır. Bu olayın tersi, GSVK çıkış gerilimi, sistem geriliminden birkaç derece geride olduğu zaman oluşur. Kondansatör geriliminde bir artış meydana gelir ve GSVK sisteme reaktif güç verir (İleri modda çalışma).

Reaktif gücün; bir parametre ile kontrol edilebilen GSVK tarafından üretildiği veya üzerine alındığı sonucuna varılabilir. Bu parametre, GSVK temel çıkış gerilimi V_x ile AA sistem gerilimi arasındaki faz açısıdır. Bir başka deyişle faz kontrolü yapılarak, AA sistem geriliminin V_s altındaki ve üstündeki evirici gerilimi V_x temel bileşen değerlerinin değiştirilmesi ile, reaktif güç kontrol edilmiş olur.

Evirici çıkışındaki harmonik seviyesini azaltmak için; temel frekans modülasyonu (Fundamental Frequency Modulation=FFM) ve seçimli harmonik yok etme modülasyonu (Selective Harmonic Elimination Modulation=SHEM) gibi teknikler kullanılmaktadır.



Şekil 5.20. Üç fazlı GSVK devresi (Trainer et al 1994)

Üç fazlı GSVK'nın devresi Şekil 5.20'de görülmektedir. Bu devrede de, GTO'ların anahtarlama açıları değiştirilerek, evirici tarafından üretilen gerilimin temel bileşeni, AA sistem geriliminden birkaç derece ileride veya geride yapılır. Bu, güç akışının eviricinin içine veya dışına olmasına ve DA kondansatör geriliminin değerinde değişmelere neden olur.

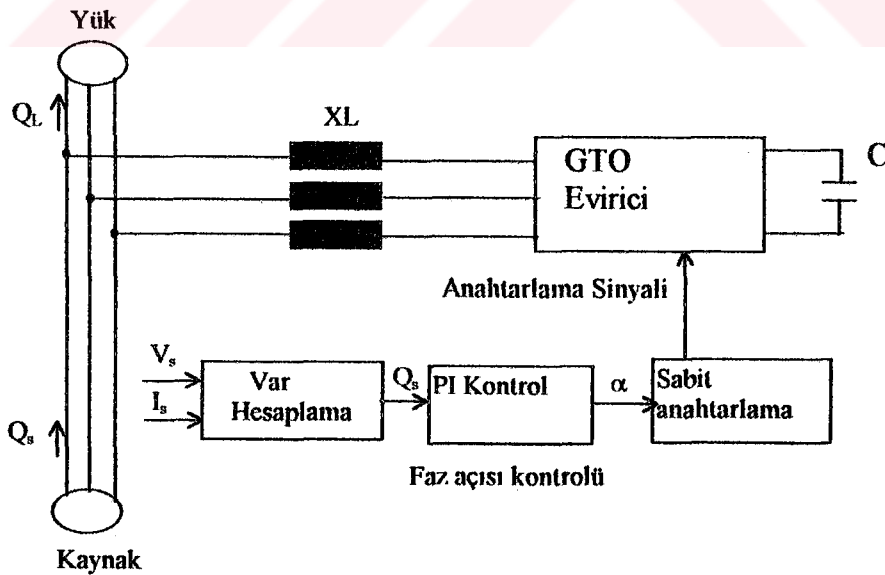
Fourier analizi ile, evirici terminal faz geriliminin etkin değeri ve harmonik bileşenleri bulunur:

Temel etkin terminal gerilimi = $0.45 V_{DC}$

n. harmonik etkin terminal gerilimi = $\frac{0.45 V_{DC}}{n}$

$n=5,7,11,13,\dots(n=6r+1 \quad r = \text{bir tamsayı})$

Şekil 5.21'de ise GSVK'nın blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.21. GSVK'nın blok diyagramı (Cho et al 1995)

5.4.2. GSVK'de GTO Tristörün Kullanılması

Sistemin başarısı, yüksek frekansta yüksek akımları geçirebilen yarı iletken elemanların seçimine bağlıdır. Yüksek akım tutma kabiliyetine sahip olmasından dolayı en uygun yarı iletken GTO (Gate Turn Off) tristördür. Mümkün olan en yüksek anahtarlama frekansı, GTO'nun hızı ve sıcaklık sınırları ile belirlenir. Yüksek güçlü bir GTO'nun çalışma frekansı yaklaşık 6 Khz'dir. Bununla beraber pratikte bu değere ulaşamaz (Chen and Tennakoon 1995).

GTO'nun soğutma düzenlerinin kayıpları vardır. Kesimdeki kayıpları ise, kondansatörün değerinin artırılması ile azaltılabilir. Kesimdeki kayıplar frekansla birlikte artar ve bu yüzden ulaşılabilen maksimum anahtarlama frekansı, kesimdeki müsaade edilebilir kayıplara bağlıdır. Kesimdeki bu kayıplar ise soğutma düzeneklerine ve GTO tristörün kuyruk süresine bağlıdır. Bu nedenle sıcaklığa bağlı en yüksek frekans sınırını belirlemek, oldukça karışıktır.

MCT'ler (Mos Controlled Thyristor) hızlı anahtarlama yetenekleri nedeni ile bu tip bir sistem için oldukça uygundur. Fakat şu anda onların güç tutma kabiliyetleri GTO tristörlerden geridedir.

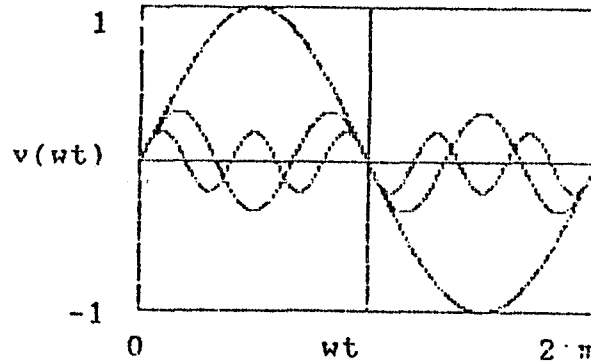
6. HARMONİKLERİN KOMPANZASYON TESİSLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

6.1. Harmonikli Elektriksel Büyüklükler

Elektrik sistemlerinde enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtımı sırasında, akım ve gerilimin 50 Hz frekansta salınan ve sinüs eğrisine çok benzer bir biçimde olması istenir. Bu koşul elektrik enejisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir. Ancak işletmeden gelen bazı etkilerle ortaya çıkan harmonikler nedeniyle, akı, akım ve gerilim gibi büyüklükler sinüsoidal olmaktan çıkarlar ve oldukça karmaşık bir hal alırlar.

Harmonik, temel bileşen frekansının bir integral katsayısı olan frekansa sahip periyodik bir dalganın sinüs biçiminde olan bileşeni olarak tanımlanır. Sinüs şeklinde olmayan dalga şekli, genellikle bir kompleks dalga olarak ifade edilir (Yörükeren 1990).

Genel olarak sinüs biçiminde olmayan periyodik bir fonksiyon Fourier serisine göre sonsuz sayıda harmoniklerin toplamına eşittir. Şekil 6.1.'de kare dalga biçimli $v(\omega t)$ geriliminin 1., 3. ve 5. harmonikleri görülmektedir.



Şekil 6.1. Kare dalga biçimli gerilimin 1., 3. ve 5. harmoniği

Sinüs şeklinde olmayan periyodik bir gerilim için genel bağıntılar aşağıdaki gibidir.

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=0}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (6.1)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos n\omega t \quad (6.2)$$

(6.1) ve (6.2) denklemlerinde n , harmonik mertebesi olup 1,2,3 gibi tam sayılar alır. Denklem (6.2) 'deki V_0 , A_n ve B_n değerleri aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir. T , dalganın periyodu, V_0 ise gerilimin doğru bileşenidir.

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (6.3)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \sin n\omega t dt \quad (6.4)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos n\omega t dt \quad (6.5)$$

Sinüsoidal olmayan akım, gerilim vb. gibi elektriksel büyüklükler için en çok rastlanan şekiller; dikdörtgen, eşkenar üçgen ve trapez dalga şekilleri veya bunların benzerleridir. Bu eğrilerde $A_n = 0$ olduğu gibi $n=1,3,5,9,\dots$ dır, yani bu eğrilere ait Fourier serisi, tek mertebeli sinüslü terimlerin toplamına eşittir. Bunlardan 3 ve 3'ün katları olan 3,9,15,...vb. gibi harmoniklerin R, S, T fazlarındaki değerleri arasındaki faz farkları, 120° 'nin ve 240° 'nin 3 katına veya 3'ün katlarına eşit olan harmonikler, daima R,S ve T fazlarında eşit fazlıdır ve cebirsel toplanırlar. Onun için bunlara sıfır bileşeni de denir.

Bir fazlı tüketicinin çektiği görünür güç, gerilimin etkin değeri ile akımın etkin değerinin çarpımına eşittir:

$$S = V.I \quad (6.6)$$

Aktif güç, harmoniklerin güçlerinin toplamına eşittir:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \phi_n \quad (6.7)$$

Reaktif güç ise;

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (6.7)$$

ifadesine göre hesaplanır.

6.2. Harmoniklerin Üretilmesi

Arızasız bir işletmede harmonikler çeşitli nedenlerle ortaya çıkarlar. Bunların başında magnetik ve elektrik devrelerindeki doğrusal olmayan olaylar gelir. Magnetik devrelerde doyma, elektrik devrelerinde ark ve güç elektroniğinde sinüs eğrisinin kesilmesi, doğrusal olmayan olaylardır. Örneğin generatör, transformatör, motor ve bobin gibi demir çekirdek ihtiva eden cihazlar, doymanın baş göstermesi ile harmonikli akımlar üretirler.

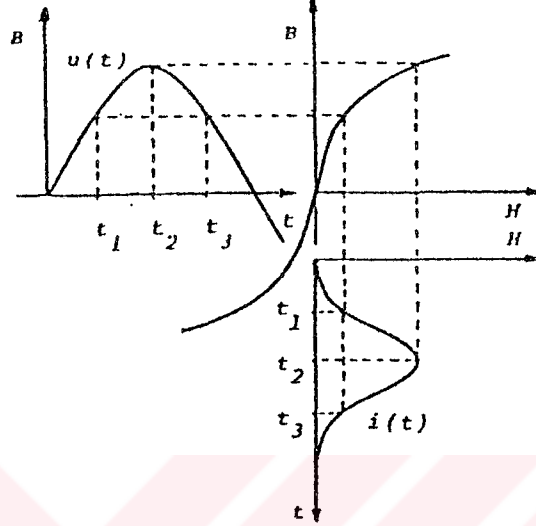
Üretilen harmonik frekanslı akımlar, devrelerini diğer şebeke ve alıcılar üzerinden tamamlayarak harmonik frekanslı gerilimleri oluştururlar. Söz konusu olan bu gerilimler, başlangıçta kabul edilen saf sinüs dalga şeklini bozarlar.

Ark ocakları ve kaynak makinaları gibi normal işletmeleri gereği bir arkın oluşması sonucunda da harmonik üretilir. Doğrultucular ve tristörler sinüsoidal akım dalgasını keserlerken yine harmonikler oluşur.

6.2.1. Transformatörlerde üretilen harmonikler

Transformatörlerin harmonik üretme özellikleri, demir çekirdeğin mıknatıslama karakteristiğinin lineer olmayışına dayanır. Transformatörler şebekede sinüsoidal bir

gerilimle beslendiklerinde, şebekeden bir mıknatıslama akımı çekerler. Demir çekirdeğin magnetik karakteristiği lineer olmadığından bu mıknatıslama akımı artık sinüsoidal değildir. Şekil 6.2'de mıknatıslama karakteristiği B-H, şebeke gerilimi $v(t)$ ve mıknatıslama akımının $i(t)$ oluşumu görülmektedir.



Şekil 6.2. Demir çekirdekli sargının mıknatıslama eğrisi ve mıknatıslama akımı (Bayram 1985).

Şebeke gerilimi belirli bir değer üzerinde çıkarsa, transformator doyma bölgesine girer. Eğer transformator, örneğin gece saatlerinde, düşük yükte çalışırsa, şebekedeki gerilim düşümü azalacağından transformator gerilimi yükselir. Aynı şekilde, kompanzasyon amacıyla sabit paralel kondansatörlerin bağlı olması halinde, düşük yükte transformator kapasitif yükleneceğinden, gerilim yükselir. Bu gibi durumlarda mıknatıslama akımı, 1., 3., 5., 7., 9., 11., 13., ... gibi tek mertebeli harmonikleri ihtiva eder. Bunlardan özellikle 5. ve 7. harmonikler daha şiddetli olarak kendilerini hissettirirler. Akım şiddeti bakımından en önemli olan harmonik de 3. harmoniktir.

Harmonik akımlarının tepe değerleri, temel akım dalgasının tepe değerinden oldukça küçüktür. Transformatorlerin mıknatıslama akımları, nominal akımlarının %1 - %10'u kadardır. Doyma arttıkça harmoniklerin genlikleri büyür. Harmonik akımlar, transformatorlerin birincil sargı reaktansı, hattın reaktansı ve generatörün kaçak reaktansı üzerinden geçtiği için, bunlar üzerinde harmonikli gerilim düşümü gelir. Bu

reaktanslar frekansla orantılı olarak arttıklarından, özellikle düşük yüklerde yüksek harmonik akımlarının bunlar üzerinde sebep oldukları gerilim düşümleri de büyük değerler alır. Bununla beraber mıknatıslama akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi şu faktörlere bağlıdır:

- Transformator sargılarının bağlantı grubuna,
- Primeri yıldız bağlı transformatorlerde yıldız noktasının şebekenin nötr hattına bağlı olup olmamasına,
- Transformatorlerde mıknatıslamanın serbest veya zorunlu olmasına.

Akım şiddeti bakımından en önemli olan 3. ve 3 'ün katlarına eşit olan 9. ve 15. harmoniklerin şebekeye geçmesini önlemek için, transformatorün primer veya sekonder sargılarından biri üçgen bağlanır ya da , büyük güçlü transformatorlerde olduğu gibi, transformator güçlü bir tersiyer sargı ile donatılır.

Transformatorlerde soğuk haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş sac kullanılırsa, magnetik akı ve bunun sonucu olarak mıknatıslama akımı çok küçük değerler alacağından , şebekede harmonik tehlikesi geniş çapta önlenmiş olur.

6.2.2. Tristörlü doğrultucularda üretilen harmonikler

Tristörlerle gerçekleştirilen doğrultucu veya eviricilerde harmoniklerin üretilmesi, akımın periyodik olarak kesilmesi esasına dayanır. Sinüs şeklinde bir alternatif akıma bağlı olan bir doğrultucu, şebekeden I_1 temel harmonik akımı ile birlikte yaklaşık olarak,

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (6.9)$$

harmonik akımları çekerler. Doğrultucuda üretilen bu harmonikli akımlar şebeke empedansında oluşan gerilim düşümündeki bozulmaları arttırırlar ki bu da doğrultucunun kendisine ve diğer tüketicilere verilen kaynak geriliminin bozulmasına neden olur. Doğrultucuda üretilen harmonikli akımlar;

$$n = np \pm 1 \quad (6.10)$$

bağıntısıyla sıralanırlar. Burada p doğrultucunun darbe sayısı, n ise bir tamsayıdır. Örneğin 6 darbeli bir doğrultucuda, $n = 5,7,11,13,\dots$ olup harmonik akımları $I_5 = I_1/5$, $I_7 = I_1/7$, $I_{11} = I_1/11$, $I_{13} = I_1/13$ gibi değerler alırlar.

Doğrultucuda darbe sayısı ne kadar yüksek olursa, harmonik mertebeleri de o kadar yüksek ve harmonik akımlarının değerleri de o kadar küçük olur. Böylece bunların zararlı tesirleri de o oranda azalır. Örneğin bazı tesislerde darbe sayısını 12'den 36'ya çıkarmakla önceden baş gösteren arızaların artık söz konusu olmadığı görülmüştür (Bayram 1985).

6.2.3. Ark fırını kaynaklı harmonikler

Ark fırınları ve kaynak makinaları gibi normal çalışmalarını ark ile sürdüren cihazlar, şebekeye önemli harmonikler oluştururlar. Bu harmoniklerin değerleri zamana bağlı olarak her an değişebilir. Ark, akım ile gerilim arasında lineer olmayan bir bağıntının bulunduğu fiziksel bir olaydır.

Ark ateşleme gecikmesi ve lineer olmayan ark akım gerilim karakteristiklerinin kombinasyonu ana dalga frekans harmonikleridir.

Ayrıca ani ark uzunluğu değişimi nedeniyle oluşan raslantısal gerilim değişimi, yaklaşık varolan her harmonik için 0,1 - 30 Hz arasında frekans yayılımına neden olur. Erimiş malzemenin sürekli hareketi ve arklar arasında elektromagnetik etkileşim nedeniyle erime sırasında bu etki daha barizdir.

Ark fırınlarının ve kaynak makinalarının ürettikleri akımların harmoniklerini, ne merteye ve ne de değer bakımından, mesela doğrultucularda olduğu gibi, hesap yolu ile tayin etmeğe imkan yoktur. Zira arkın meydana gelişi, o anda etkili olan bir çok tesadüfi iç ve dış tesirlere bağlıdır. Onun için ark akımında tek veya çift her mertebeden harmonik bulunduğu gibi, bunların değerleri zamana bağlı olarak her an

değişebilir. Ayrıca harmonikler ark fırınının gücüne ve çalışma safhasına da bağlıdır. Onun için böyle bir işletmedeki akım harmonikleri hakkında bilgi edinmek için bunların ölçülmesi veya alım eğrilerinin analizinin yapılması gerekir.

Harmonikler ark fırınının gücüne bağlı olarak değişirler ve özellikle ergime periyodunun ilk 15 dakikası esnasında çok büyük değerler alırlar.

6.3. Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Ekileri

Bir kondansatörün kapasitif reaktansı, $1/\omega C$, harmonik frekansına bağlı olarak değişir. Diğer bir deyişle, yüksek frekanslı harmoniklerde küçülür. n. harmonik için kapasitif reaktans, $1/n\omega C$ ve bu frekanstaki akımın tepe değeri,

$$I_{nm} = V_{nm} \cdot n\omega C \quad (6.11)$$

olacaktır. O halde bu kondansatörün uçlarındaki gerilim,

$$v = V_{1m} \cdot \sin\omega t + V_{2m} \cdot \sin 2\omega t \dots \quad (6.12)$$

biçiminde ise, bu kondansatörden geçen akım,

$$i = V_{1m} \cdot \omega C \sin(\omega t + 90^\circ) + V_{2m} \cdot 2\omega C \sin(2\omega t + 90^\circ) + \dots \quad (6.13)$$

olacaktır.

Bu bağıntılardan görüldüğü gibi, akım dalgasındaki harmonik içeriği yüzdesi, gerilim dalgasındaki yüzdeden daha büyüktür. Örneğin n. harmonik için n kat daha büyüktür.

3., 5. ve 7. harmoniklerin bulunması durumunda bir kondansatörden geçen akımın etkin değeri ise;

$$I_c = \sqrt{I_{c1}^2 + I_{c3}^2 + I_{c5}^2 + I_{c7}^2} \quad (6.14)$$

olarak hesaplanır. (6.14) bağıntısından da anlaşıldığı üzere, yüksek frekanslı harmoniklerin bulunduğu şebekelerde kondansatörden geçen akım artar (Ertan 1994).

Kondansatör karakteristikleri ile ilgili standartlar sinüs biçiminde olmayan bir dalga şekli ortamında uygulanırken, aşılmaması gereken bazı sınırlamaları içerirler. Bunlar kondansatörün nominal reaktif güç kapasitesi, nominal gerilimi ve nominal etkin akımıdır. Kondansatörler için kabul edilen standartlar, nominal reaktif gücün %135'inde sürekli çalışma için uygundur. Bu tolerans aşağıdaki ifadelerde gereklidir.

1. Kondansatör ucunda bastırılmış olan harmonik gerilimlerin yol açtığı reaktif gücün ilavesi için,
2. Etiket oranındaki aşırı temel bileşen geriliminin yol açtığı reaktif gücün ilavesi için (Fakat standartlar tarafından %10 içinde maksimum aşırı gerilime izin verilmiştir.),
3. Üretim toleransının neden olduğu aşırı kapasitif reaktif güç ilavesi için.

Bu toleranslar sonucu ilave bir reaktif güç meydana gelir, bu özelleştirilmiş %35 sınırını aşmamalıdır. Örneğin kondansatörün %10'luk temel bileşen aşırı gerilim kabiliyeti tutulmak istenirse bu, kondansatörün %35'lik aşırı güç kabiliyetinin %21'ini içine çekecektir (Rice 1986).

Akım ve gerilimin etkin değerinde kondansatörün verdiği güç, harmoniklerin derecesine ancak düşük bir ölçüde bağlıdır. Fakat gerilimin karesi ile orantılı olarak artmaktadır. Kondansatör akımının ve geriliminin belirli sınırlar içinde tutulması, harmonikli gerilimlerde kondansatörlerin aşırı yüklenmesini sağlar.

6.4. Harmoniklerin Elektrik Tesisleri Üzerindeki Etkileri

Harmoniklerin elektrik tesis ve cihazları üzerinde zararları vardır. Temel harmonikdeki değeri X_L olan bir endüktif reaktans, harmonik mertebesi n olan akım karşısında,

$$X_{L,n} = n.X_L \quad (6.15)$$

değerini alır. Yani frekans büyüdükçe endüktif reaktans da büyür. Generatörler yüklendikçe sargılardan geçen harmonik akımlar, stator kaçak reaktansında harmonikli gerilim düşümü meydana gelir. Bu yüzden generatör uçlarındaki gerilim ve şebeke geriliminin şekli bozulur.

Kondansatörlerin kapasitif reaktansları frekans ile ters orantılı olarak azalır. Temel harmonikdeki değeri X_C olan kapasitif reaktans, n harmonik mertebesinde,

$$X_{Cn} = \frac{X_C}{n} \quad (6.16)$$

değerini alır. Bu durumda kapasitif direnç küçülmüştür. Buna bağlı olarak da büyük değerli harmonik frekanslarda, kondansatörler daha fazla akım çeker. Harmonikli gerilimle beslenen senkron ve asenkron makinalarda moment salınımları ve aşırı ısınma meydana gelir.

Faz arası gerilimler harmonik içerirse, bir toprak teması halinde toprak akımlarında büyük harmonikler bulunur. Bu nedenle, yıldız noktasına bağlı bobin görevini tam olarak yapamaz ve arkın sönmesi zorlaşır.

Harmoniklerin neden olduğu en önemli etkilerden biri de rezonans olaylarıdır. Kompanzasyon için bağlanan kondansatörlerin X_C kapasitif reaktansları ile bir titreşim devresi oluşturur. X_L ve X_C 'nin belli değerlerinde harmonik frekanslarda rezonans olayları ortaya çıkar.

6.5. Harmonik Rezonanslara Karşı Alınan Tedbirler

Harmoniklerin söz konusu olduğu tesislerde rezonans olaylarına karşı tesisleri korumak için çeşitli tedbirlere başvurulur ve bunların en önemlisi kompanzasyon tesislerinin harmonik filtreler ile donatılmalarıdır.

Seri rezonans olayı nadir olarak baş gösterir. Bununla beraber bir seri rezonans meydana geldiğinde devreden geçen büyük akımlar, aşırı ısınmaya yol açar. Ayarlanabilen kondansatörün kullanılması halinde frekans rezonansından başka, belirli bir frekansta değişen kapasiteye göre de rezonans şartları gerçekleştirilebilir. Bu nedenle rezonans ihtimalini azaltmak için, kondansatörde regülatör kullanılmamalı ve tesis sabit bir kompanzasyon gücü ile çalıştırılmalıdır.

Bazı durumlarda harmonik frekansları ve kondansatör sabit olduğu halde, tesiste yapılan bir değişiklik, X_L değerinin değişmesine ve böylece yeni bir rezonans şartının oluşmasına yol açabilir. Bu gibi durumlarda sadece devredeki kondansatör gücünü değiştirerek rezonans şartı bozulabilir.

Eğer gerilim kaynağına bobin ile kondansatör paralel bağlanmışlarsa, paralel titreşim devresi oluşur. Paralel titreşim devrelerinde, rezonans baş göstermese dahi harmonik üreticilerden şebekeye oldukça büyük harmonik akımlar verilir. Yüksek harmonik frekansları ile orantılı olarak şebeke reaktansı da büyüdüğünden, büyük harmonikli gerilim düşümleri meydana gelir. Bu da şebeke geriliminin şeklinin bozulmasına yol açar. Harmonikli gerilimin ayrıca tüketici üzerine bozucu etkileri olur.

Bunun dışında harmoniklerin titreşim devrelerinde rezonansa yol açtıkları da bilinmektedir. İşte hem şebekenin harmonik akımları ile beslenmesini önlemek ve hem de harmonik rezonanslara engel olmak için kondansatörler yerine filtre devreleri paralel bağlanır.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Elektrik enerjisinin iletim ve kullanımında reaktif güç kompanzasyonu gittikçe önemli hale gelmektedir. Tesislerden en iyi şekilde yararlanma, ekonomik gereksinimlerden ortaya çıkmaktadır.

Üç fazlı şebekelerde reaktif ve dengesiz yükler, şebekeden dengesiz reaktif akımlar çekecek ve bağlı oldukları noktalarda dengesiz gerilimler meydana getireceklerdir. Dengesiz akım ve gerilimler nedeniyle simetrik bileşenler yönteminin kullanılması gerekir. Reaktif dengesiz yüklerin kompanzasyonu yük kompanzasyonu adını alır. Dengesizliğin (simetrisizliğin) giderilmesi için, negatif bileşen akımı ve güç faktörünün bir yapılması için, pozitif bileşen akımının sanal kısmı sıfır yapılmalıdır. Bölüm 4'de verilen bilgisayar programı; üç fazlı, sabit dengesiz bir yükün, dengeli hale getirilmesi ve güç faktörünün bir yapılması için gereken kompanzasyon süseptanslarını, dengeli ve dengesiz durumdaki hat akımları ile referans akımın simetrik bileşenlerini hesaplar.

Hızlı değişen reaktif dengesiz yüklerin kontrolünde, tristör kontrollü statik var kompanzatorları kullanmak gerekir. Bunlar, değişik tasarım özellikleriyle iletim ve dağıtım sistemlerinde yer alırlar. Şebekelerde etkin bir gerilim ve güç akışı sağlanması açısından reaktif güç akışı olabildiğince hızlı olmak zorundadır. Tristörlü statik var kompanzatorları bunu oldukça başarılı bir şekilde yerine getirir. Arıza durumunda, kompanzator sisteminin tümünü değiştirmek yerine belli parçasının onarılması işletme masraflarını oldukça azaltır.

Statik var kompanzatorların kayıp özellikleri, devre düzeni ve çalışma prensibi ile doğrudan ilişkilidir. Ancak çoğu kompanzator, kısa devre gibi özel durumlar karşısında sistem gerilimini kontrol altında tutma bakımından sınırlıdır.

Son yıllarda gerilim büyüklüğünün kontrolü ve endüstriyel yükleri kompanze etmek için; sadece DA tarafında küçük bir kondansatör bulunan, gerilim beslemeli evirici

tabanlı statik var kompanzatörler incelenmektedir. Güç dönüştürücüleri ile oluşturulan bu devreler gelişmiş statik var kompanzatörler olarak bilinmektedir. Bölüm 5’de bu sistemlerin yapısı ve çalışması açıklanmaktadır.

Belirli bir uygulamada en uygun kompanzatörün seçimi; denetim aralığının belirlenmesi, gücünün ve yatırım bedelinin tespiti, geçici ve kararlı rejimlerde başarının saptanması ve teknik açıdan olumlu ve olumsuz yanlarının sıralanması ile yapılabilir. Seçilecek kompanzatörde, kondansatör değerinin reaktör değerinden büyük seçilmesi iç harmonik üretimini düşürecektir. Reaktif gücün gereksinim duyulan en yakın yerde üretilmesi, elektrik sisteminin en iyi koşullarda işletilmesi açısından büyük yararı vardır. Küçük yüklerin ve yıllık işletme sürelili düşük olan yüklerin kompanzasyonunun terminallerinde yapılması ekonomik olmamakta; kompanzasyon, bu gibi yüklerin gruplar halinde bağlı oldukları baralara sabit veya değişken tipte kompanzatörlerin bağlanması ile yapılmaktadır.

Sonuç olarak, kompanzasyon işleminde statik var kompanzatörlerin kullanılması;

- etkin bir kompanzasyon işlemini,
- kısa cevap zamanını,
- geniş bir endüktif /kapasitif aralıkta çalışmayı,
- iyi bir fliker kontrolünü,
- verimli işletmeyi,
- düşük yatırım harcamalarını,
- gerilim ve güç akışı kontrolünü

mümkün kılmaktadır.

KAYNAKLAR

- 1- BAYRAM, M., 1985. Elektrik Tesislerinde Rezonans Olayları ve Bunların Önlenmesi. Elektroteknik Mecmuası.
- 2- BEST, A.B. and LA PARRA, H.Z., 1996. Transient Response of a Static VAR Compensator. IEEE Transactions on Power Electronics. Vol 11. No.3
- 3- BLAJSZCZAK, G., 1994. Static VAR Compensator with Fully Controlled Reactors. IEE, Proc. Electr. Power Appl., Vol.141, No.5
- 4- BUZLUPINAR, İ., 1982. Güç Faktörünün İyileştirilmesi. Türkiye Elektrik Kurumu, Elektrik Tasarrufu Programı.
- 5- CHEN, Z. and TENNAKOON, SB., 1995. A Technique for the Reduction of Harmonic Distortion and Power Losses in Advanced Static VAR Compensators. APEC'95 Conference.
- 6- CHO GUK, C. et al 1996. Analysis and Controller Design of Static VAR compensator Using Three-Level GTO Inverter. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 11.
- 7- ÇAKIR, H., 1989. Enerji İletimi (Elektrik Hesaplar), İSTANBUL.
- 8- EKANAYAKE, J.B. and JENKINS, N., 1996. A Three-Level Advanced Static VAR Compensator. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, No.1
- 9- EL SADEK, M.Z., 1987. Balancing of Unbalanced Load Using Static VAR Compensators. Electric Power System Research.
- 10-ERTAN, U., 1994. Elektrik Şebekelerinde Harmonikler. Elektrik Dergisi.
- 11-EYOL, E., 1990. Statik VAR Sistemleriyle Güç Kompanzasyonu. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İSTANBUL.
- 12-GÜMELİ, D., 1990. Reaktif Gücün Oluşumu ve Statik VAR Sistemleriyle Optimal Kontrolü. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İSTANBUL.
- 13-GYUGYI, L. et al 1978. Principles and Applications of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol 97.

- 14-GYUGYI, L., and TAYLOR, E., 1980. Characteristics of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators for Power Transmission System Applications.
- 15-GYUGYI, L., 1988. Power Electronics in Electric Utilities: Static VAR Compensators. Proceedings of the IEEE Vol 76, No.4.
- 16-MILLER, T.J., 1982. Power Control in Electric Systems. John Wiley & Sons, USA.
- 17-MOHAN, N., et al 1995. Power Electronics Converters, Applications, and Design. John Wiley & Sons Inc., USA.
- 18-ÖZAY, N., 1983. Reaktif Güç Kompanzasyonu, Elektrik Mühendisleri Odası Seminer Notları.
- 19-RICE, D.E., 1986. Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics-Their Effect on Power Systems Components. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol IA22, No.1.
- 20-ROBBINS, W., 1989. Power Electronics Converters, Application and Design, USA.
- 21-SOYSAL, O., 1989. Elektrik Mühendisleri Odası Güç Elektroniği Semineri KTÜ, TRABZON.
- 22-TRAINER, D.R., et al 1994. Analysis of GTO-Based Static VAR Compensators. IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol 141.
- 23-WU, C.J., et al 1994. Microprocessor Based Static Reactive Power Compensators for Unbalanced Loads. Electric Power Systems Research.
- 24-YÖRÜKEREN, N., 1994. Güç Sistem Harmonikleri ve Bu Harmoniklerin Elektrik Ulaşım Sistemlerinde Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi. KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, KOCAELİ.

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında İzmit'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İzmit'te tamamladı. 1990 yılında girdiği Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü'nden 1994 yılında mezun oldu. Ekim 1994 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

