

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

728753

STATİK KOMPANZASYON SİSTEMLERİ VE
ELEKTRİKLİ DEMİRYOLU ULAŞIM TESİSLERİNDE
UYGULANMASI

Elk.Müh.Berfu ÇEVİK

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

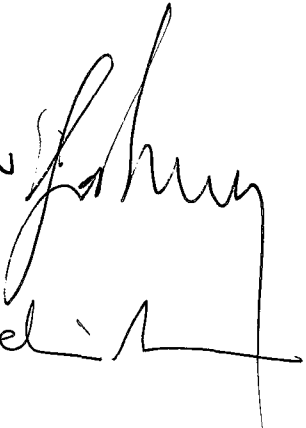
Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr.Ferit ATTAR



Prof.Dr.Fahrettin ALSLAN

Prof.Dr.Selma AY

728753



İSTANBUL , 2002

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	i
KISALTIMA LİSTESİ	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
ÇİZELGE LİSTESİ	v
TEŞEKKÜR	vi
ÖNSÖZ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
2. REAKTİF GÜÇ ve GÜÇ KATSAYISI	3
2.1 Reaktif Güç Tüketicileri	5
2.2 Reaktif Güç Üretimi ve Kompanzasyonu.....	6
2.2.1 Dinamik Faz Kaydırıcılar	6
2.2.2. Kondansatörler	7
2.2.3 Kondansatörlerin Hesabı	8
2.2.4 Reaktif Güç İhtiyacının Belirlenmesi.....	11
2.2.5 Bir Tesise Ait Güç Değerlerinin Belirlenmesi.....	14
2.3 Güç Katsayısının Düzeltilmesinin Yararları	15
2.3.1 Güç Katsayısının Düzeltilmesinin Şebekeye Sağladığı Yararlar	15
2.4 Kompanzasyon Tesisinin Düzenlenmesi	20
2.4.1 Bireysel Kompanzasyon	22
2.4.2 Grup Kompanzasyonu	24
2.4.3 Merkezi Kompanzasyon	25
2.4.4 Kompanzasyon Uygulamaları Seçimi	27
3. STATİK REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU	29
3.1 Statik Reaktif Güç Kontrol Çeşitleri	29
3.2 SRS' nin Temel Frekanstaki Performansı	30
3.3 SRS' inde Kullanılan Elemanlar	35
3.3.1 Tristör Kontrollü Bobin	35
3.3.2 Tristör Anahtarlamalı Kondansatör	40
3.4 SRS' nin Pratik Uygulamaları	44
4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE SİNÜSOİDAL OLMAYAN ELEKTRİKSEL BÜYÜKLÜKLER İLE İLGİLİ TANIMLAR ve TEMEL BAĞINTILAR	47
4.1 Harmoniklerin Matematiksel İfadesi	47
4.2 Fourier Katsayılarının Belirlenmesi	48
4.2.1 Analitik Yöntem	48
4.2.2 Ölçme Yöntemi	50

4.2.3	Grafik Yöntemi	50
4.3	Harmoniklerle İlgili Tanımlar ve Temel Bağlıntılar	51
4.4	Sinüsoidal Olmayan Akım ve Gerilim Doğruları ile İlgili Bağlıntılar	51
4.5	Üç Fazlı Enerji Sistemi Elemanlarının Faz Koordinatları ile Harmonik Bağımlı olarak Modellenmesi	53
4.6	Harmonik Kaynakları	54
4.6.1	Konverterler	54
4.6.2	Transformatörler	57
4.6.3	Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları	58
4.7	Harmoniklerin Enerji Sistemine Etkileri	59
4.7.1	Direncin, Endüktif ve Kapasitif Reaktansların Harmoniklere Bağlı Olarak Değişimi	60
4.7.2	Harmoniklerin Kayıplara Etkisi	64
5.	STATİK REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONUNUN DEMİRYOLU SİSTEMLERİNE UYGULANMASI	66
5.1	Demiryolu Elektrifikasyonu	66
5.2	Elektrifikasyon Tesisleri	67
5.2.1	Katener Tesisleri	67
5.2.2	Transformatör Merkezleri ve Cer Postaları	69
5.2.3	Uzaktan Kumanda (Telekomand) Sistemi	70
5.3	Elektrikli Demiryolu Ulaşımında SRS' nin Uygulanması	71
5.4	SRS' li Bir Transformatör Merkezi	73
5.4.1	Transformatör Merkezi ile İlgili Ölçümler ve Analizler	74
5.4.2	Reaktif Güç Kontrol Sistemi Dizayn Kriterleri	74
6.	SONUÇ	83
	KAYNAKLAR	84
	ÖZGEÇMİŞ	85

SİMGE LİSTESİ

I	: Görünen akım	[A]
S	: Görünen güç	[VA]
U_f	: Faz gerilimi	[V]
U_h	: Hat gerilimi	[V]
I_p	: Aktif akım	[A]
P	: Aktif güç	[KW]
I_q	: Reaktif akım	[A]
Q	: Reaktif güç	[VAr]
φ, ϕ	: Faz açısı	[rad]
$\cos \varphi$: Güç faktörü	
C	: Kondansatör kapasitesi	[F]
ω	: Açısal frekans	[rad/sn]
X_C	: Kapasitif reaktans	[Ω]
f	: Frekans	[Hz]
Q_C	: Kondansatör gücü	[KVAr]
U_C	: Kondansatör gerilimi	[V]
I_C	: Kondansatör akımı	[A]
C_A	: Üçgen bağlı kon. kap.	[F]
C_Y	: Yıldız bağlı kon. kap.	[F]
S_I	: Komp. öncesi çek. görünen güç	[KVA]
$\cos \varphi_1$: Komp. öncesi güç faktörü	
$\cos \varphi_2$: Komp. sonrası güç faktörü	
P_1	: Komp. öncesi çek. aktif güç	[KW]
S_2	: Komp. sonrası çek. görünen güç	[KVA]
P_2	: Komp. sonrası çek. aktif güç	[KW]
k	: Katsayı	
R	: Besleme hattı omik direnci	[Ω]
X	: Besleme hattı reaktif direnci	[Ω]
U_1	: Hat başı faz gerilimi	[V]
U_2	: Hat sonu faz gerilimi	[V]
P_{z1}	: Komp. öncesi faz başına ısı kaybı	[KW]
P_{z2}	: Komp. sonrası faz başına ısı kaybı	[KW]
p_z	: Hat üzerinde izin verilen max. bağlı kayıp güç	
z	: Hat üzerindeki bağlı ısı kaybı	
Δu	: Hat üzerindeki boyuna gerilim düşümü	[KW]
ε	: Bağlı gerilim düşümü	
S_{Tr}	: Transformatör gücü	[KVA]
u_k	: Transformatör bağlı kısadevre gücü	
\bar{u}	: Transformatör dönüştürme oranı	

E_{th}	: Yüksek gerilim şebekesi Thevenin eşdeğer devresi gerilimi	[V]
X_{th}	: Yüksek gerilim şebekesi Thevenin eşdeğer reaktansı	[Ω]
X_S	: Reaktans eğimi	[Ω]
U_0	: Sistem nominal çalışma gerilimi	[V]
α	: Tristör tetikleme açısı	[rad]
σ	: Tristörlerin iletimde kalma açısı	[rad]
I_1	: Akımın temel frekans bileşeni	[A]
X_{Sl}	: TKB reaktans eğim değeri	[Ω]
t_1	: Kondansatör iletime girme anı	[ms]
t_2	: Kondansatör iletimden çıkma anı	[ms]
B_{LMAX}	: TKB maksimum suseptans değeri	[1 / Ω]
B_C	: TAK suseptans değeri	[1 / Ω]
n	: En yüksek harmonik mertebesi	
I_0	: Akımın dc bileşeni	[A]
h,k	: Harmonik mertebesi	
a_0, a_n, b_n	: Fourier katsayıları	
τ	: Dalga boyu	[rad]
V_0	: Gerilimin dc bileşeni	[V]
I_h	: h. harmonik akım efektif değeri	[A]
γ_h	: h. harmonik akım faz açısı	[rad]
V_h	: h. harmonik gerilim efektif değeri	[V]
δ_h	: h. harmonik gerilim faz açısı	[rad]
$i(\omega t)$: Faz akımı ani değeri	[A]
r_{dc}	: Hattın dc direnci	[Ω]
μ_r	: Silindirik iletkenin bağıl geçirgenliği	
r_{ac}	: Hattın ac direnci	[Ω]
P_K	: İletken güç kaybı	[W]

KISALTIMA LİSTESİ

SRS	Statik Reaktif güç kontrol Sistemi
SRÜ	Statik Reaktif güç Üreticisi
SRT	Statik Reaktif güç Tüketicisi
TKB	Tristör Kontrollü Bobin
TAK	Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör
TAR	Tristör Anahtarlamaalı Reaktör
TKT	Tristör Kontrollü Transformator
ŞDK	Şebeke Denetimli Konverter
KDK	Kendinden Denetimli Konverter
DUR	Doyuma Ulaşmış Reaktör
MAK	Mekanik Anahtarlamaalı Kondansatör
CF	Crest Faktörü
THD	Toplam Harmonik Distorsyonu
DF	Distorsyon Faktörü



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Tesis elemanlarının çektiği akım ve güç bileşenleri	4
Şekil 2.2	Tek fazlı bir şebekeye kondansatörün bağlanması	8
Şekil 2.3	Üç fazlı alternatif akım şebekesinde kondansatörlerin üçgen ve yıldız bağlanması	10
Şekil 2.4	Reaktif güç ihtiyacının tesbiti	11
Şekil 2.5	Aktif güç ile güç katsayısı yardımıyla görünen güç,reaktif güç ve kondansatör gücünün bulunmasını sağlayan çizelge	12
Şekil 2.6	Bir besleme hattı	15
Şekil 2.7	Güç katsayısının gerilim düşümü üzerine etkisi	18
Şekil 2.8	Kompanzasyon tesisi için en uygun yerin seçilmesi	21
Şekil 2.9	Bireysel kompanzasyon	23
Şekil 2.10	Grup kompanzasyonu	25
Şekil 2.11	Merkezi kompanzasyon	26
Şekil 2.12	100KVAR'lık bir merkezi kompanzasyon devre şeması.....	27
Şekil 3.1	İdeal bir SRS	30
Şekil 3.2	İdeal bir kompanzatöre ait V - I karakteristiği	30
Şekil 3.3	SRS' ne ait karakteristikler	31
Şekil 3.4	Enerji sistemi geriliminin reaktif akıma bağlı değişimi	32
Şekil 3.5	Belirli sistem durumlarına ait SRS karakteristik eğrisi	34
Şekil 3.6	Sürekli kontrol aralığını artırmak için anahtarlamalı kondansatörlerin kullanılması	35
Şekil 3.7	Tristör kontrollü bobin	37
Şekil 3.8	TKB' nin temel frekanstaki akım - gerilim karakteristiği	38
Şekil 3.9	Üç fazlı TKB devre şeması	39
Şekil 3.10	Tristör anahtarlamalı kondansatör	40
Şekil 3.11	TAK' ün anahtarlama prensibi	41
Şekil 3.12	TAK' ün paralel birimlerden oluşması	42
Şekil 3.13	TAK ve güç sisteminin V - I karakteristikleri	43
Şekil 3.14	Tipik bir SRS uygulaması	44
Şekil 3.15	SRS kararlı hal karakteristikleri	45
Şekil 4.1	Üç fazlı 6 – darbeli konverter (yarı kontrollü doğrultucu)	55
Şekil 4.2	Üç fazlı 12 – darbeli konverter (yarı kontrollü doğrultucu)	56
Şekil 5.1	İnşaatı bitmiş bir katener tesisi	68
Şekil 5.2	İnşaatı bitmiş bir transformatör merkezi	69
Şekil 5.3	İnşaatı bitmiş bir telekomand merkezi	70
Şekil 5.4	E 43000 tipi elektrikli lokomotif için cer motor kontrol devre şeması	72
Şekil 5.5	E 43000 tipi elektrikli lokomotif için güçkatsayısı düzeltme devresi	73
Şekil 5.6	TCDD Kalburcu Transformatör Merkezi' ne ait tek hat şeması	75

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Mevcut $\cos \varphi_1$ değerini istenen bir $\cos \varphi_2$ değerine çıkartmak için 13	13
	beher KW aktif güç başına gerekli reaktif güç	
Çizelge 2.2	$\cos \varphi_2 = 1$ durumunda, çeşitli güç katsayıları için şebekedeki ısı 17	17
	kaybı azalışı	
Çizelge 2.3	Transformatör reaktif gücünü doğrultmak için gerekli olan 23	23
	kondansatör gücü	
Çizelge 4.1	Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu 57	57
Çizelge 4.2	Magnetik balastlı bir flouresant lamba akım harmonik spektrumu 59	59
Çizelge 4.3	Çeşitli ülkelerin harmonik standartları 61	61
Çizelge 4.4	Devre elemanlarının frekans bağımlı eşdeğerleri 64	64
Çizelge 5.1	TCDD hatlarında mevcut elektrifikasyon tesisleri 66	66
Çizelge 5.2	Reaktif güç kompanzasyonundan önce transformatör merkezine ait 76	76
	ölçüm değerleri	
Çizelge 5.3	Reaktif güç kompanzasyonundan sonra transformatör merkezine ait 80	80
	ölçüm değerleri	

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında emeği geçen tım akademisyen arkadaşlarıma, gösterdiği hoşgörü ve esirgemediği tecrübesi nedeniyle Y. Doç. Dr. Ferit ALTAR' a, problemlerin üstesinden gelip, sonuca ulaşmam hususunda yardımlarını ve engin bilgilerini seferber eden Öğr. Gör. Dr. Recep YUMURTACI' ya, TCDD' nin mümkün olan tüm olanaklarının sunulmasında her türlü kolaylığı sağlayan Elk. Müh. Füsun BİNGÖL, Trf. Bak. Şef. Yrd. Mehmet Emin EFE ve eşime sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.



ÖNSÖZ

Elektrik yüklerinin büyük çoğunluğu, sadece aktif güç değil reaktif güç de çekerler. Bahsi geçen bu güç, motorlar ve transformatörlerde magnetizasyon, statik konverterlerde ise kumanda ve komütasyon reaktif gücünün temin edilmesinde gereklidir. Faydalı enerjiye dönüştürmek mümkün olmadığından dolayı, reaktif gücün iletimi ekonomik değildir.

Elektrik enerjisinin üretimi ve dağıtımı için generatörlere, havai iletim hatlarına, transformatörlere ve şalt cihazlarına ihtiyaç vardır. Yukarıda da belirtildiği gibi, bir tesis ne kadar az reaktif güç tüketirse, güç katsayısı da o kadar yüksek olur ve tesisin enerji harcaması ise o oranda azalır. Elektrik dağıtım sistemindeki yükü, güç katsayısını düzelten kondansatörler kullanarak ve reaktif gücü de, bu kondansatörlerden temin ederek azaltmak mümkündür. Böylece, iletim kayıpları azalır, enerji harcamaları düşer ve dağıtım sisteminin pahalı bir şekilde yenilenmesi gerekmeksizin, daha fazla aktif güç, mevcut malzeme kullanılarak iletilmiş olur.

Son yıllarda artan enerji ihtiyacını karşılamak üzere, iletim sistemlerinde çok yüksek gerilimli hatların kullanımının artması, yüklerin tek fazlı havai hat üzerinden beslendiği elektrikli demiryolu ulaşımının yaygınlaşması ve şebekeden dengesiz akım çeken büyük güçlü ark fırınlarının sayısının gittikçe artması gibi nedenlerle güç katsayısının istenilen düzeylerde tutulabilmesi çok zorlaşmıştır. Elektrikli ulaşım sistemlerinde kullanılan tek fazlı, büyük güçlü kontrollü doğrultucular ile sanayide kullanılan ark fırınlarının şebekeye verdiği harmonikler durumu bir kat daha zolaştırmaktadır.

Tüm bu sebepler, daha etkin fakat biraz daha karmaşık olan statik kompanzatörler ve harmonik filtrelerinin kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu tezin içeriği de, bahsi geçen konular ile pratikteki bir uygulamasından ibarettir.

ÖZET

Bu tezin konusu olan, reaktif güç kompanzasyonunun güçelektronığı elemanları ile gerçekleştirilerek, demiryolu sistemlerine uygulanması, özellikle son on yıl içerisinde yoğun olarak gündeme gelmiştir.

Çalışmamızın ilk bölümünde, reaktif güç kompanzasyonunun tarihçesine değinilmiştir. İkinci bölümde ise, reaktif güç kompanzasyonunun tam tanımı, gücün bileşenleri ile ilgili bağıntı ve ifadeler, kompanzasyon maksadı ile kullanılan elemanlara ilişkin bilgiler verilmiştir. Yine bu bölümde, kompanzasyonun enerji iletim ve dağıtım sistemi ile tüketiciye sağladığı faydalar da anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde, asıl konumuz olan statik reaktif güç kompanzasyonundan geniş olarak bahsedilmiştir. Bu kompanzasyon tipinde kullanılmakta olan yarıiletken güçelektronığı elemanları ile oluşturulan birimler ve bloklar detaylı olarak tanımlanmışlardır.

Dördüncü bölüm, diğer üç bölümden farklı olarak harmoniklerin anlatımını içermektedir. Özellikle statik reaktif güç kompanzasyonunda ortaya çıkan büyük mertebeli harmonikler ve bunların bastırılması ile ilgili teknikler anlatılmaktadır.

Beşinci bölümde ise, demiryollarına ait elektrifikasyon tesisi genel hatlarıyla tanıtılmış, şebekenin trafik yoğunlukları vb. anlatılmış olup, besleme sistemi dahilindeki bir transformatör istasyonu örnek olarak seçilerek, buna ait statik reaktif güç kompanzasyonu, tesis üzerinde yapılmış ölçümlerle birlikte detaylı olarak incelenmiştir.

Reaktif güç kompanzasyonu, yarıiletken güçelektronığı elemanları, harmonikler, elektrikli demiryolu ulaşım araçları, 24 saat ölçüm

ABSTRACT

The main theme of this thesis is, reactive power control applications to the railway systems with power electronics devices, has been getting more and more popular especially for the last ten years.

The first part of the thesis is about history of reactive power compensation. In the second part, the definition of reactive power compensation, the components of power, the algebraic relations between them and the components, those are used in compensation, are consumed with all details. The benefits of the reactive power compensation for both the energy transmission - distribution systems and the consumer are also determined in this chapter. The third part, with the detailed determination of static reactive power compensation and the components of it comes precedingly.

In the fourth chapter, differently from the third, harmonics are consumed. Especially, the more significant harmonics, those are seen in static reactive power control systems, and the technics in order to eliminate them are determined.

The last part contains the transmission lines, the substations, those feed the catenary lines, and the peak passenger - freight transport hours of the railway system. Includingly, one of the transformer substation with its compensation unit is determined detailly.

Reactive power compensation, semiconductors, harmonics, electric locomotives, 24 hour measurement

1. GİRİŞ

Ülkemiz bir sanayi kalkınma hamlesi yapmaktadır. Bu hamlenin en büyük gereksinimi enerji ve özellikle de elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisine olan ihtiyaç her geçen yıl, yaklaşık %10 oranında artmaktadır. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde ise bu oran %12-16 seviyelerine kadar ulaşmaktadır. Ülkemizdeki enerji üretimi ve tüketimi göz önüne alınırsa, enerji ihtiyacındaki artışı karşılayabilmek için her yıl takriben 500MW gücünde bir santral kurulması gerekmektedir. Teknik ve ekonomik nedenlerden dolayı bunun gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Bundan dolayı, mevcut tesislerde, büyük sıkıntılara düşmemek için bazı idari ve teknik önlemlere başvurulur. Bu tedbirlerden ilki, yaz ssati uygulamasıdır İkincisi, enerji sarfiyatını sınırlamak ve kısıtlamak için enerji ihtiyacının büyük olduğu zamanlarda yüksek ücretli tarife uygulamaktır. Üçüncü ve en önemli tedbir ise, bir teknik önlem şeklinde olup, güç katsayısının düzeltilmesi şeklindedir. [Bayram, 1999]

Güç katsayısının düzeltilmesinin elektrik tesislerine sağladığı yararlarından bazıları :

- a- Generatörlerin, transformatörlerin ve enerji nakil hatlarının yüklerinin düşmesi, yeni yükler için imkan sağlanması,
- b- Tesislerdeki toplam gerilim düşümünün azalması,
- c- Tesislerdeki toplam kayıpların azalması

olarak sıralanabilir. Burada söz konusu olan üç olay da, tesislerin daha küçük güçlere göre yapılmasına, dolayısıyla daha ucuza mal edilmesine katkıda bulunur. Bunun yanısıra, böylelikle bu gibi tesislerde daha büyük güç çekebilme imkanı doğmuş olur. Enerji sıkıntısı çeken ülkeler için bu ikinci imkan daha önemlidir. Böylece, hiç olmazsa belirli bir süre, mevcut tesislerin kapasitelerinden daha iyi yararlanılarak, daha büyük tüketici kitleleri beslenebilir. [Bayram, 1999]

İlk zamanlarda, yıllerin üretim noktalarına yakın olması nedeniyle, yükün reaktif güç ihtiyacı, enerji üretimi için kullanılmakta olan senkron generatörün uyartım akımı değiştirilmek suretiyle elde ediliyordu. Yıllar geçtikçe talebin atması, yüklerin enerji üretim noktalarından giderek uzaklaşması, kısaca enerji iletim ve dağıtım şebekelerinin büyümesi

neticesinde, bu tip bir uygulamanın ekonomik olmadığı görülmüş oldu. Bahsi geçen yöntemde makina ve iletim sistemi kayıpları artmakta idi.

1940' lı yıllardan itibaren, enerji iletim sistemlerinde büyük senkron kompanzatörler kullanılmaya başlandı. Yüklerin çeşitlilik göstermesi sonucu, bunların yanlarına sabit kondansatörlerden oluşan birimler koyuldu. Dağıtım sistemlerine bağlı bulunan, özellikle ark kaynaklarının tükettikleri reaktif gücü kompanze edebilmek için, daha etkili ve ekonomik kapasiteler üretilmeye başlandı. Yüksek gerilim hatlarının kullanılmaya başlanması ile birlikte, seri kondansatörler ve şönt reaktörler en önemli kompanzasyon elemanları oldular.

1970' li yıllardan itibaren ise, elektrikli trenler ve büyük güçlü ark fırınlarının sayısı giderek arttı. Bu tip yükler hem büyük hem de ani değişimler gösteriyorlardı. Sabit kondansatör yada senkro kompanzatörler ile şebekeyi dengelemek artık mümkün olmuyordu. Ayrıca, dinamik kompanzatörlerin geçici rejim cevapları şebekeyi de olumsuz etkiliyordu. Tristörlerin yıllar geçtikçe endüstriyel uygulamalarda yer almaya başlaması ile birlikte, hareketli parçaları bulunmayan, büyük güçlü tristör kontrollü bobin ve tristör anahtarlama kondansatör şeklinde modern kompanzatörler üretilmeye başlandı. Halen uygulaması süre gelen bu en yeni teknoloji, baş döndüren bir hızla da gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. [İnan, 1992]

2. REAKTİF GÜÇ ve GÜÇ KATSAYISI

Günümüzde elektrik enerjisi, çoğunlukla alternatif akım modunda üretilip dağıtılmaktadır. Esasen tüketiciler, şebekeden yalnızca I gibi bir görünen akım çekerler. Fakat, hem fiziksel hem de matamatiksel bakımdan kolaylık sağlamak için, tüketicilerin çektiği alternatif akımın, teorik bakımdan biri aktif ve diğeri reaktif akım olmak üzere iki bileşenden oluştuğu kabul edilir. Aktif akımın meydana getirdiği aktif güç, tüketici tarafında faydalı hale getirilir; örneğin motorlarda mekanik güce, ısıtıcılarda termik güce ve aydınlatıcılarda aydınlatma gücüne dönüşür. Reaktif akımın meydana getirdiği reaktif güç ise faydalı güce çevrilemez. Reaktif güç, yalnızca alternatif akıma bağlı bir özellik olup, elektrik tesislerinde istenmeyen bir unsur olarak, generatörleri, transformatörleri ve hatları gereksiz yere işgal eder ve yükler. Bununla da kalmayıp, ilave ısı kayıplarına ve gerilim düşümlerine yol açar. Aktif güç enerjisi normal sayaçlarda tesbit edildiği halde, reaktif enerji böyle bir sayaç ile kontrol edilemez.

Her ne kadar reaktif güç faydalı güce çevrilemez ise de, bundan tamamen de vazgeçilemez. Esasen elektrodinamik prensibine göre çalışan generatör, transformatör, bobin ve motor gibi bütün işletme araçlarının normal çalışmaları için gerekli olan manyetik alan, reaktif akım tarafından karşılanır. Bilindiği gibi, endüksiyon prensibine göre çalışan bütün cihaz ve makinalar, manyetik alanın oluşturulabilmesi için bir mıknatıslanma akımı çekerler. İşte bu mıknatıslanma akımı, reaktif akımdır ve faydalı olan aktif gücün yanısıra mutlaka reaktif güce de ihtiyaç duyulur. Bu nedenle tüm alternatif akım tesisleri, aktif gücün yanında reaktif gücün de çekileceği göz önünde bulundurularak boyutlandırılırlar. Mıknatıslanma akımı, aşağıda da açıklanacağı gibi endüktif karakteristikli bir akım olup, manyetik alanın oluşturulması sırasında şebekeden çekilir ve alan ortadan kalkarken, bu akım tekrar şebekeye iade edilir. Bu nedenle reaktif güç, üretici ile tüketici arasında sürekli olarak şebeke frekansının iki katı frekansla salınım yapar. Bir tüketicinin şebekeden çektiği görünen güç :

$$S = 3 \cdot U_f \cdot I \quad (2.1)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_h \cdot I$$

şeklinde ifade edilebilir olup, U_f faz gerilimi, U_h hat gerilimi yani iki faz arası gerilim, I ise hat akımıdır. Aktif güç ile aktif akım, gerilim ile aynı fazda oldukları halde, çekilen gücün

endüktif olması halinde, S görünen gücü ve I hat akımı, gerilimden φ açısı kadar geride kalırlar. Buna göre aktif akım :

$$I_p = I \cdot \cos \varphi , \quad (2.2)$$

aktif güç :

$$P = S \cdot \cos \varphi , \quad (2.3)$$

reaktif akım :

$$I_q = I \cdot \sin \varphi , \quad (2.4)$$

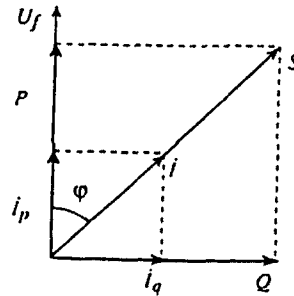
ve reaktif güç :

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (2.5)$$

şeklinde olup, hat akımı ve görünen güç ile bunların bileşenleri arasında;

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} , \quad (2.6)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} , \quad (2.7)$$



Şekil - 2.1 Tesis elemanlarının çektiği akım ve güç bileşenleri

Şekil - 2.1' de, yukarıda sözü geçen akım ve güç fazörlerinin birbirine göre durumları gösterilmiştir; burada reaktif akım ve reaktif gücün saf endüktif karakterde olduğu kabul edilmiş ve gerilime göre 90° geri fazda çizilmişlerdir. Ayrıca, akımlar ile güçler için farklı ölçekler kullanılmıştır. Faz gerilimi doğrultusundaki I_p akımı (yada P gücü) ile I akımı yada S gücü arasındaki φ açısına faz açısı ve bunun kosinüsüne güç katsayısı denir. Yukarıda verilen ifadelerden ve şekil - 2.1' den anlaşılacağı gibi φ yada $\cos \varphi$, çekilen reaktif güç için bir ölçektir.

2.1 Reaktif Güç Tüketicileri

Reaktif güç sarfiyatı bakımından tüketicileri iki ana gruba ayırmak mümkündür. Bunlardan ilki, elektrik enerjisinden yararlanarak saf ısı enerjisi üreten tüketiciler ile akkor flamanlı lambalar, elektroliz ve galvano tesisleridir. Bu tesisler yalnızca aktif güç tüketirler. İkinci grupta ise, elektrik tesislerinde kullanılan magnetik yada statik alan ile çalışan tüm işletme araçları vardır. Bu araçlar, diğer gruptakilerin aksine, aktif güç yanında reaktif güç de çekerler. Bahsi geçen cihazların belli başlıları :

- a- Düşük uyartımlı senkron makinalar,
- b- Transformatörler,
- c- Bobinler,
- d- Havai hatlar,
- e- Asenkron motorlar,
- f- Redresörler,
- g- Endüksiyon ocakları ve ark fırınları,
- h- Kaynak makinaları,
- i- Flouresan lamba,sodyum ve civa buharlı lamba balastları ile neon lamba trafolarıdır.

Her ne kadar aydınlatma cihazları aktif güç çekseler de, bunlara ait balast ve transformatörler de reaktif güç sarfettiklerinden, bahsi geçen aydınlatma sistemleri de ikinci grupta sayılan sistemlere girerler. Yukarıdaki tüketicilerde söz konusu olan reaktif güç endüktif karakterde olup, gerilime göre 90° geridedir. Bazı özel hallerde ise işletme araçları bir kondansatör gibi

etki edip, kapasitif güç çekerler. Bunlara örnek olarak boşa çalışan havai hatlar ve kablolar gösterilebilir. Bu tip cihazlarda ise, çekilmekte olan akım gerilimden 90° ileridedir.

2.2 Reaktif Güç Üretimi ve Kompanzasyon

Reaktif güç ihtiyacını karşılamak için reaktif gücün bir yerde üretilmesi gerekir. Bunun için en eski ve klasik yol, aktif güç gibi reaktif gücün de senkron generatör tarafından üretilmesidir. Reaktif güç üretimi, aktif güç gibi, santrallerde su kuvveti, akaryakıt, kömür ve benzeri ham enerji maddesinin sarfiyatını gerektirmez; sadece generatör uyarılmasının artırılması ile alternatör, reaktif güç verecek duruma getirilir. Böylece santralde üretilen reaktif güç, generatör, transformatör ve enerji nakil hattı üzerinden geçerek tüketiciye ulaşır. Bu esnada elektrik tesisleri, reaktif güç tarafından fuzuli işgal edileceklerinden, aktif güç bakımından bunların kapasitelerinden tam olarak yararlanmak mümkün olmaz ve işletme ekonomik olmaktan çıkar. Onun için tesisleri reaktif güçten kurtarmak, tesis elemanlarının kapasitelerinden tam olarak yararlanmak ve ekonomik bir işletme sağlamak amacıyla, reaktif gücün santralde değil de, tüketim merkezlerinde üretilmesi en uygun ve ekonomik yoldur.

Tüketicileri, normal olarak şebekeden çektikleri endüktif gücün, kapasitif güç çekmek suretiyle özel bir reaktif güç üreticisi tarafından dengelenmesine kompanzasyon denir. Böylece, tüketicinin şebekeden çektiği reaktif güç çok azalır. Reaktif güç üretimi için iki işletme aracından yararlanılabilir; dinamik faz kaydırıcılar ve kondansatörler.

2.2.1 Dinamik Faz Kaydırıcılar

Reaktif güç üretiminde kullanılan dinamik faz kaydırıcıların başında aşırı uyarılmış senkron makinalar gelir. Genel olarak santrallerden gelen enerji nakil hatlarının sonunda ve tüketim merkezlerinin başında, şebekeye bir senkron makina paralel olarak bağlanıp, bölgenin reaktif güç ihtiyacı bu makina tarafından sağlanır. Şebekeye bağlanan senkron makina, şebekeden, boşa çalışma kayıplarını karşılayacak kadar az bir aktif güç çeker ve şebekeye isetenen reaktif gücü vererek, bir reaktif güç generatörü olarak çalışır. Bu esnada sözü edilen makinanın ayrıca tahrik edilmesine de gerek yoktur. Senkron faz kaydırıcıların kayıpları kondansatörlere göre daha yüksek olduğu gibi, sürekli olarak da bir bakıma ihtiyaç duyarlar.

Bir diğer husus olarak, çok büyük güçlü senkron makineler kullanılması gerektiği takdirde, bunların ekonomik olarak üretilmesi ve temini mümkün olmaktadır. Bu makinelerin başka bir dezavantajı olarak, bir tüketim merkezi civarına yerleştiklerinde, yalnızca generatörler ve yüksek gerilim enerji nakil hatları ile buna ait transformatörlerin reaktif güçten kurtarıldıkları halde, tüketim merkezine ait bir yada iki kademeli orta gerilim şebekesi ile alçak gerilim dağıtım şebekesinin reaktif güç nakletmek zorunda kalışı sayılabilir.

Tüm bu nedenlerden dolayı, dinamik faz kaydırıcılar, bugün ancak özel hallerde ve ekonomik şartların gerçekleştiği yerlerde kullanılırlar.

2.2.2 Kondansatörler

Reaktif güç üretiminde, statik faz kaydırıcıları adı verilen kondansatörlerin üstünlükleri sayılamayacak kadar çoktur. Kayıpları çok düşük olup, nominal güçlerinin %0,5' inin altındadır. Ayrıca, bakım masrafları da yok denecek kadar azdır. Kondansatörler ile, istenen her büyüklükte reaktif güç kaynağı teşkil edilebildiği gibi, bunları, tüketicilerinin yanlarına kadar götürüp, hemen uçlarına bağlamak suretiyle orta ve alçak gerilim şebekelerini de reaktif gücün yükü altından kurtarmak mümkündür. Tüm bu nedenlerden ötürü, kondansatörlerin, kompanzasyon için en uygun araçlar olduğu belirtilebilir. [Bayram, 1999]

Kondansatörler, günümüzde kuvvetli akım tesislerinde gittikçe atmakta olan bir önem kazanmaktadır. Bunların beher kVAr başına maliyet bedelleri, orta büyüklükteki senkron kompanzasyonlarından daha düşük olduğu gibi, bu fiyatta büyük bir artış olmadan, bunların her güçte imali mümkündür. Kondansatörlerin tesisi kolaydır ve gerektiğinde kolaylıkla genişletilerek, güçleri artırılabilir. Ayrıca, bunlarda tüketici ihtiyacına göre rahat şekilde güç ayarı da yapılabilmektedir. Kondansatörlerin işletme emniyetleri çok büyük olduğu gibi, ömürleri uzun ve bakımlar da kolaydır. Yerleştirilecekleri yerde, hemen hemen hiç bir özellik aranmamakta olup, yer temini bir problem oluşturmaz. Gerekli kapasite, birçok kondansatör elemanının bir araya getirilmesiyle sağlanabilir. Bir arıza halinde, zarar gören bir eleman az bir masrafla yenisi ile değiştirilerek, işletmede uzunca bir süre kesintiye meydan vermeden onarım yapılmış olur.

Kondansatör tesisleri bir çok elemandan oluştuğu için, nakli kolay, tesisi ve bağlanması rahat, istenen kapasitenin elde edilmesi de hemen halledilebilmektedir.

2.2.3 Kondansatörlerin Hesabı

Kondansatörler, alternatif akım şebekesinde bir reaktans gibi etki gösterirler. Ohm cinsinden kapasitif reaktans :

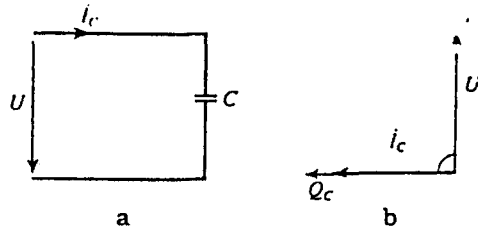
$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (2.8)$$

olup, C Farad cinsinden kondansatörün kapasitesi ve

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2.9)$$

açısal frekanstır. Ohm kanununa göre U gerilimine bağlanan bir kondansatörün çektiği I_C kapasitif akımı :

$$I_C = \frac{U}{X_C} \quad (2.10)$$



Şekil - 2.2 Tek fazlı bir şebekeye kondansatörün bağlanması

şeklinde ifade edilebilir. Bu akım, U gerilimine göre 90° önde gider. O halde, şebekeye bağlı bir kondansatörün şebekeden kapasitif bir akım çekmesi, şebekeye endüktif akım vermesine eşdeğerdir. Şekil - 2.2' de tek fazlı bir şebekeye kondansatörün bağlantısı gösterilmektedir.

Kondansatör gücü için :

$$Q_C = U_C \cdot I_C \cdot 10^{-3} \quad (2.11)$$

$$Q_C = U_C^2 \cdot \omega \cdot C \cdot 10^{-3}$$

$$Q_C = \frac{I_C^2}{\omega \cdot C} \cdot 10^{-3}$$

ifadesi elde edilir. Kondansatör gücü, reaktif güce göre 180° ileridedir yani her iki reaktif güç aynı doğrultuda fakat ters yöndedir. Öylelikle, kapasitif güç, endüktif gücü yok ederek kompanzasyon etkisi yapmaktadır.

Üç fazlı alternatif akım tesislerinde, kondansatörler, şebekeye yada tüketici uçlarına üçgen yada yıldız olarak bağlanabilirler. Üçgen bağlamada, her iki hat arasındaki kondansatörün kapasitesi C_Δ ile ve yıldız bağlamada ise her faza bağlanan kondansatörün kapasitesi C_Y ile gösterilirse, üçgen bağlama için :

$$Q_C = 3 \cdot U_h^2 \cdot \omega \cdot C_\Delta \cdot 10^{-3} \quad (2.12)$$

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U_h \cdot I_C \cdot 10^{-3}$$

$$Q_C = \frac{I_C^2}{\omega \cdot C_\Delta} \cdot 10^{-3}$$

ve yıldız bağlama için ise :

$$Q_C = U_h^2 \cdot \omega \cdot C_Y \cdot 10^{-3} \quad (2.13)$$

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U_h \cdot I_C \cdot 10^{-3}$$

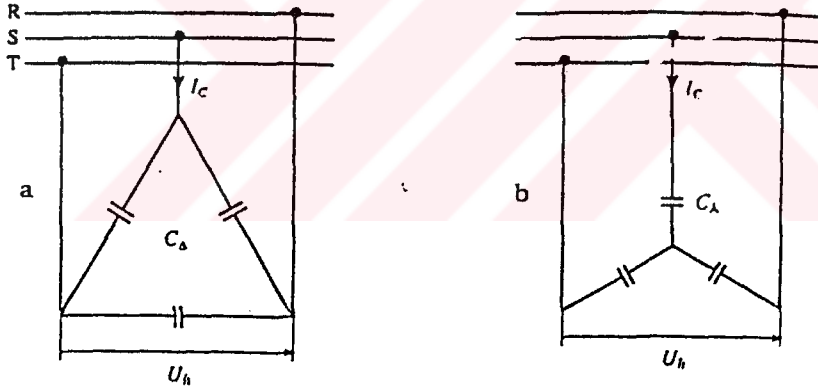
$$Q_C = \frac{3.I_C}{\omega.C_Y} \cdot 10^{-3}$$

ifadeleri verilebilir. Şekil - 2.3' de, üçgen ve yıldız bağlamalar gösterilmektedir.

Her iki sistemde de, Q_C gücünün eşit olduğu kabul edilirse :

$$C_Y = 3.C_{\Delta} \quad (2.14)$$

olarak bulunur. 2.14 nolu ifadeden çıkarılması gereken sonuç; yıldız bağlamada her bir faza bağlanan kondansatör kapasitesinin, üçgen bağlamadakine göre üç kat fazla olması gerektiğidir. [Bayram, 1999]

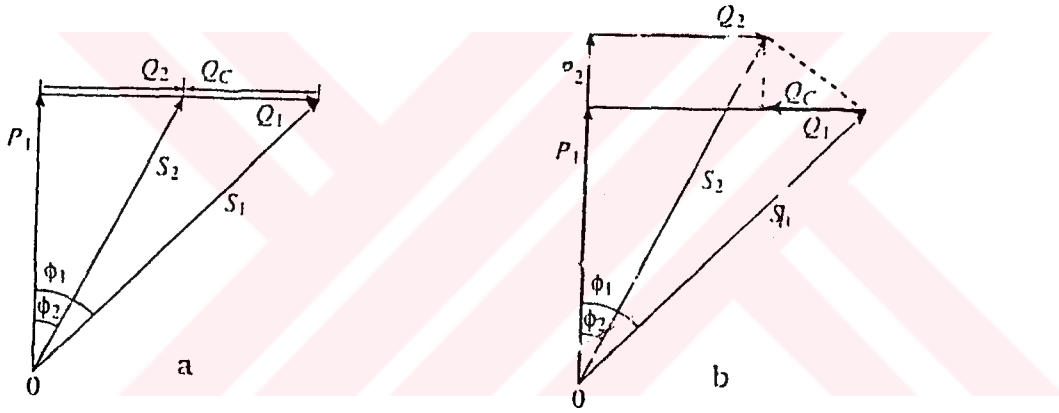


Şekil - 2.3 Üç fazlı alternatif akım şebekesinde kondansatörlerin üçgen ve yıldız bağlanması

Yıldız bağlamada, C_Y kondansatörünün uçlarına faz - nötr gerilimi uygulandığı halde, üçgen bağlamada, C_{Δ} kondansatörünün uçlarına $\sqrt{3}$ kadar daha büyük olan hat gerilimi uygulanır. Faz ve hat gerilimleri arasındaki farkın izolasyon bakımından çok önemli olmadığı alçak gerilim tesislerinde, üçgen bağlama, yıldız bağlamaya göre 1/3 kadar daha ucuzdur. İşte bu ekonomik nedenden ötürü, üçgen bağlama tercih edilmektedir. [Bayram, 1999]

2.2.4 Reaktif Güç İhtiyacının Belirlenmesi

Bir tüketicinin yada tesisin reaktif güç ihtiyacını tesbit etmek için öncelikle, şebekeden çektiği S_1 görünen gücünün, buna ait $\cos \varphi_1$ güç katsayısının ve bundan sonra güç katsayısının çıkartılması istenen $\cos \varphi_2$ değerinin bilinmesi gerekir. Güç katsayısını $\cos \varphi_2$ değerine çıkartmak için lazım olan reaktif gücü yada kondansatör gücünü belirlemek için iki yol vardır. Bunlardan birincisinde, $\cos \varphi_1$ güç katsayısı altında çekilmekte olan P_1 aktif gücü sabit tutulur ve buna göre şebekeden çekilen görünen güç S_2 gibi daha küçük bir değere düşer. İkinci hesap yolunda ise, S_1 görünen gücü, $\cos \varphi_2$ güç katsayısında da aynı değeri muhafaza eder ve bu durumda şebekeden çekilmekte olan aktif güç, P_2 gibi büyük bir değer alır. Bu iki hesap yoluna ait fazör diyagramları şekil - 2.4' de gösterilmiştir.



Şekil - 2.4 Reaktif güç ihtiyacının tesbiti

a- Nakledilen görünen gücün azaltılması

(Aktif güç sabit)

b- Nakledilen görünen gücün artırılması

(Görünen güç sabit)

Şekil - 2.4a' ya göre, kompanzasyondan önceki reaktif güç :

$$Q_1 = P_1 \cdot \tan \varphi_1$$

$$(2.15)$$

ve kompanzasyondan sonraki reaktif güç ise :

$$Q_2 = P_2 \cdot \text{tg } \varphi_2 \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilebilir. Buna göre, kondansatör gücü için :

$$Q_C = Q_1 - Q_2 \quad (2.17)$$

$$Q_C = P_1 \cdot (\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)$$

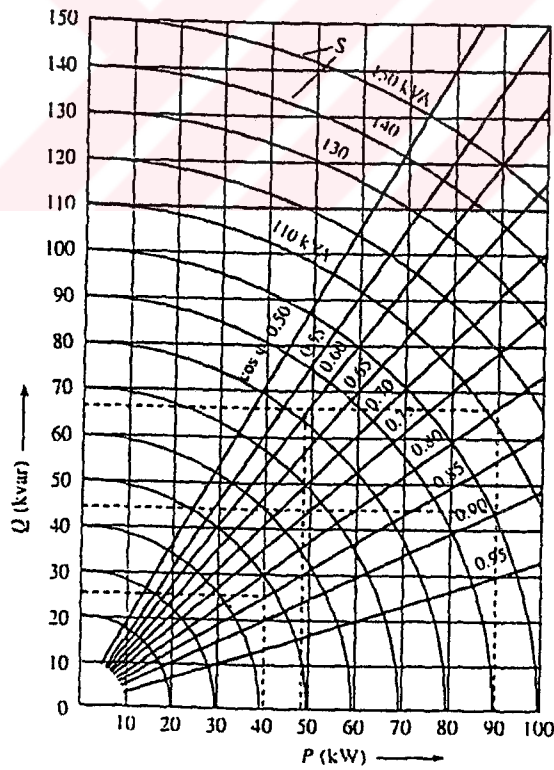
olarak elde edilir. Şayet, 2.17 nolu ifadedeki tanjantların farkı :

$$\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2 = k \quad (2.18)$$

k gibi bir katsayı ile gösterilirse, kondansatör gücü için :

$$Q_C = k \cdot P_1 \quad (2.19)$$

yazılabilir.



Şekil - 2.5 Aktif güç ile güç katsayısı yardımıyla görünen güç, reaktif güç ve kondansatör gücünün bulunmasını sağlayan çizelge

Pratikteki uygulamalarda, yukarıda bahsedilen her iki hesap yoluna da hiç girilmeden, 2.18 nolu ifadedeki k katsayısını veren çizelge - 2.1' in yardımı ile, bir tesisin yada tüketicinin, belirli bir $\cos \varphi_1$ güç katsayısını istenen bir $\cos \varphi_2$ güç katsayısına çıkartmak için gerekli olan reaktif güç ihtiyacı belirlenebilir. Bu çizelge, yukarıda bahsi geçen düzeltme için, beher KW aktif güç başına lazım gelen reaktif güç miktarını vermektedir. Kondansatör gücünü bulmak için çizelgeden elde edilen k değeri, tesisin aktif gücü ile çarpılır.

Aktif ve reaktif güçler birbirine diktir. Görünen güç, aktif güç ile φ açısı teşkil eder. Görünen güç hipotenüs olmak üzere, bunların bir dik üçgen oluşturmaları özelliğinden yararlanılarak şekil - 2.5' deki çizelge teşkil edilebilir. [Bayram, 1999]

Çizelge - 2.1 Mevcut $\cos \varphi_1$ değerini istenen bir $\cos \varphi_2$ değerine çıkarmak için
beher KW aktif güç başına gerekli reaktif güç

Mevcut $\cos \varphi_1$	Arzu edilen $\cos \varphi_2$										
	0.7	0.75	0.8	0.82	0.84	0.86	0.88	0.9	0.92	0.94	0.96
0.30	2.16	2.30	2.42	2.48	2.53	2.59	2.65	2.70	2.76	2.82	2.89
0.35	1.66	1.80	1.93	1.98	2.03	2.08	2.14	2.19	2.25	2.31	2.36
0.40	1.27	1.41	1.54	1.60	1.65	1.70	1.76	1.81	1.87	1.93	2.38
0.45	0.97	1.11	1.24	1.29	1.34	1.40	1.45	1.50	1.56	1.62	1.69
0.50	0.71	0.85	0.98	1.04	1.09	1.14	1.20	1.25	1.31	1.37	1.44
0.52	0.62	0.76	0.89	0.95	1.00	1.05	1.11	1.16	1.22	1.28	1.35
0.54	0.54	0.68	0.81	0.86	0.92	0.97	1.02	1.08	1.14	1.20	1.27
0.56	0.46	0.60	0.73	0.78	0.84	0.89	0.94	1.00	1.05	1.12	1.19
0.58	0.39	0.52	0.66	0.71	0.76	0.81	0.87	0.92	0.98	1.04	1.11
0.60	0.31	0.45	0.58	0.64	0.69	0.74	0.80	0.85	0.91	0.97	1.04
0.62	0.25	0.39	0.52	0.57	0.62	0.67	0.73	0.78	0.84	0.90	0.97
0.64	0.18	0.32	0.45	0.51	0.56	0.61	0.67	0.72	0.78	0.84	0.91
0.66	0.12	0.26	0.39	0.45	0.49	0.55	0.60	0.66	0.71	0.78	0.85
0.68	0.06	0.20	0.33	0.38	0.43	0.49	0.54	0.60	0.65	0.72	0.79
0.70		0.14	0.27	0.33	0.38	0.43	0.49	0.54	0.60	0.66	0.73
0.72		0.08	0.22	0.27	0.32	0.37	0.43	0.48	0.54	0.60	0.67
0.74		0.03	0.16	0.21	0.26	0.32	0.37	0.43	0.48	0.55	0.62
0.76			0.11	0.16	0.21	0.26	0.32	0.37	0.43	0.50	0.56
0.78			0.05	0.11	0.16	0.21	0.27	0.32	0.38	0.44	0.51
0.80				0.05	0.10	0.16	0.21	0.27	0.33	0.39	0.46
0.82					0.05	0.10	0.16	0.22	0.27	0.33	0.40
0.84						0.05	0.11	0.16	0.22	0.28	0.35
0.86							0.06	0.11	0.17	0.23	0.30
0.88								0.06	0.11	0.17	0.25
0.90									0.06	0.12	0.19
0.92										0.06	0.13
0.94											0.07

Kondansatör gücünü bulmak için, mevcut $\cos \varphi_1$ in karşısında ve istenen $\cos \varphi_2$ nin altındaki değer, tesisin gerçek aktif gücü (KW) ile çarpılır.

2.2.5 Bir Tesise Ait Güç Değerlerinin Belirlenmesi

Bir tüketici tesiste kompanzasyon gücünü tesbit edebilmek için, bu tesisin görünen, aktif ve reaktif güçlerinden herhangi ikisinin yada bunlardan birisi ile güç katsayısının bilinmesi gerekir. Buna göre gerekli olan kondansatör gücü bulunur. Bu işlem yapılırken tesis ile ilgili iki farklı durum göz önünde tutulabilir :

- a) Proje safhasında ve herhangi bir ölçü aletinin mevcut olmadığı tesis için, nominal güç yada etiket değerleri ile güç katsayısı da bilinmelidir. Bu sayede gerekli olan kondansatör gücü hesaplanabilir.
- b) İşletmede olan ve bazı ölçü aletlerinin mevcut olduğu bir tesis için ise çeşitli haller söz konusu olabilir.

Bir ampermetre yada bir voltmeter yardımı ile hat akımı ve hat gerilimi ölçülerek tesisin görünen gücü 2.1 ifadesi ile hesaplanabilir. Aktif ve reaktif güçlerin bulunabilmesi için ise güç katsayısının bilinmesi gerekmektedir. $\cos \varphi$ 'nin belirlenmesi için tesise bir $\cos \varphi$ metre de bağlanılabılır.

Bazı hallerde ise, tesiste aktif ve reaktif güç ölçümü için yazıcı wattmetre ve Varmetre bulunabilir. Bu durumda, bahsi geçen ölçü aletlerinin gösterdiği ortalama aktif güç P ve reaktif güç Q değerleri okunur.

$$\text{tg } \varphi_1 = \frac{Q}{P} \quad (2.20)$$

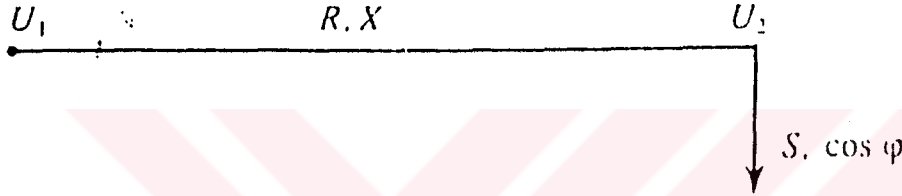
olarak elde edilebilir. Arzu edilen güç katsayısı $\cos \varphi_2$ bilinirse, hesaplanacak olan $\text{tg } \varphi_2$ yardımı ile okunacak olan ortalama aktif ve reaktif güç değerlerinden hareket ederek gerekli olan kondansatör gücü :

$$Q_C = Q - P \cdot \text{tg } \varphi_2 \quad (2.21)$$

şeklinde belirlenebilir.

2.3. Güç Katsayısının Düzeltilmesinin Yararları

Bu ana kadar, güç katsayısının düzeltilmesinin hem şebeke hem de tüketici bakımından çeşitli yararları olduğuna değinildi. Bu başlık altında bahsi geçen yararlar hesaplama yöntemi ile gösterilecektir. Bundan sonra yapacak olduğumuz hesaplamalarda, besleme hattına ait omik direnç R , reaktif direnç X olarak ifade edilecektir. Aşağıdaki şekilde, U_1 besleme hattının başındaki faz gerilimi, U_2 ise besleme hattının sonundaki faz gerilimidir.



Şekil - 2.6 Bir besleme hattı

2.3.1 Güç Katsayısının Düzeltilmesinin Şebekeye Sağladığı Yararlar

Güç katsayısının düzeltilmesi ile, şebeke diye kastedilen üretim, iletim ve dağıtım tesislerinde hissedilir derecede bir ferahlama meydana gelir. Bu yararlar üç madde ile özetlenebilir :

- a) Şebekenin güç taşıma yeteneği artırılmış olur. Şekil - 2.4a' daki gibi, hat sonundan çekilen aktif güç P olmak üzere, kompanzasyondan önce çekilen görünen güç :

$$S_1 = P / \cos \varphi_1 \quad (2.22)$$

ve kompanzasyondan sonra çekilen görünen güç :

$$S_2 = P / \cos \varphi_2 \quad (2.23)$$

olduğuna göre bu ikisi arasındaki fark :

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (2.24)$$

ve hat başından çekilen görünen güce oranı :

$$\% \Delta S = \frac{\Delta S}{S_1} \cdot 100 \quad (2.25)$$

$$\% \Delta S = \left[\frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} - 1 \right] \cdot 100$$

şeklinde ifade edilebilir. O halde kompanzasyon sayesinde tesisin yükü %Δs oranında azalır yada gerekirse, tesis ařırđ oranda yüklenmeden %Δs oranında ek bir tüketicisi daha beslenmesi mümkün olur.

şekil - 2.4b' deki görünen güce sabit tutulursa, şebekeden çekilebilecek aktif güce :

$$P_1 = S \cdot \cos \varphi_1 \quad (2.26)$$

değerinden

$$P_2 = S \cdot \cos \varphi_2 \quad (2.27)$$

değerine çıkar. Bu da :

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (2.28)$$

değerine yada

$$\% \Delta p = \frac{\Delta P}{P_1} \cdot 100 \quad (2.29)$$

$$\% \Delta p = \left[\frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} - 1 \right] \cdot 100$$

kadar bir aktif güç artış oranına tekabül eder.

b) Şebekedeki ısı kayıpları da azalmış olmaktadır. Hat üzerinden çekilen aktif gücün sabit olduğu kabul edilirse, kompanzasyonsuz durumda faz başına ısı kaybı :

$$P_{z1} = \frac{R \cdot P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi_1} \quad (2.30)$$

ve kompanzasyonlu durumda faz başına ısı kaybı :

$$P_{z2} = \frac{R \cdot P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi_2} \quad (2.31)$$

şeklinde hesaplanabilir. Güç katsayısının düzeltilmesi ile bağlı ısı kaybı cinsinden elde edilen kazanç :

$$\% z = \frac{P_{z1} - P_{z2}}{P_{z1}} \cdot 100 \quad (2.32)$$

Çizelge - 2.2 $\cos \varphi_2 = 1$ durumunda, çeşitli güç katsayıları için şebekedeki ısı kaybı azalışı

$\cos \varphi_1$	$\% z$
1.0	0
0.9	19
0.8	36
0.7	51
0.6	64
0.5	75

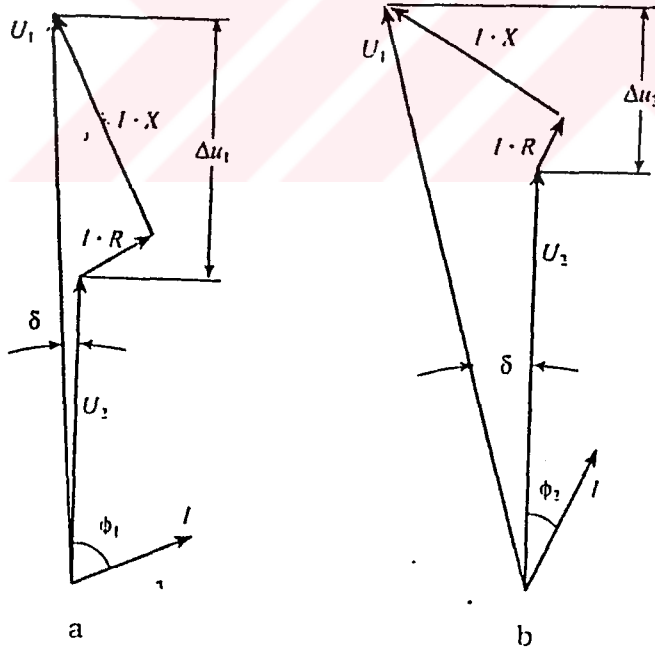
$$\%z = \left[\frac{\cos^2 \varphi_2}{\cos^2 \varphi_1} - 1 \right] \cdot 100 \quad (2.32a)$$

olarak hesaplanabilir. Yukarıdaki çizelgede, tam kompanzasyon yapılması durumunda yani $\cos \varphi_2 = 1$ ' e göre, çeşitli güç katsayıları için şebekedeki ısı kayıplarının hangi oranda azalacağı listelenmiştir.

c) Gerilim düşümü de önemli miktarlarda azalmaktadır. Yine şekil - 2.6' daki besleme hattını göz önüne alacak olursak, hat üzerindeki boyuna gerilim düşümü :

$$\Delta u = I.R.\cos \varphi + I.X.\sin \varphi \quad (2.33)$$

şeklinde ifade edilebilir. Güç katsayısı $\cos \varphi_1$ ' den $\cos \varphi_2$ ' ye çıkarıldığında gerilim düşümünün aldığı değer şekil - 2.7' deki fazör diyagramı ile gösterilmektedir.



Şekil - 2.7 Güç katsayısının gerilim düşümü üzerine etkisi

- Kompanzasyon öncesi durum
- Kompanzasyon sonrası durum

Hat üzerinden çekilen P aktif gücünün sabit olduğu kabul edilsin. İzin verilen max. bağlı güç kaybının :

$$\%p_z = \frac{3 \cdot I^2 \cdot R}{P} \quad (2.34)$$

olduğu göz önüne alınırsa, bağlı gerilim düşümü olarak :

$$\% \varepsilon = \left[p_z \cdot \cos^2 \varphi + \frac{P \cdot X}{U_N^2} \cdot \operatorname{tg} \varphi \right] \quad (2.35)$$

ifadesi elde edilir.

İstendiği takdirde, boyuna gerilim düşümü sıfır olacak şekilde bir enerji nakli de yapmak mümkündür. Bu durumda, reaktif akım değeri :

$$I_q = - I_p \cdot \frac{R}{X} \quad (2.36)$$

yada

$$\operatorname{tg} \varphi = - \frac{R}{X} \quad (2.37)$$

olmalıdır. Bu ifadelerdeki eksi işareti, reaktif akımın kapasitif karakterde yani faz açısının negatif olması gerektiğini göstermektedir.

Alçak gerilim şebekelerinde reaktif direnç ihmal edildiğinden dolayı, gerilim düşümü :

$$\Delta u = I_p \cdot R \quad (2.38)$$

olduğundan, burada reaktif akımın etkisi görülmez. Bilindiği gibi, endüktif bir direnç üzerinden kapasitif bir akım geçerse, çıkış gerilimi giriş geriliminden daha büyük olur ve bu durumda aşırı kompanzasyon meydana gelir. Örneğin pratikte karşılaşılabilecek bir durum olarak, bir transformatörün çıkışına kompanzasyon sağlaması amacıyla bir kondansatör bağlanmış olabilir. Fakat tesis düşük güçle çalıştığı yada hiç enerji çekmediği durumlarda transformatör üzerinden çekilen endüktif akım düşecektir. Kondansatör tam kapasite ile gerilime bağlı olduğundan dolayı, kapasitif akım kompanze edilemez ve bu akımın fazla olan kısmı transformatör üzerinden şebekeye geçer. Bu durumda kondansatörün bağlı olduğu taraftaki gerilim yükselir. Transformatörün bağlı kısadevre gerilimi % u_k ise :

$$\% \varepsilon = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{Q_c}{S_{Tr}} \quad (2.39)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Genellikle tüketici uçlarında gerilim yükselmesi arzu edilmez. Çünkü gerilimin nominal değerinin üzerine çıkması sakıncalı sonuçlar doğurur. Dolayısıyla, aşırı kompanzasyondan daima kaçınmak gerekir. Çekilen gücün zamana bağlı olarak değiştiği tesislerde otomatik kompanzasyon yapılması suretiyle gerilim yükselmelerinin önüne geçilmektedir.

d) Kompanzasyonun tüketiciye sağladığı yarar olarak ise, güç katsayısının düzeltilmesi durumunda reaktif enerji sarfiyatı nedeniyle ek bir enerji bedeli ödenmemesi gösterilebilir.

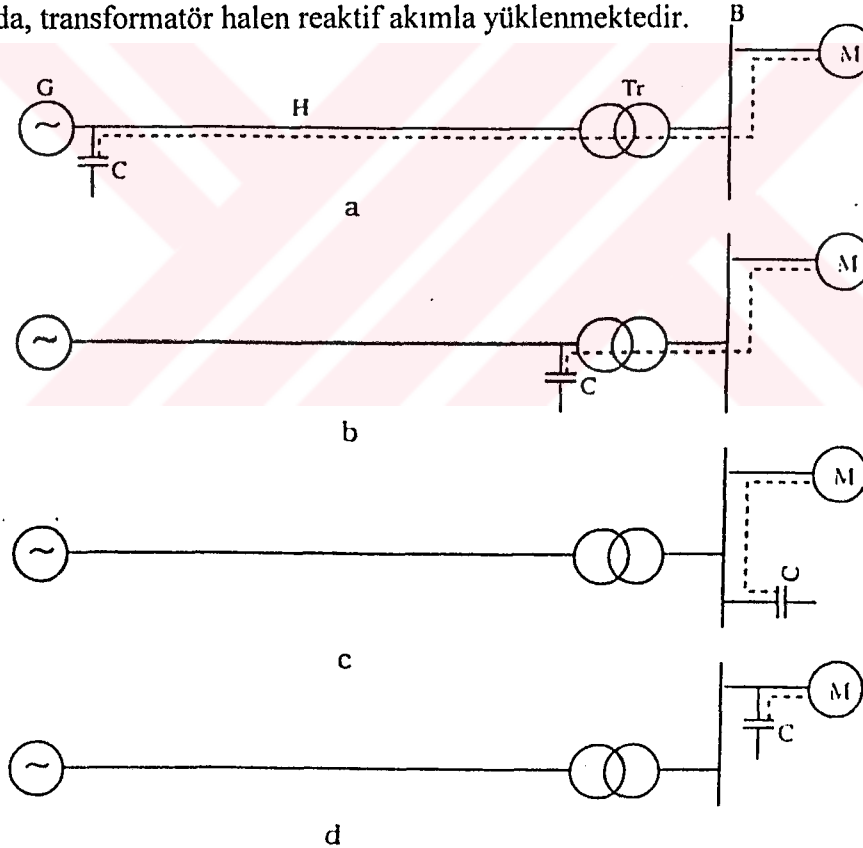
2.4 Kompanzasyon Tesisinin Düzenlenmesi

Kondansatörlerin kullanılacakları yerlere göre tertiplenme şekillerinin de önemi büyüktür. Kondansatör tesislerinden azami ölçüde yararlanmayı sağlamak amacıyla, bunların yapacakları göreve göre tesis yerinin ve bağlama şeklinin uygun bir tarzda seçilmesi gerekir.

Şekil - 2.8'de kompanzasyon için kullanılan kondansatörlerin yerleştirilmesi bakımından en uygun yerin seçilmesine yönelik bazı örnekler verilmektedir. Bahsi geçen şekilde, B barasına bağlı olan bir M tüketicisinin T_r transformatörü ve H besleme hattı üzerinden, bir santralde bulunan G generatörü tarafından beslendiği kabul edilmektedir.

Şekil - 2.8a' da hiç bir kompanzasyon tesisi ön görülmemiştir. Dolu çizgi ile gösterilen ve tüketicinin ihtiyacı olan P aktif gücü ile yine bu defa kesik çizgi ile gösterilen Q reaktif gücü generatör tarafından üretilmektedir. Reaktif gücün santralde üretildiğini işaret etmesi bakımından, generatörün yanına, paralel olarak bir kondansatör bağlanmıştır.

Şekil - 2.8b'de ise kompanzasyon tesisi transformatörün yüksek gerilim tarafına inşa edilmiş olup, bu durumda her ne kadar generatör ve besleme hattı reaktif güç üretimi ve iletiminden kurtulmuş olsa da, transformatör halen reaktif akımla yüklenmektedir.



Şekil - 2.8 Kompanzasyon tesisi için en uygun yerin seçilmesi

- Kompanzasyonsuz durum
- Yüksek gerilim tarafındaki kompanzasyon
- Alçak gerilim tarafındaki kompanzasyon
- Tüketicinin yanındaki kompanzasyon

Şekil - 2.8c' de kondansatör alçak gerilim barasına yerleştirilmiş ve nihayet şekil - 2.8d' de ise kondansatör doğrudan doğruya tüketici uçlarına bağlanarak tesis reaktif akımdan kurtarılmıştır. Buradan elde edilen sonuca göre, kondansatörün bağlanacağı en uygun yerin, kompanzasyonu yapılacak olan tüketicinin hemen yanı olduğu görülmektedir.

Tüm bunlardan hareketle, belirli bir kompanzasyon gücü elde etmek için, şekil - 2.8b ve c' de işaret edildiği gibi, yüksek yada alçak gerilim tesislerine bağlı olan kondansatörlerin izolasyon özelliklerinin farklı olacağı gibi bunların kapasitelerinin de farklı olacağını belirtmek isabetli olur. Bilindiği gibi, transformatörün primer tarafındaki empedansın, sekonder taraftaki empedansa oranı :

$$\dot{u}^2 = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (2.40)$$

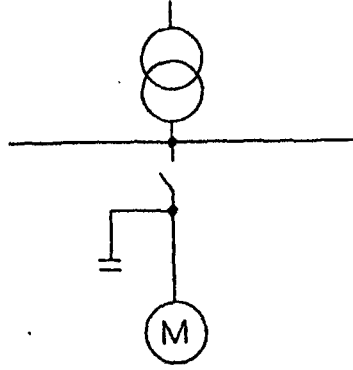
şeklindedir. Burada \dot{u} transformatörün dönüştürme oranıdır. O halde transformatörün primer tarafına yerleştirilecek olan kondansatörün kapasitesi, C_1 ve aynı işi yapmak için sekonder tarafa yerleştirilecek olan kapasitenin değeri de C_2 ise :

$$\dot{u}^2 = \frac{C_2}{C_1} \quad (2.41)$$

olarak elde edilir. Bu şekilde kondansatörün yerini tesbit ettikten sonra, bunların nasıl düzenleneceği ve bağlanacağı planlanır. Belirli bir kompanzasyon işini yapacak olan kondansatörler belli başlı üç şekilde düzenlenmektedir.

2.4.1 Bireysel Kompanzasyon

Sürekli olarak işletmede bulunan büyük güçlü tüketicilerin reaktif güç ihtiyacını temin etmek için, kondansatörler tüketicinin uçlarına doğrudan doğruya paralel bağlanırlar ve müşterek bir kontaktör yada devre kesici üzerinden tüketici ile birlikte devreye sokulup çıkartılırlar.



Şekil - 2.9 Bireysel kompanzasyon

Çizelge – 2.3 Transformatör eaktif gücünü kompanze etmek için gerekli olan
Kondansatör gücü

Trafo reaktif gücünü doğrultmak için gerekli kondansatör gücü	Trafo oranı	DIN'e göre yağlı ve kuru tip trafoların açık devre kayıpları				Azaltılmış açık devre kayıplı yağlı ve kuru tipi trafolar	
		Yağlı		Kuru tip (GEAFOL)		Trafo reaktif gücü (açık devre)	Kondansatör gücü
		Trafo reaktif gücü (açık devre)	Kondansatör gücü	Trafo reaktif gücü (açık devre)	Kondansatör gücü		
		kVA	kVA	kvar	kVA	kvar	kVA
Açık devre (yüksüz) 3 fazlı, Primer tarafı 20 kV'a kadar sekonderi 400 V ve % 4 veya % 8 reaktanslara sahip trafoların bireysel kompanzasyonu	250	4.5	5	2.8	3	1.6	2
	315	7.9	7.5	3.6	4	1.9	2
	400	8.2	7.5	4.4	4	2.2	2
	500	10.6	10	4.7	5	2.5	3
	600	13.2	12.5	5.7	5	3.2	3
	800	15.5	15	6.5	7.5	3.6	4
	1000	19.0	20	7.5	7.5	4.0	4
	1250	20.6	20	10.1	10	5.0	5
	1600	23.2	25	10.6	10	5.3	5
	2000	27.0	25			7.0	7.5

Kondansatör gücü doğru bir şekilde yüke göre seçilmelidir. Bireysel kompanzasyonun sıkça kullanıldığı yükler endüksiyon motorları, trafolar ve bazı zamanlarda da deşarj lambalarıdır. Transformatör için yapılan bireysel kompanzasyonda, bu makinanın açık devresindeki reaktif güç tüketimine göre kondansatörlerin seçilmesi tavsiye edilir. Çizelge - 2.3' de, bahsi geçen seçim için gerekli bilgiler verilmektedir. Güç katsayısı doğrultulması, sabit değerli bir kondansatör ünitesiyle transformatörde sağlandığında, düşük yük durumları için, trafonun aşırı kompanze edilmemesi de sağlanmalıdır.

Endüksiyon motorları için kondansatör tayini, motorun yüksüz durumdaki reaktif gücünün %90' ını aşmayacak şekilde yapılmalıdır. Aksi halde durdurma anında kendi kendini ikaz durumu söz konusu olacak ve aşırı gerilim meydana gelecektir. [Kocaoğlu, 1999]

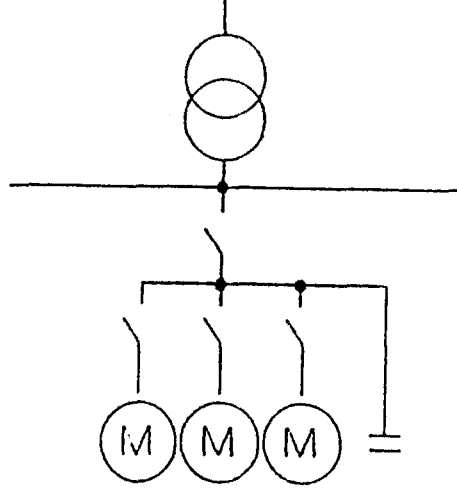
Pratikteki uygulamalarda, motor anma gücü 40 KW ve üzerinde ise, kompanzasyon maksatlı bağlanan kondansatör gücü motor gücünün yaklaşık %35'i kadar seçilir. Motor gücünün 20 KW - 40 KW arası olduğu durumlarda, kondansatör gücü bu değerlerin %40' kadar seçilmelidir. 20 KW' tan düşük güçlü motorlarda ise kondansatör gücü, motor gücünün yaklaşık %50' si kadar olmalıdır. [Kocaoğlu, 1999]

Bağlanacak olan kondansatörlere rağmen, yüksüz ve az yüklü durumlar ile sık sık yol vermenin gerektiği durumlarda güç katsayısı 0.9' un altına düşecektir. Bu gibi durumları önlemek için, bir merkezi reaktif güç kontrol ünitesi kullanılarak ek kompanzasyon sağlanabilir. [Kocaoğlu, 1999]

2.4.2 Grup Kompanzasyonu

Bir çok tüketicinin bulunduğu bir tesiste her tüketicinin ayrı ayrı kondansatörler ile donatılacağı yerde, bunların müşterek bir kompanzasyon tesisi tarafından beslenmesi daha pratik ve ekonomik sonuçlar verir.

Bu tür kompanzasyonda, bir kontaktör yada devre kesici ile grup olarak anahtarlanan birden fazla motor yada deşarj lambasının kompanzasyonunu güç katsayısı doğrultma cihazları sağlar. Kondansatörlerin anahtarlanması için ilave şalt cihazlarına gerek yoktur.



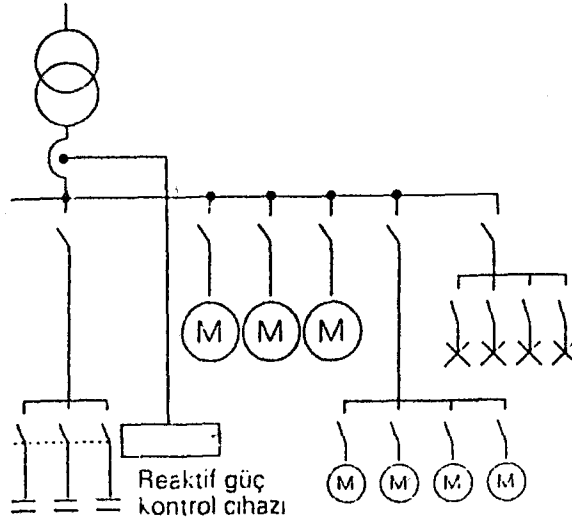
Şekil - 2.10 Grup kompanzasyonu

2.4.3 Merkezi Kompanzasyon

Grup kompanzasyonunun biraz daha genişletilmesi ile elde edilir. Merkezi kompanzasyonda tüketici sayısı çok olduğundan, ayrıca bunların değişik zamanlarda değişik miktarlarda yüklenmekte olduklarından, kondansatör gücünü değişken olan kompanzasyon gücüne uydurabilmek için bir ayar düzeni bulunmaktadır. Bu şekilde, hem düşük hem de aşırı kompanzasyon durumundan kaçınılmış olur.

Güç katsayısı doğrultma üniteleri şalt panolarında yada dağıtım panolarında yer alırlar. Reaktif güç kontrol ünitesi, devreye alınıp çıkartılan kondansatör grupları ile reaktif gücü, gelen besleme noktasında ölçen bir kontrol cihazını içerir. Şayet gelen reaktif güç referans değerinden uzaklaşırsa, kontrol cihazı kondansatör gruplarının anahtarlarını kullanarak devreye alır yada çıkartır. Kondansatör gücünün, tesis için istenen güç katsayısını sürekli olarak sağlayacak şekilde seçilmesi gereklidir.

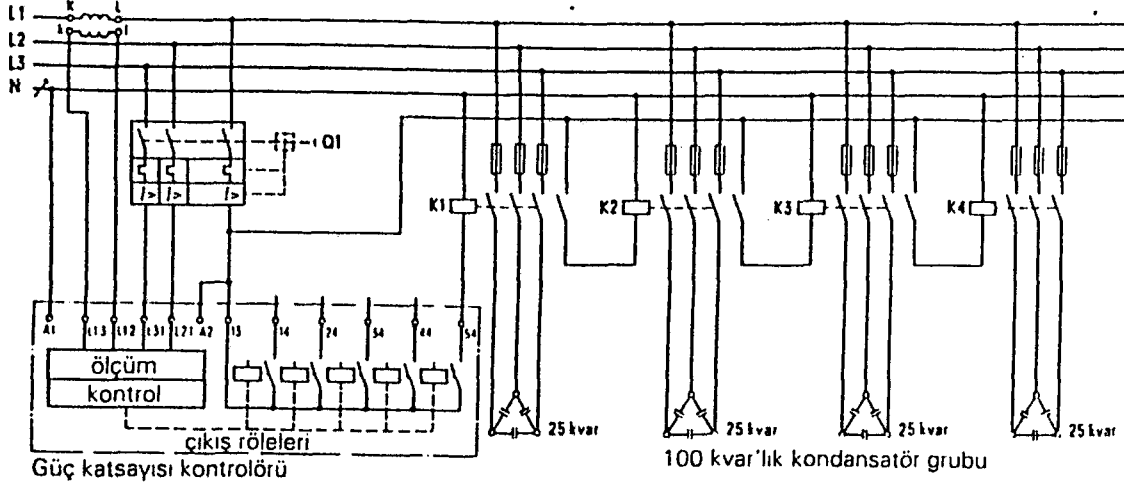
Reaktif güç kontrol üniteleri, kondansatör kademelerinin sayısı ve oranlarıyla tanınırlar. Örneğin 250 KVAR'lık 5 kademeli kondansatör gücü 50 KVAR'lık kademelerle devreye alınıp çıkartılabilir. Düşük kayıplı kondansatörlerin kullanımı, kondansatör panoları ve kontrol cihazlarının, şalt panoları ve dağıtım panolarına entegre edilmesine imkan sağlamaktadır. [Kocaoğlu, 1999]



Şekil - 2.11 Merkezi kompanzasyon

Merkezi kompanzasyon sisteminin kullanıldığı şebekede anahtarlama darbelerine yol açmamak için büyük kondansatör grupları tek bir yük olarak anahtarlammamalıdır. Günümüzde kullanılmakta olan reaktif güç kontrol ünitelerinde, 25 KVar' dan büyük kondansatör grupları her birisi kendi anahtarlama sistemine sahip küçük miktarlara bölünürler. Kondansatör grubundaki ilk anahtarlama elemanı, anahtarlama sinyalini doğrudan doğruya reaktif güç kontrol elemanından alır ve geriye kalan tüm anahtarlar, bir önceki anahtardan yararlanılarak devreye sokulurlar. Örneğin anahtarlama elemanı olarak kontaktörler kullanılmakta ise, bir önceki kontaktörün yardımcı kontakları, kendisinden sonra gelen kontaktörü anahtarlama üzere kullanılır. Böylelikle büyük bir grup, kendisini oluşturan küçük parçaların hızlı ve arka arkaya anahtarlama ile devreye alınıp, şebekeye yumuşak bir şekilde kapasitif yükleme yapılmış olur. Şekil - 2.12' de, 100 KVar' lık bir merkezi kompanzasyon sisteminin devre şeması gösterilmektedir.

Kondansatör grupları devreden çıkartıldıktan sonra, 10 saniyenin altındaki deşarj bobinleri kullanılarak deşarj sağlanıp, tekrar anahtarlama hazır hale getirilirler. [Kocaoğlu, 1999]



Şekil - 2.12 100KVAR'lık bir merkezi kompanzasyon devre şeması

Kondansatörleri anahtarlayan AC anahtarların, ki genelde kontaktörler bu işi yapmaktadır, kapasitif yükü anahtarlama yeteneklerini artırmak ve varsa kontak ömürlerini uzatmak için, kondansatörlerle anahtarlama elemanları arasında, üretici firmalar tarafından önerilen endüktivite değerlerine sahip kablo dönüşleri yapılmalı, yada ön şarj dirençleri kullanılmalıdır. Özel olarak kondansatör kontaktörleri kullanıldığında bunlara gerek kalmaz. Yine, filtre devreleri kullanılması halinde, AC kontaktörler için kablo dönüşü uygulamasına gerek kalmayacaktır.

2.4.4 KOMPANZASYON UYGULAMALARI SEÇİMİ

Bireysel yüklerin, sabit değerli kondansatör üniteleriyle mi yoksa merkezi güç katsayısı kontrol üniteleri kullanarak mı kompanse edilmesi gerektiğinin kararı ekonomik ve teknik faktörler birlikte ele alınarak verilmelidir. Her ikisi de eşit değerde kondansatör kullanan merkezi ve bireysel kompanzasyonlarda 100 - 400 KVAR'lık güç aralığında, merkezi kompanzasyonun maliyeti bireysel kompanzasyonun maliyetinden %30 - 40 kadar daha fazla olmaktadır. [Kocaoğlu, 1999]

Bununla beraber, tesislerin bir çoğunda olduğu gibi, tüm yüklerin hiç bir zaman aynı anda çalışmadığı ve daha düşük değerde kondansatörler kullanan bir merkezi kompanzasyon

ünitesinin genelde kompanzasyon için yeterli olması gerçeğini de kabul etmek gerekmektedir.

Tüm bu durumlar göz önüne alındığında, bireysel kompanzasyon için :

- a) Sürekli sabit enerji ihtiyacı bulunan ve yüksek görev faktöründe çalışan,
- b) Sürekli sabit enerji ihtiyacı bulunan ve büyük yüklerde çalışan

sistemler için uygun ve ekonomik olduğu belirtilebilir. Yükleri besleyen kablolardaki akımı azaltmasına rağmen, bireysel kompanzasyonun kondansatör gücünü sürekli olarak yükün reaktif gücüne adapte etmesi de mümkün değildir.

Merkezi kompanzasyon için de yine :

- a) Çok sayıda küçük yük ile birlikte değişken enerji ihtiyacının olduğu durumlar,
- b) Çok sayıda küçük yük ile birlikte farklı görev faktörlerinin enerji dağıtım sistemlerine bağlı olduğu durumlar

avantajlı olduğu söylenebilir.

Kondansatör gücü, tesisin reaktif güç gereksinimi kadar olmalıdır. Enstalasyon ve daha sonraki genişletmeler göreceli olarak basittir. merkezi konumunun dolayı güç katsayısı doğrultma cihazlarının periyodik bakım kontrolleri kolaylaşmış durumdadır.

3. STATİK REAKTİF GÜÇ KONTROLU

Statik reaktif güç kontrol sistemleri (SRS), enerji şebekesindeki çeşitli parametrik durumlara göre çıkış değerleri ayarlanabilen statik güç üretici ve / veya tüketicileri olarak çalışabilen kompanzatörlerdir. “ Statik “ ibaresi ile belirtilmek istenen, bu sistemlerin senkron kompanzatörler gibi dönen yada hareket eden ana parçalarının bulunmayışıdır. Böylelikle, bir statik reaktif güç kontrol sisteminde, bir statik reaktif güç üreticisi (SRÜ) yada tüketicisi (SRT) ile uygun bir kontrol ünitesinin varlığından söz edilebilir. [Miller, 1987]

3.1 Statik Reaktif Güç Kontrol Sistem Çeşitleri

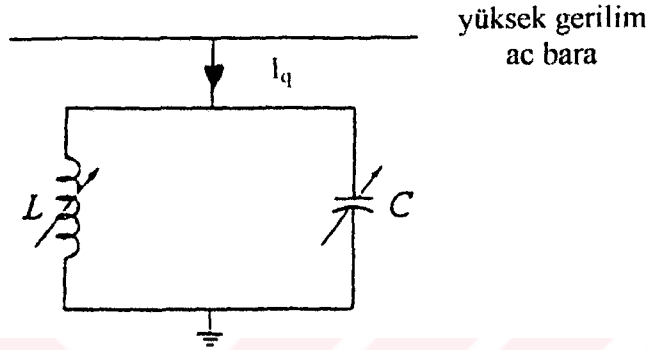
SRS’ nde kısmen yada tamamen kullanılan bazı reaktif güç kontrol elemanları şunlardır :

- a) Tristör kontrollü bobin (TKB),
- b) Tristör anahtarlama kondansatör (TAK),
- c) Tristör anahtarlama bobin (TAB),
- d) Tristör kontrollü transformator (TKT),
- e) Şebeke denetimli yada kendinden denetimli konverter (ŞDK - KDK)
- f) Doyuma ulaşmış bobin (DUB)

Günümüzde,iletim hatlarının kompanzasyonunda SRS’ lerinin kondansatör blokları ile kullanım uygulamalarına sıkça rastlamaktayız. Söz konusu uygulamayı daha iyi anlatmak için, yüksek gerilim uygulamalarında, ideal bir kompanzatörü göz önüne alarak, çeşitli konfigürasyonlara ilişkin karakteristikleri incelemek yöntemiyle SRS’ nin genel prensiplerine değinmek gerekir.Bir SRS, her bir faz gerilimini ayrı ayrı kontrol edebilme yeteneğine sahiptir. Dolayısıyla, bu tip sistemler ile gerilimdeki pozitif yönlü sapmaların yanısıra negatif yönlü sapmalar da kontrol edilebilmektedir. Fakat, bu tezi asıl ilgilendiren husus, enerji sisteminin dengeli temel frekanstaki performansıdır. [Miller, 1987]

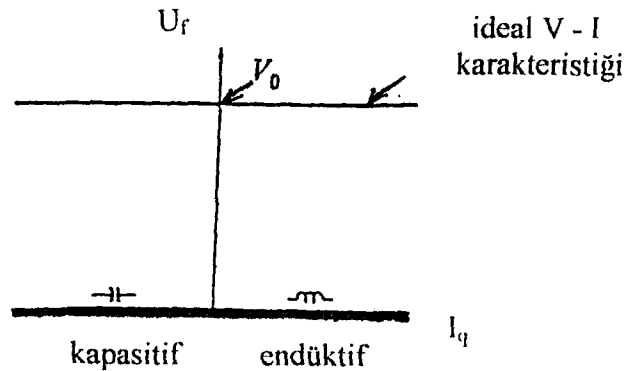
3.2 SRS' nin Temel Frekanstaki Performansı

Öncelikle ideal bir SRS' nin karakteristikleri üzerinde duralım. Enerji sistemlerinin çalıştırılması göz önüne alındığında, SRS esasen birbirine paralel bağlı bir kondansatör ile bobinin eşdeğeri olup ve şekil - 3.1' de de gösterildiği gibi her ikisi de ayarlanabilir olmak kaydıyla, bağlı buldukları baraya ait reaktif güç ve gerilimi ayarlayabilmektedir anlaşılmaktadır.



Şekil - 3.1 İdeal bir SRS

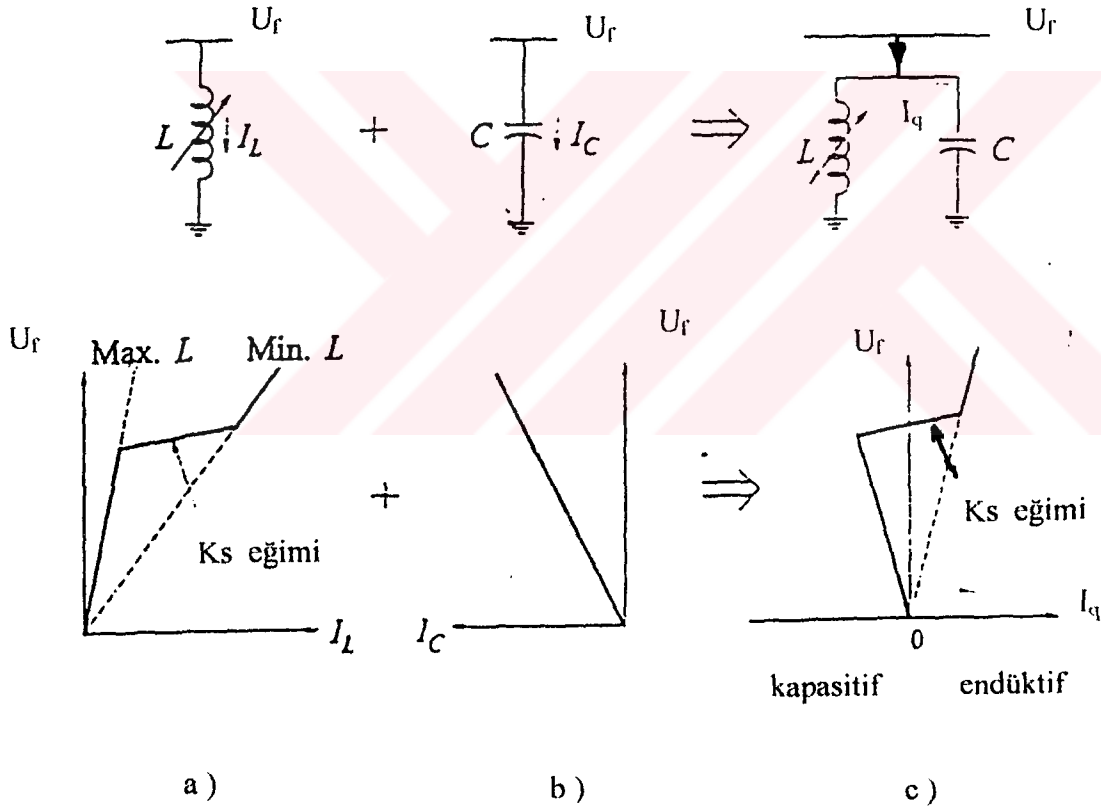
İdeal bir SRS, gerilimi sabit bir değerde tutmak üzere, oldukça hızlı ve herhangi bir aktif yada reaktif güç kaybına meydan vermeden limitsiz olarak reaktif güç absorbe edebilir yada üretebilir. SRS' nin performansı, ac bara gerilimi (U_f) ile bu baradan çekilen reaktif akımın (I_q) birbirleri ile değişimini gösteren grafik yardımı ile belirtilebilir. İdeal bir SRS' ne ait kararlı hal V - I karakteristiği Şekil - 3.2' de gösterilmektedir. [Miller, 1987]



Şekil - 3.2 İdeal bir kompanzatöre ait V - I karakteristiği

Gerçek bir SRS göz önüne alındığı takdirde ise durum biraz daha farklıdır. Söz konusu olan SRS' nin ayarlanabilir (kontrollü) bir reaktör (bobin) ile sabit değerli bir kondansatörden oluştuğunu kabul edecek olursak, elde edilecek çalışma karakteristiklerinin oldukça geniş bir kullanım alanında yeterince genel olduğu görülmektedir.

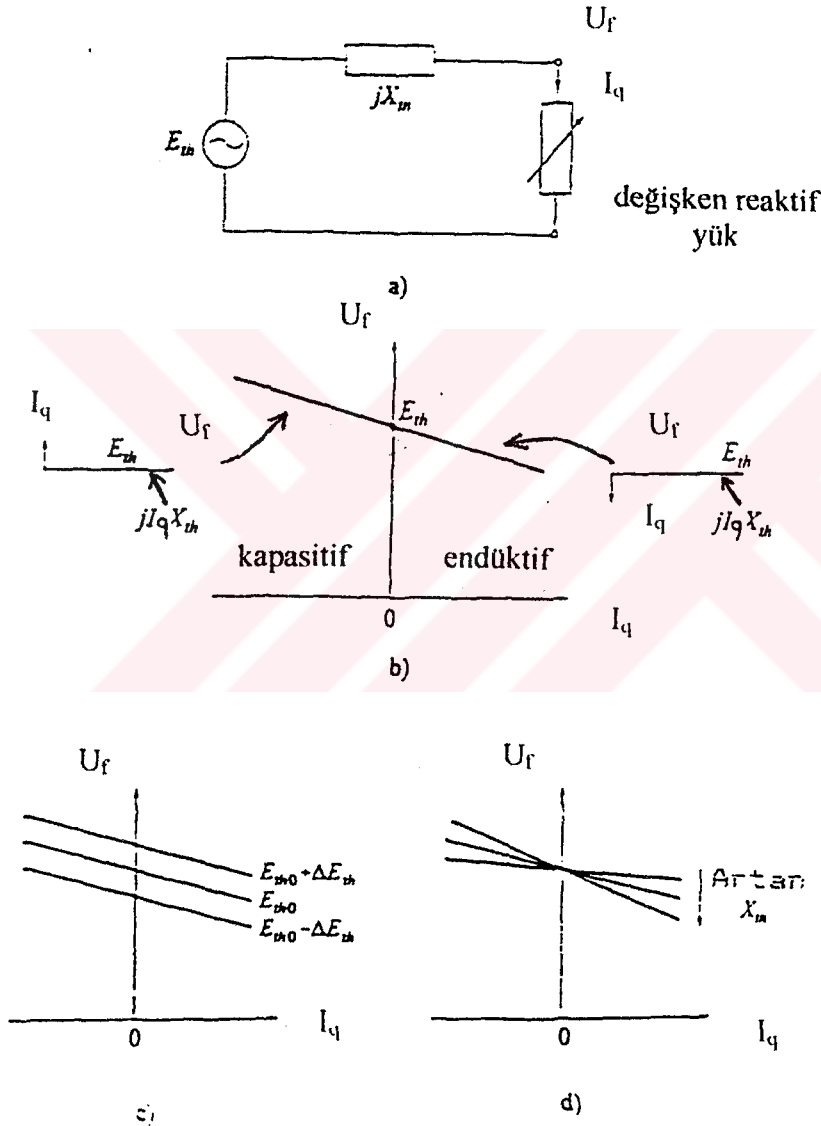
Şekil - 3.3' de, kontrollü bir reaktör ile sabit değerli bir kondansatörden oluşan SRS' ne ait karakteristik değişimler gösterilmektedir. Sistemin karakteristik eğrisinin elde edilişi, her iki komponentin ayrı ayrı karakteristik eğrilerinin göz önüne alınışı ile sağlanmıştır. Şekil - 3.3a' da, pratikteki uygulamalarda kullanılmakta olan reaktörlere ilişkin karakteristik gösterilmektedir.



Şekil - 3.3 SRS' ne ait karakteristikler

- a) Kontrollü reaktör
- b) Sabit değerli kondansatör
- c) SRS

Tüm bunların yanı sıra enerji sisteminin de karakteristik özellikleri de dikkate alınmalıdır. Bir SRS' nin enerji sistemine uygulaması esnasındaki performans analizi, hem SRS' nin hem de söz konusu elektrik tesisinin beraberce karakteristik özelliklerinin göz önüne alınması ile ortaya çıkabilecektir. Sisteme ilişkin V - I karakteristiği, SRS tarafından gerilimi regüle edilecek olan bara uçlarından bakıldığında elde edilen Thevenin eşdeğer devresinin belirlenmesi ile bulunacaktır. Şekil - 3.4' de ilgili eşdeğer devrenin çıkarılışına ait çeşitli karakteristik eğri ve devre şemaları gösterilmektedir.



Şekil - 3.4 Enerji sistemi geriliminin reaktif akıma bağlı değişimi

- Yüksek gerilim şebekesinin Thevenin eşdeğer devresi
- Gerilim - Reaktif akım eğrisi
- E_{th} gerilimindeki değişikliğin etkisi
- X_{th} reaktansındaki değişimin etkisi

Şekil - 3.4a' daki empedans endüktif karakteristiktir. Şekil - 3.4b' de ise gerilimin reaktif akıma bağlı değişimi gösterilmektedir. U_f gerilimi kapasitif yük akımında lineer olarak artmakta, endüktif yük akımında ise yine lineer olarak azalmaktadır.

Her bir enerji şebekesi durumu, şekil - 3.4a' daki gibi eşdeğer bir devre olarak ifade edilebilir. Şekil - 3.4c ve d ise, şebekeye ait $V - I$ karakteristiğinin E_{th} ile gösterilen besleme gerilimindeki ve X_{th} ile gösterilen sistem eşdeğer reaktansındaki değişikliklerden nasıl etkilendiğini açıkça ortaya koymaktadır.

SRS' ine sahip bir enerji şebekesinin karakteristiklerini incelerken bara gerilimi :

$$U_f = E_{th} - X_{th} \cdot I_q \quad (3.1)$$

olarak ifade edilir. Reaktans eğiminin belirlediği kontrol aralığı içerisinde, bir SRS' nin karakteristik ifadesi :

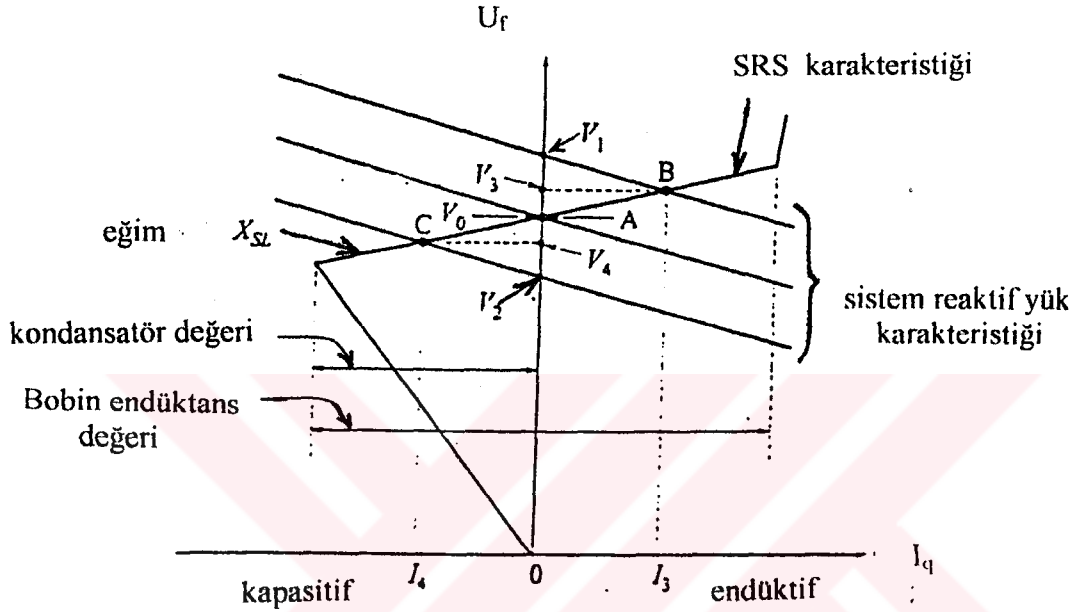
$$U_f = U_0 + X_{st} \cdot I_q \quad (3.2)$$

şeklinde belirtilebilir. Kontrol aralığı dışında bulunan gerilimler için, V / I_q oranı şekil - 3.5' de gösterilmekte olan eğrinin iki ucu arasındaki eğime eşittir. Tüm bunlar, SRS sisteminde kullanılmakta olan bobin ve kondansatörlerin değerleriyle belirlidir.

Şekil - 3.5' de, SRS ve enerji sisteminin ait olan karakteristik bağıntılar grafik olarak verilmektedir. Üç değişik kaynak gerilimine karşılık gelen üç değişik sistem karakteristiği bahsi geçen şekilde göz önüne alınmaktadır. Ortadaki karakteristik eğri, nominal sistem durumunu göstermekte olup, $U_f = U_0$ ve $I_q = 0$ durumundaki A noktası üzerinde SRS' ni kesmekte olduğu varsayılmıştır.

Eğer sistem gerilimi ΔE_{th} kadar artacak olursa (söz gelimi sistem yük durumundaki azalmadan dolayı), SRS' nin bulunmadığı bir ortamda U_f U_1 değerine kadar artış gösterecektir. Bununla beraber, SRS' nin olduğu bir ortamda ise sistem çalışma noktası B' ye kayacak ve I_3 endüktif akımı çekilmek suretiyle gerilim değeri V_3 ' de kalacaktır. Benzeri

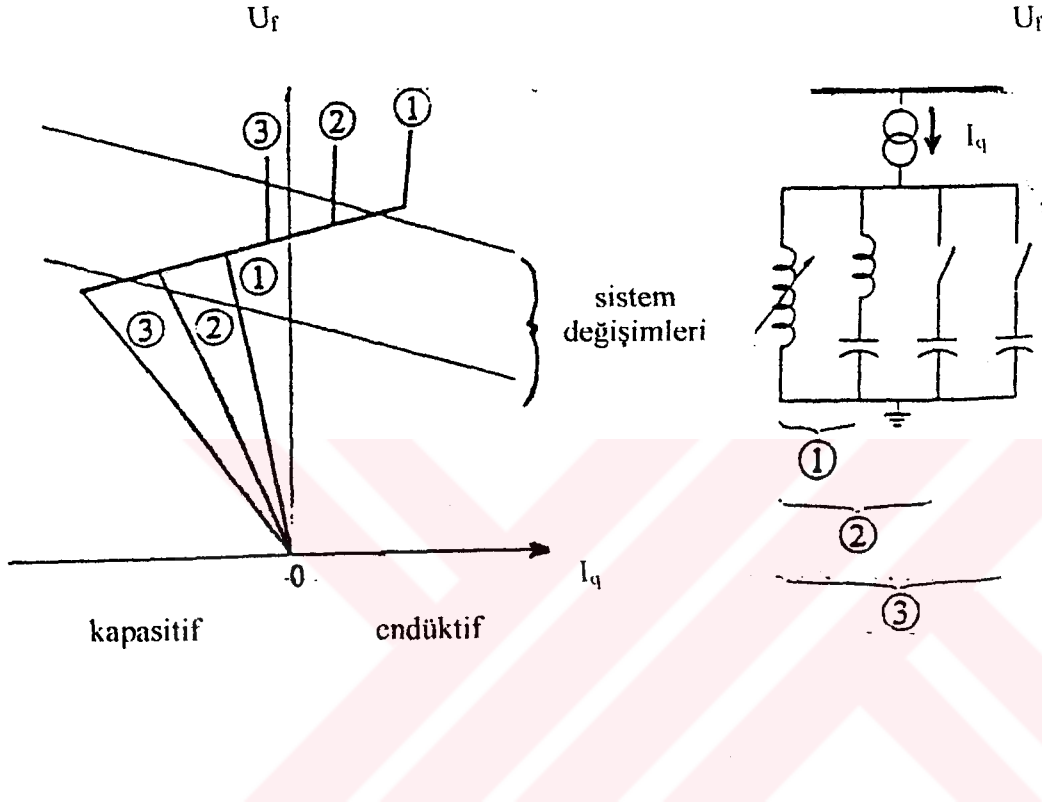
durum, kaynak gerilinin (söz gelimi sistemdeki yük miktarının artmasından dolayı) düşmesi durumunda ise, SRS' nin gerilim değerini V_2 yerine V_4 değerinde sabitlemesinde de gözlemlenecektir. Şayet SRS olmasa idi, besleme gerilimi V_2 değerini alacak idi. Eğer SRS karakteristiğinin eğimini ifade eden K_S sıfır olsa idi, yukarıda bahsi geçen her iki durum için de gerilim değeri U_0 ' a eşit olacaktı.



Şekil - 3.5 Belirli sistem durumlarına ait SRS karakteristik eğrisi

Anahtarlama sistemi ile çalışan kondansatörlerin etkisini göz önüne almak için, şekil - 3.5' deki örnek üzerine yoğunlaşmak gerekmektedir. Burada kullanılmakta olan SRS' nin kontrol aralığı, sistemdeki daha büyük çaplı değişiklikler dikkate alınmak üzere geniş tutulacaktır. Anahtarlama kondansatör blokları kullanılmak suretiyle SRS' nin sürekli kontrol aralığı artırılabilir. Bahsedilen durum şekil - 3.6' da gösterilmektedir. Buradaki kondansatörlerden ikisi anahtarlama olarak devreye girmektedir. Lokal gerilim dedektörleri kullanılmak suretiyle, otomatik olarak kondansatörler tristör yada kontaktörler vasıtası ile devreye alınıp çıkarılabilirler. Şekil - 3.6' daki sistemde, sabit olarak bağlı bulunan kondansatörün, harmonik filtreleme maksatlı bir de bobini bulunmaktadır.

Hemen belirtmek gerekir ki, SRS kesinlikle bir senkron makinanın yaptığı biçimde gerilim kaynağı olarak reaktif güç kompanzasyonunda bulunmaz. Onun yerine, bağlı olduğu noktadaki gerilimi, reaktif akım üreterek yada çekerek değiştirmek suretiyle ayarlar. Daha açıkçası, SRS, gerilimi mümkün olduğunca sabit tutacak ayarlanabilir bir reaktif yük olarak çalışmaktadır.



Şekil - 3.6 Sürekli kontrol aralığını artırmak için anahtarlamalı kondansatörlerin kullanılması

3.3 SRS' inde Kullanılan Elemanlar

Genellikle, bir SRS' ndeki elemanlar ayarlanabilir suseptans prensibine göre çalışmaktadır. Kontrollü suseptans ya bir bobin yada bir kondansatördür. Pratik uygulamalarda en çok kullanılan suseptans elemanları TKB ve TAK' dır.

3.3.1 Tristör Kontrollü Bobin (TKB)

Şekil - 3.7' de gösterilmekte olduğu gibi, TKB' de kullanılmakta olan temel elemanlar bir

bobine seri bağı olan ters - paralel bağı iki tristörden ibarettir. Tristörler, şebeke frekansının her iki alternansında da iletimi sağlamak için, yarı peryot boyunca, gerilimin sıfır geçiş noktalarına göre hesaplanan α tetikleme açısına bağı olarak devrede kalmaktadırlar. 90° ' ye kadar olan tetikleme açıları oranında iletim sağlanabilmektedir. Akım esasen reaktif ve sinüzoidal biçimdedir. 90° ile 180° tetikleme açıları arasında, şekil - 3.7(b)' de gösterilmekte olduğu gibi kısmi iletim sağlanmaktadır. 0° - 90° arasında, asimetrik olan dc akım bileşeni üretecekleri için tristörlere tetikleme açısı gönderilmemektedir. α tetikleme açısına bağı olmak üzere, σ iletim açısı :

$$\sigma = 2.(\pi - \alpha) \quad (3.3)$$

olarak ifade edilebilir.

Akımın ani değeri ise :

$$i = \left[\begin{array}{ll} \alpha < \omega t < \alpha + \sigma & \text{için} \\ \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi & \text{için} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \frac{\sqrt{2}.U_r.(\cos\alpha - \cos\omega t)}{X_L} \\ 0 \end{array} \right] \quad (3.4)$$

şeklinde belirlidir. Fourier analizi için ise akım ifadesinin temel bileşeni :

$$I_1 = \frac{U_r}{X_L} \cdot \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi} \quad (3.6)$$

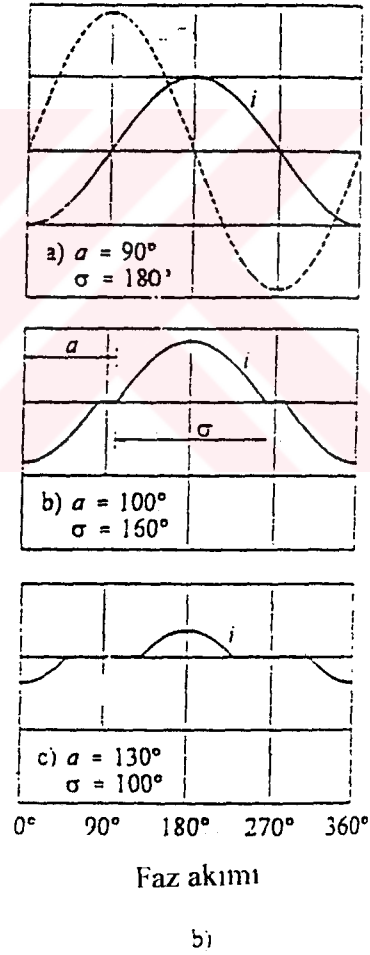
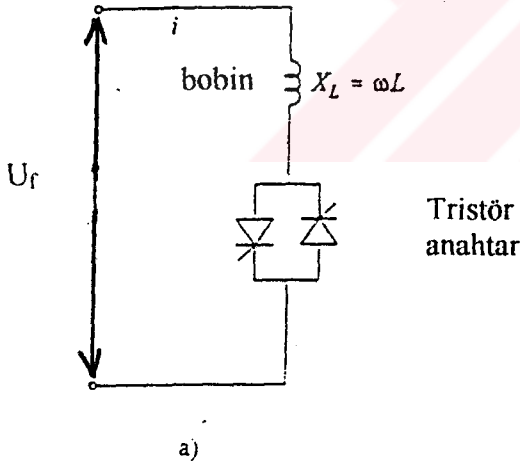
bağıntısı ile hesaplanabilir. Bu ifadede, I_1 ve U_r efektif değerler olup, X_L ise temel frekanstaki bobin reaktansdır. α tetikleme açısının artırılması, I_1 reaktif akım temel bileşeninin azalmasına etki edecektir. Bu

ise, bobinin efektif endüktans değerinin artmasına neden olacaktır. Akımın temel frekans bileşeni göz önünde bulundurulduğu sürece, TKB kontrolü bir suseptans gibi karşımıza çıkacaktır. α' ya bağlı olarak efektif suseptansı :

$$B(\alpha) = \frac{I_1}{U_r} = \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi \cdot X_L} \quad (3.7)$$

$$B(\alpha) = \frac{2 \cdot (\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi \cdot X_L}$$

bağıntısı ile ifade edebiliriz.



Şekil - 3.7 Tristör Kontrollü Bobin

- a) Temel elemanlar
b) Akım dalga şekilleri

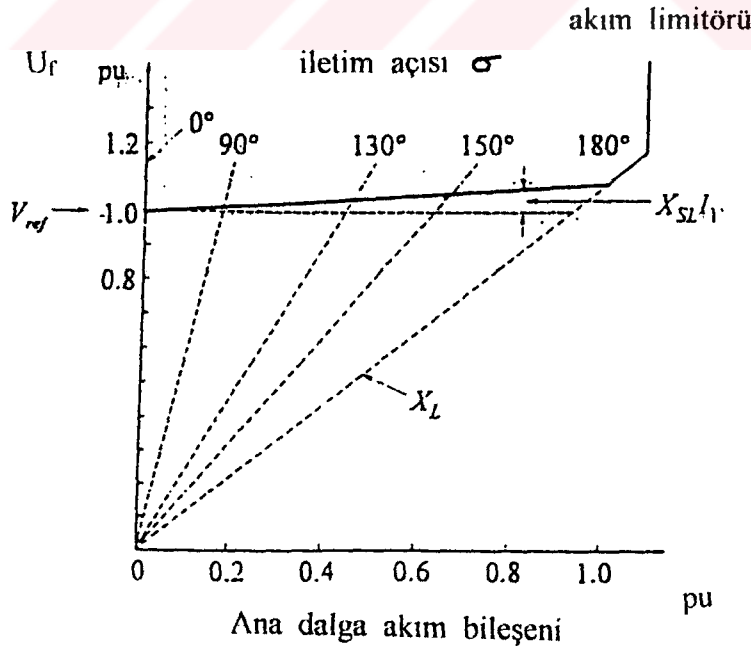
Maksimum efektif suseptans değerine sürekli iletim durumunda ($\alpha = 90^\circ$ ve $\sigma = 180^\circ$) erişilir ve $1/X_L$ değeri elde edilir. Minimum suseptans değeri ise 0 olup, $\alpha = 180^\circ$ ve $\sigma = 0^\circ$ iken meydana gelir.

Söz konusu suseptans kontrolü faz kontrol yöntemi olarak bilinmektedir. Bu suseptans, her yarım peryotta bir sistem üzerine kontrol edilebilir bir kesir olarak anahtarlanmaktadır. Gerek suseptans değeri ve gerekse TKB akımı düzgün ve sürekli dir.

TKB' ne sahip bir SRS' nde, tetikleme açılarının gerilimin en son sıfır geçiş anları gözetilmek suretiyle belirlendiği bir kontrol düzenine ihtiyaç vardır. Bazı dizayn tekniklerinde, direkt olarak arzu edilen suseptans değerine karşılık gelen sinyale göre çalışma prensibine rastlanmaktadır. Diğer bazı sistemlerde ise, gerilimdeki sapma, yardımcı stabilizasyon sinyalleri vb. parametreler dikkate alınarak hata sinyallerine göre tetiklemeler elde edilmektedir. Sonuçta elde edilen kararlı hal $U_r - I$ karakteristiği şekil - 3.8' de gösterilmekte olup :

$$U_r = V_{ref} + X_{SL} \cdot I_1 \quad (3.8)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir.

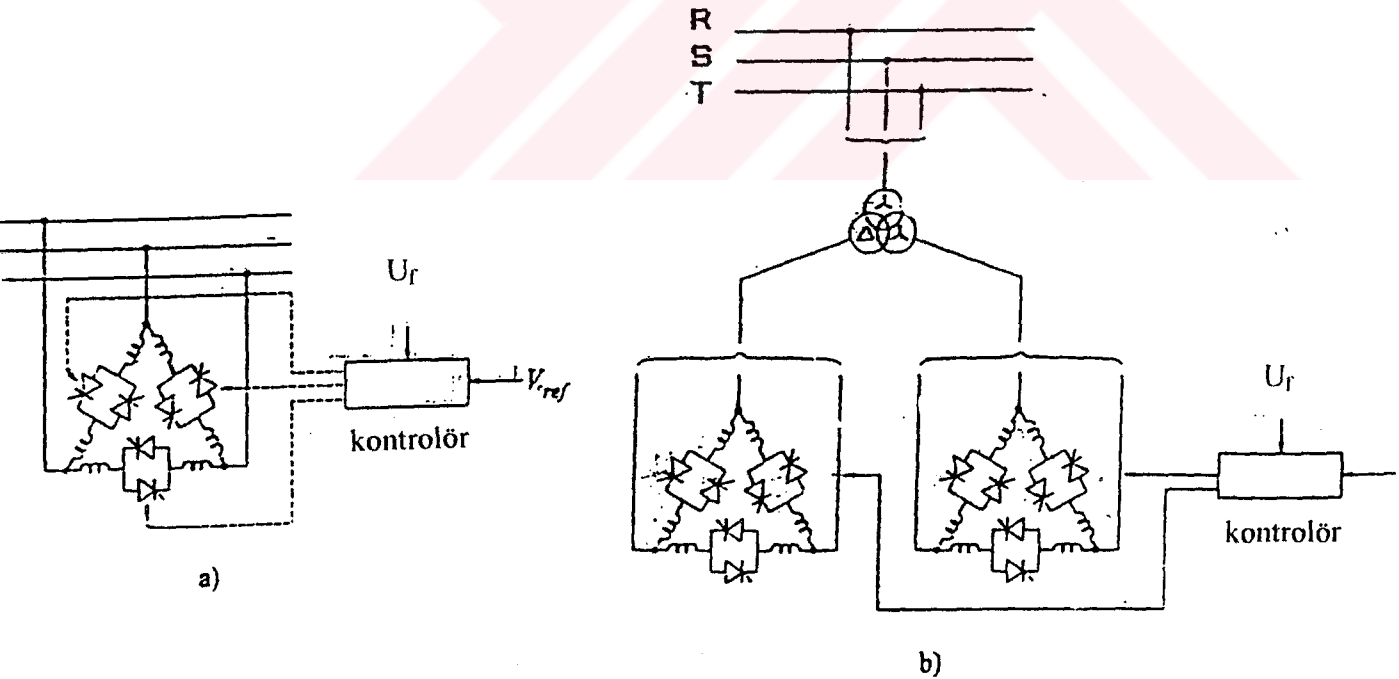


Şekil - 3.8 TKB' nin temel frekanstaki akım - gerilim karakteristiği

İfade 3.8' de, X_{st} , kontrol sistemi kazancı ile belirtilmekte olan reaktans eğimini simgelemektedir.

Şekil - 3.6' da da gösterilmekte olduğu gibi, sabit değerli yada anahtar kontrollü kapasiteler kullanılmak suretiyle, TKB gerilim kontrol karakteristiği kapasitif bölgeye doğru da uzatılabilir.

α açısı 90° den 180° ye doğru artırıldığında, akım değeri azalmakta ve dalga şekli ise sinüzoidal formdan gittikçe uzaklaşmaktadır. Diğer bir deyimle, TKB harmonik üretimine neden olmaktadır. Bu ana kadar hep tek fazlı sistem göz önüne alındığından dolayı, her iki tristörün tetikleme açıları da simetrik olduğunda, yalnızca tek sayılı harmonikler üretilmektedir. Üç fazlı sistemlerde ise, önerilmekte olan sistem üç adet tek fazlı TKB' nin, şekil - 3.9a' da gösterilmekte olduğu gibi yıldız bağlantısı ile elde edilen düzendir. Dengeli durumlarda, üç ve üçün katları olan tek sayılı harmonikler kapalı yıldız devre içersinde sirküle olacaklarından dolayı, hat akımında görünmeyeceklerdir. Söz konusu harmonik akımlarını yok etmek için sıklıkla kullanılan yöntem filtrelemedir. [İnan, 1992]



Şekil - 3.9 Üç fazlı TKB devre şeması

a) 6 - darbelle TKB

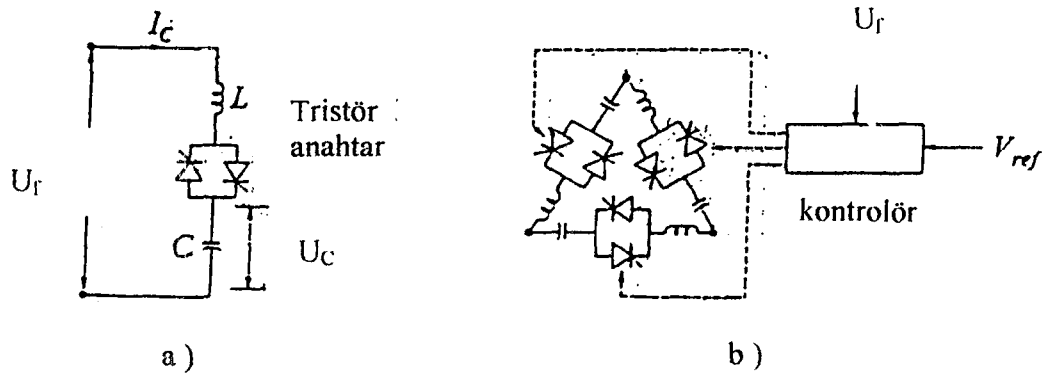
b) 12 - darbelle TKB

Şekil - 3.9b' de gösterilmekte olduğu gibi, 5. ve 7. harmonikleri elimine edebilmek için, biri yıldız diğeri üçgen bağlı iki sekondere sahip trafodan beslenen iki adet 6 darbeli ve eşit güçte TKB kullanılabilir. TKB' lere uygulanan gerilimler birbirlerine göre 30° faz farkına sahip olup, transformatörün primer tarafındaki hat akımında 5. ve 7. harmonikler görünmemektedir. Üç fazlı gerilimin her bir periyodunda 12 tristör tetiklenmekte olduğu için, bu yönteme 12 darbeli sistem de denmektedir. 12 darbeli düzen ile, ortaya çıkan en çok göz önünde bulundurulması gereken harmonikler 11. ve 13. harmonikler olmaktadır. Bunlar ise, kondansatörler yardımı ile kolayca filtrelenebilmektedirler. [İnan, 1992]

TKB' de kullanılmakta olan tristörlerin cevap verme süreleri 5 ms ile 10 ms arasında değişmektedir. Söz konusu olan bu süreler, ölçü ve kontrol devreleri ile tanımlanmaktadır. Kontrol sistemindeki kararlılığı sağlayabilmek için, cevap verme süresinin sınırlandırılması gerekmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı pratikteki uygulamalarda cevap verme süreleri, şebeke frekansı ile belirli olan periyodun 1 ile 5 katı arasında değişmektedir. [İnan, 1992]

3.3.2 Tristör Anahtarlama Kondansatör (TAK)

Tristör anahtarlama kondansatör metodunda, uygun değerlerde seçilmiş kondansatörlerin tristörler kullanılarak iletme sokulup çıkarılmasından yararlanır. Her bir tek fazlı TAK birimi, şekil - 3.10a' da gösterilmekte olduğu gibi, ters - paralel bağlı iki tristöre seri küçük değerli bir bobine yine seri olarak bağlanan bir kondansatörden oluşur.



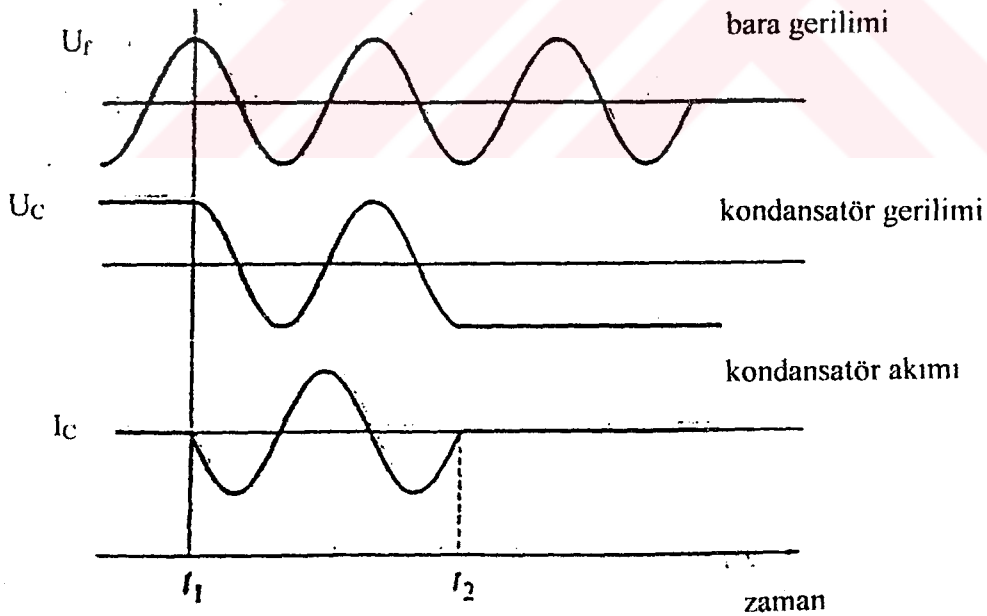
Şekil - 3.10 Tristör anahtarlama kondansatör

a) Tek fazlı ünite

b) Üç - fazlı ünite

Burada kullanılmakta olan bobin ile, şebeke ile devre arasında oluşacak rezonansları önlemek ve ani akım artışlarını bastırmakla birlikte anahtarlama anlarında oluşan transientlerin önüne geçmek amaçlanmaktadır. Üç fazlı uygulamalarda, şekil - 3.10b' de gösterilmekte olan üçgen bağlı olan devre kullanılmaktadır.

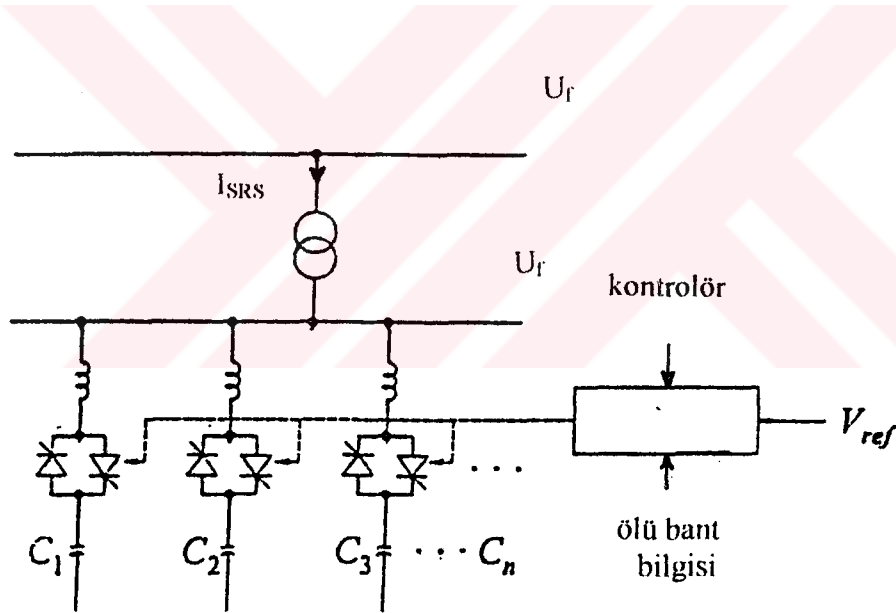
Kondansatörlerin rezonans frekansı ile dış devreye bağlı olarak, kondansatörlerin anahtarlama sırasında irili ufaklı transientler oluşacaktır. Tristör tetiklemeleri, sözü edilen transientleri en aza indirecek biçimde dizayn edilmektedirler. Bu ise, herhangi bir tristörün tetiklenmesi anında, bahsi geçen tristör uçlarındaki gerilim minimum düzeyde, ideal olarak 0 iken, mümkündür. Şekil - 3.11 çalışma prensibini göstermektedir. t_1 tetikleme anı (kondansatörün iletme sokulma anı), U_r faz gerilimi maksimum değerinde ve kondansatör gerilimi ile aynı polaritede olduğu ana denk düşürülerek transientlerden bağımsız bir anahtarlama sağlanır. t_2 , iletimden çıkarma anı ise, akım değerinin 0 olduğu ana denk getirilir. Bundan sonra ise, kondansatör, negatif yada pozitif polaritede, yeniden maksimum gerilim değerine şarj oluncaya dek, diğer anahtarlama işlemi için beklemede kalır.



Şekil - 3.11 TAK' ün anahtarlama prensibi

TAK tarafından kullanılan suseptans kontrol prensibi, integral çevrim kontrolü adıyla da bilinmekte olup, suseptans, yarım periyot sayısının integrali kadar sayıda anahtarlanmaktadır. Suseptans birkaç paralel birime bölünmekte olup, değeri ise iletim durumunda bulunan bu birimlerin sayısına bağlı olarak değişir. Her yarım periyotta bir istenilen ayar değişikliği yapılabilir. Bu tip bir kontrol tekniğinde harmoniklere rastlanmamaktadır.

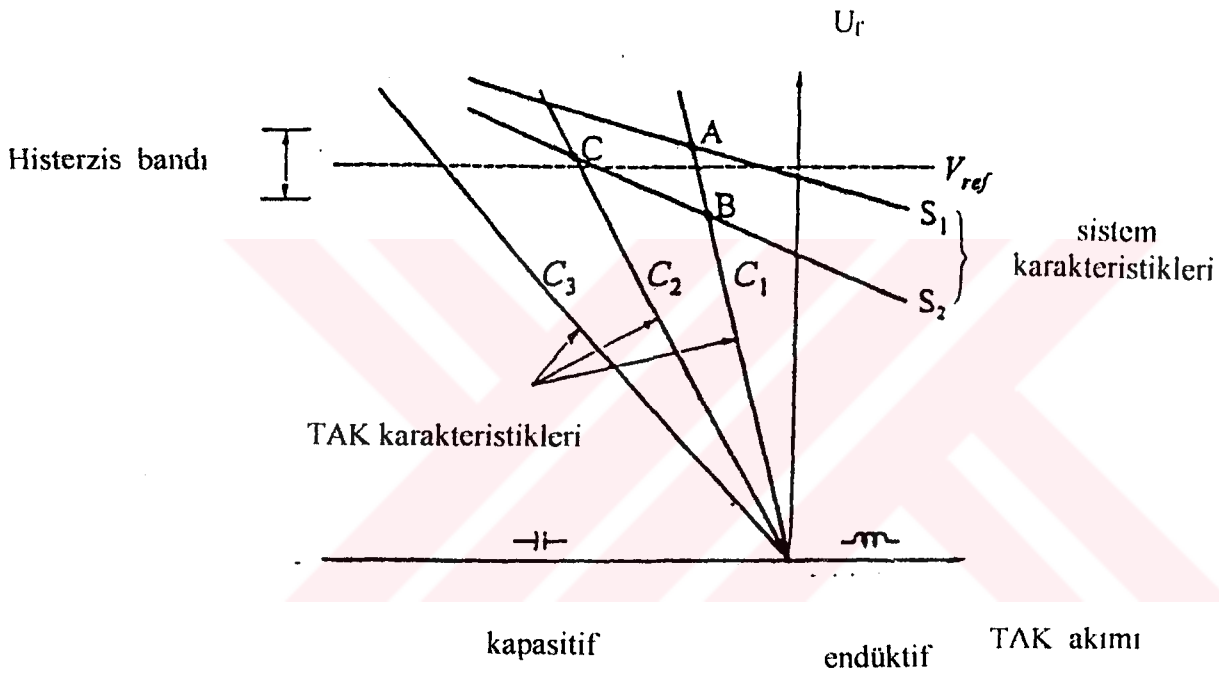
Şekil - 3.12' de, TAK' ün temel devre şeması ile paralel birimleri ve kontrol devresi gösterilmektedir. U_r bara gerilimi, daha önceden belirlenmiş olan bir V_{ref} referans geriliminden, belirli bir histerezis bandı dışarsında hangi yönde olursa olsun, taşıdığı anda tekrar bu bant dahiline dönüncüye dek gerekli sayıda kondansatör birimini anahtarlamak suretiyle kompanzasyonu sağlamış olur. Böylelikle, bütün bir kondansatör grubu yerine gerekli sayıdaki birimler anahtarlanmaktadır.



Şekil - 3.12 TAK 'ün paralel birimlerden oluşması

TAK' ün dinamik cevap vermesine bakacak olursak, söz konusu sisteme ilişkin şekil - 3.13' de gösterilen V - I karakteristiğini göz önüne almak gerekir. İlk göze çarpan nokta, gerilim

kontrolunun süresiz yada diğer bir söyleyiş tarzı ile basamaklı oluşudur. Söz konusu basamak sayısı ise, paralel birim sayısı ve kondansatör değeri ile belirlidir. Yüksek gerilim uygulamalarında, tristör fiyatları nedeniyle, paralel kondansatör birimi sayısı sınırlı tutulmaktadır. Güç sistemi V - I karakteristiği, sistemin durumu sürekli olarak değişmekte olduğu için, TAK V - I karakteristiğinden farklı noktalara düşmektedir. U_r bara gerilimi, referans gerilimine ilişkin histerezis bant genişliğinin yarısı kadar olan bir bölümde kontrol edilmektedir.



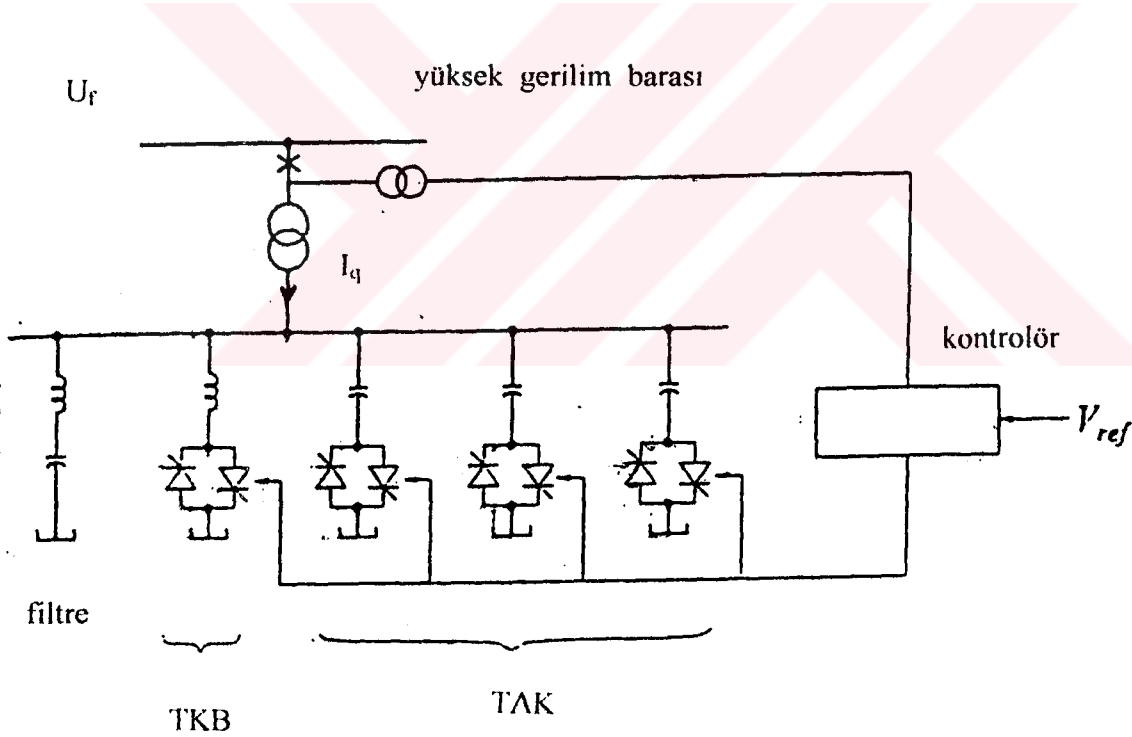
Şekil - 3.13 TAK ve güç sisteminin V - I karakteristikleri

Sistem, S_1 ile gösterilen çizgi üzerinde çalışmakta iken, C_1 kondansatörü devreye alınarak A noktasına ulaşılacaktır. Şayet sistem karakteristikleri aniden S_2 ile gösterilen kısma geçerse, bara gerilimi ilk etapta B çalışma noktası üzerindeki değerine düşer. TAK kontrol devresi bu durumda C_2 kondansatör birimini devreye alarak, çalışma noktasını C' ye, gerilim değerini ise böylelikle istenilen bir değere getirmiş olur. Bu durumda, kompanzasyon sisteminin akımı ayrı ayrı basamaklar halinde değişir. Kontrol devresinden, sistemdeki değişikliğe müdahale etmek için gönderilen bir komut, bir yarım periyottan diğer bir yarım periyota kadar olan süre süre içerisinde yerine getirilmiş olur.

3.4 SRS'nin Pratik Uygulamaları

İstenilen herhangi bir kontrol aralığı dahilinde, bir SRS dizaynı için TKB yada TAK' den arzu edileni seçilebilir. Farklı sistemler için bir kaç çeşit SRS tekniğinden pratik uygulamalarda başarı ile yararlanılmaktadır. Arzu edilen ve gereksinim duyulan cevap verme süresi, güç mertebesi, esneklik, kayıplar ve maliyet söz konusu uygulamalardaki en çok dikkate alınan hususlardır.

Şekil - 3.14' de, bir adet TKB, üç adet TAK ve harmonik filtresi de içeren (TKB tarafından üretilen harmonikleri süzmesi için) tipik bir SRS gösterilmektedir. Şebeke frekansında, filtreler kapasitif ağırlıklı olduklarından TKB kapasitesinin %10 - %30' u kadar bir oranda reaktif güç üretmektedirler. Düzgün bir kontrol karakteristiği elde edebilmek için, TKB akım kapasitesi, TAK akım kapasitesinden biraz daha fazla olmalıdır.

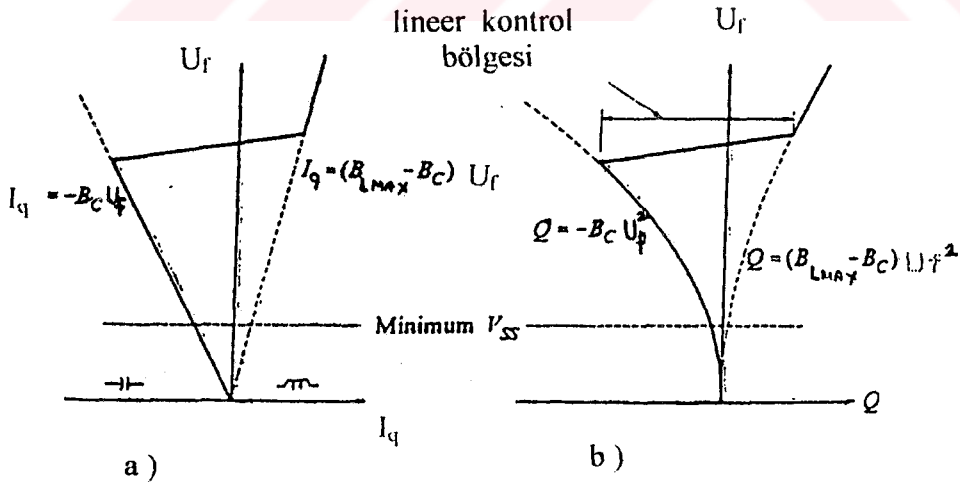


Şekil - 3.14 Tipik bir SRS uygulaması

Şekil - 3.15a' da ise, SRS' nin kararlı hal V- I karakteristiği gösterilmekte olup, buna bağlı olan V - Q karakteristiği ise şekil - 3.15b' de verilmiştir. Lineer kontrol bölgesi, bobine ait

$B_{L,MAX}$ maksimum suseptans değeri ile belirlenen sınırlar dahilinde olup, B_C toplam kapasitif suseptans değeri ise filtre kondansatörü ve servisteki kondansatör birimlerine bağlıdır. Şayet gerilim, belli bir değerin altına düşecek olursa (0,3pu), kontrol ve izolasyon sürme devreleri enerji yetersizliği nedeniyle SRS sisteminin çalışmamasına neden olabilir. Gerilim normal değerine döner dönmez, SRS yeniden çalışmaya başlayacaktır. Bununla birlikte, kısa süreli olmak kaydıyla, gerilim değerinin düşmesi ile birlikte, bir takım transient hatalar oluşabilmesine rağmen, SRS çalışmaya devam edecektir.

Lineer kontrol sınırları dahilinde, bir SRS, esasında X_{SL} reaktansına seri olan bir gerilim kaynağına denk düşmektedir. Şekil - 3.5' den de görülmekte olduğu gibi, reaktans eğim değerinin SRS' nin performansı üzerinde fazlaca bir önemi bulunmamaktadır. X_{SL} değeri büyük olduğu takdirde, SRS, sistem değişikliklerine fazlaca cevap vermeyen bir hal alır ve dolayısıyla yüksek gerilim barasında, sistem yük durumundaki değişiklikler büyük gerilim değişimlerine neden olabilir. X_{SL} değeri, gerilim regülâtörünün (SRS kontrol devresi) kararlı hal kazanç değeriyle belirlenmektedir. Bu, aynı zamanda bir PI kontrolör ile akım geri beslemesine de duyarlı hale getirilebilir. Bu tercihlerin yapılabilmesi için, detaylı güç akışı çıkarılıp, stabilite üzerinde de çalışılmalıdır. Tipik olarak, bahsi geçen reaktans eğim değeri %1 - 5 arasında sistem gücüne de bağlı olarak değişmektedir.



Şekil - 3.15 SRS kararlı hal karakteristikleri

- a) Akım - gerilim karakteristiği
- b) Reaktif güç - gerilim karakteristiği

1970' li yılların sonlarında başlayan SRS uygulamaları kararlı bir şekilde sayıca hızla artarak enerji iletim sistemlerinde kullanılmıştır. Reaktif güç ve gerilim kontrolüne kesintisiz ve hızlı bir şekilde imkan tanıdığı için, SRS' leri, enerji sistemlerine bazı açılardan büyük yarar sağlarlar. Bunların bazıları :

- a) Şebeke frekansındaki geçici aşırı gerilimlerin kontrolü,
- b) Şebeke geriliminin çökmesinin önüne geçmesi,
- c) Transient kararlılığın artırılması,
- d) Sistem osilasyonlarının bastırılmasındaki artış

olarak sayılabilir. SRS, enerji iletimi ve dağıtımı seviyelerinde, dengesiz yükleri beslemekte olan şebekelerde, her üç fazın da dengede tutulmasına imkan sağlar. Ark fırınları, büyük güçlü ekstruderler ve maden ocakları gibi yerlerde bulunan, şebeke gerilimine üstüste darbeler uygulayabilen yüklerin neden olduğu gerilim dalgalanmalarını minimize etmekte de kullanılırlar.

Özellikle ark ocakları, darbeli yüklerde karşımıza çıkan en özel durumlardan biridir. Bunlar, 2 - 10 Hz arasında değişen frekanslarda, şebeke geriliminde düzensiz değişimlere neden olmaktadır. Bu ise, yakın civarlarda bulunan floresan lamba ve benzeri yüklerde rahatsız edici aydınlatmalara sebebiyet vermektedir. Bazı elektronik ekipman ve televizyonlar da bundan olumsuz yönde etkilenmektedirler. Bunları en az düzeye indirebilmek için, bu tip düzensiz gerilim değişimleri tipik olarak % 0,3 olan, kabuledilebilir minimum değerin altına indirilmelidir. Bu tip gerilim titreşimleri ise en ekonomik olarak SRS' leri ile giderilebilir. 1970 yılında bu yana, yaygın olarak bu tip uygulamalarda SRS' lerine yer verilmektedir.

4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE SİNÜSOİDAL OLMAYAN ELEKTRİKSEL BÜYÜKLÜKLER İLE İLGİLİ TANIMLAR ve TEMEL BAĞINTILAR

İdeal olarak, bir elektrik güç sisteminde tüketiciye sabit gerilim ve frekansta enerji verilmeli, gerilimin dalga şekli sinüs formunda olmalıdır. Ancak güç sistemlerinde sayıları günden güne artan, gerilim-akım karakteristikleri nedeniyle “nonlineer yükler” olarak tanımlanan; HVDC sistemleri, akü şarj devreleri, kontrollü doğrultucular ve ark fırınları gibi özel karakteristikli yükler şebekeden bozulmuş sinüs formunda (distorsiyonlu) akım çekerler. Bu sinüsoidal olmayan akımlar şebeke geriliminin de dalga şeklini bozarlar ve sonuç olarak nonlineer yük akımları ve şebeke gerilimleri temel bileşen olarak tanımlanan, frekansı (sistemin sinüsoidal sürekli halde kararlı çalışmak üzere dizayn edildiği) temel frekansa denk olan bileşenden başka frekansı temel frekansın tam katları olan harmonik bileşenleri de içerirler [Dugan vd., 1996].

4.1 Harmoniklerin Matematiksel İfadesi

Sinüsoidal olmayan ve $y = f(x)$ ile ifade edilen herhangi bir periyodik dalga, Fransız matematikçisi Fourier tarafından temel frekanslı bir sinüs bileşeni ile harmonik frekanslı sinüs bileşenlerinin ve (varsa) doğru bileşenin toplamıyla,

$$y = f(x) = c_0 + c_1 \sin(x + \phi_1) + c_2 \sin(2x + \phi_2) + \dots + c_n \sin(nx + \phi_n) \quad (4.1)$$

şeklinde matematiksel olarak ifade edilmiştir. Bu eşitlikten yararlanarak harmonik bileşenleri içeren bir nonlineer yükün akımı zaman domeninde,

$$i(t) = I_0 + I_{m_1} \sin(\omega t + \phi_1) + I_{m_2} \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots + I_{m_n} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (4.2)$$

ile ifade edilebilir. Burada ω açısal frekans ($\omega=2\pi f$ olup, f temel bileşen frekansıdır), n en yüksek harmonik mertebesi, I_0 akımın doğru bileşeni, h harmonik mertebesi olmak üzere ($h=1,2, \dots, n$) I_{m_h} ve ϕ_h sırasıyla h . harmonik akım bileşeninin maksimum değeri ve faz açısıdır.

Yukarıdaki (4.1) eşitliği zaman domeninde doğru bileşen ile sinüs ve kosinüs bileşenlerinden oluşan ve "Fourier serisi" olarak adlandırılan bir seri şeklinde,

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nt) + b_n \cos(nt) \quad (4.3)$$

olarak da gösterilebilir. Bu serideki a_0 , a_n ve b_n katsayıları Fourier katsayıları veya Fourier bileşenleri olarak adlandırılır. Aşağıda Fourier katsayılarının elde edilmesi ile ilgili yöntemler kısaca açıklanmıştır.

4.2 Fourier Katsayılarının Belirlenmesi

Harmonik analizi, nonsinüsoidal bir periyodik dalganın Fourier katsayılarının ya da başka bir deyişle temel bileşen ve daha yüksek dereceli harmoniklerinin genlik ve faz açılarının ve (varsa) doğru bileşeninin hesaplanması işlemi olarak tanımlanabilir [Arrillaga vd., 1985]. Fourier katsayılarının belirlenmesi için analitik yöntem, ölçme yöntemi, grafik yöntemi ile ayırık Fourier dönüşümü ve hızlı Fourier transformu (FFT) gibi bilgisayar destekli analiz yöntemlerinden yararlanılmakta olup aşağıda bunlardan bir kısmı kısaca açıklanmıştır.

4.2.1 Analitik Yöntem

Fourier serisindeki terimlerin a_0 , a_n ve b_n katsayıları analitik yöntem ile,

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \\ a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(nt) dt \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(nt) dt \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

şeklinde hesaplanabilir. (Bu eşitliklerde dalganın periyodu, $T=2\pi$ olarak alınmıştır.) Bu katsayılar elde edildikten sonra (4.3) eşitliği ile verilen Fourier serisi, $c_0 = a_0$ olmak üzere zaman domeninde.

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(nt + \phi_n) \quad (4.5)$$

olarak da ifade edilebilir. Bu eşitlikte c_n ve ϕ_n ,

$$\left. \begin{aligned} c_n &= (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \\ \phi_n &= \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

eşitlikleri ile hesaplanır [Arrillaga vd., 1997]. Yukarıdaki (4.5) eşitliği ile tanımlanan Fourier serisinde $c_1 \sin(t + \phi_1)$ terimine $f(t)$ fonksiyonunun temel bileşeni denir. Temel bileşen aynı zamanda tam sinüsoidal değişime karşılık düşen dalgayı belirler [Kreyzing, 1966; Lander, 1981].

Periyodik bir fonksiyonun Fourier bileşenleri fonksiyonun dalga şekline bağlıdır. Fourier analizi sonunda dalganın şekline bağlı olarak bazı bileşenler bulunmayabilir [Lander, 1981; Arrillaga vd., 1997]. Bir $f(t)$ fonksiyonu gözönüne alındığında dalga simetrisi nedeniyle seride bulunmayan bileşenler şöyle açıklanabilir:

- a- $f(t) = -f(-t)$ ise $b_n=0$ olur ve seride kosinüslü terimler bulunmaz.
- b- $f(t) = f(-t)$ ise $a_n=0$ olur ve seride sinüslü terimler bulunmaz.
- c- $f(t) = f(\pi + t)$ ise seride çift harmonikler bulunmaz.
- d- $f(t)$ fonksiyonunun grafiğinde negatif ve pozitif yarı dalgaların alanları birbirine eşit ise $a_0 = 0$ olur ve seride doğru bileşen bulunmaz.

4.2.2 Ölçme Yöntemi

Ölçme yöntemi ile harmonik bileşenlerinin genlik, faz açısı ve frekanslarını belirlemek için günümüzde hızlı Fourier dönüşümünü (FFT) kullanan dalga analizörü veya harmonik analizörü adı verilen cihazlardan yararlanır. Bu cihazlarda sistem gerilimi bir gerilim probu ile akım ise bir pens akım transformatörü yardımıyla örneklenerek cihaz girişine uygulanır ve harmonik bileşenleri gözlenerek ölçülür [IEEE Working Group on Power System Harmonics, 1983; Boylestad, 1987]. Günümüzde, gerçek zamanda sürekli harmonik analizi yapılarak sinüsoidal olmayan akım veya gerilimi bir ekran üzerinde dalga şeklinde veya temel bileşenin yüzdesi cinsinden akım veya gerilimin harmonik spektrumunu 50. harmonik bileşenine kadar gösterebilen harmonik analizörleri bulunmaktadır [Miller ve Dewe, 1992].

Harmonik ölçme tekniğinde ölçüm sonuçları genelde harmonik akım veya gerilim bileşenlerinin genliğinin efektif (rms) değerinin ölçümüne dayanır. İncelenen sistem için doğru bir harmonik eşdeğer devresi elde edebilmek için genlik ile birlikte faz açısının da ölçümü gereklidir. Ancak doğru eşdeğer devre ile sistemin harmonik seviyelerinde oluşacak değişiklikler önceden tahmin edilebilir, sistemin farklı düğümlerindeki ölçümler karşılaştırılabilir ve harmonik yük akışı değerlendirilebilir [IEC 1000-4-7, 1991].

4.2.3 Grafik Yöntemi

Grafik yöntemi, periyodik dalganın bir fonksiyon ile ifade edilemediği durumlarda kullanılır. Genel olarak osiloskoptan alınan veya bir deneydeki ölçüm sonuçlarına göre elde edilen nonsinüsoidal dalganın grafiği bir periyot içinde q eşit parçaya bölünerek; a_0 , a_n ve b_n katsayıları,

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{q} \sum_{r=1}^q f_r \\ a_n &= \frac{2}{q} \sum_{r=1}^q f_r \sin\left(r \frac{2\pi n}{q}\right) \\ b_n &= \frac{2}{q} \sum_{r=1}^q f_r \cos\left(r \frac{2\pi n}{q}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir [Ergeneli, 1984]. Bu eşitliklerde f_r , r dilimine karşılık düşen fonksiyon değeridir.

4.3 Harmoniklerle İlgili Tanımlar ve Temel Bağlıntılar

Elektrik güç sistemlerinde harmonik kaynağı durumundaki nonlineer yüklerin sayısının ve nominal güçlerinin her geçen gün artması, harmoniklerin etkilerinin gözönüne alınmasını zorunlu hale getirmiş, harmonikleri filtre sistemleriyle elimine etmek veya sınırlandırmak için baz alınan, harmoniklerle ilgili bazı temel büyüklükler tanımlanmıştır [Shuter, 1989; Emanuel 1990; Cox ve Baghzouz, 1990; Czarnecki, 1990; Heydt vd., 1991; IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations, 1996]. Harmonik bileşenleri bilinen nonsinüsoidal akım ve gerilimler ile ilgili olarak aşağıdaki tanımlar yapılabilir.

4.4 Sinüsoidal Olmayan Akım ve Gerilim Dalgaları ile İlgili Bağlıntılar

Gözönüne alınan bir nonsinüsoidal akım ve gerilim dalgasının ani değerinin,

$$\left. \begin{aligned} i(t) &= I_0 + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega t + \gamma_h) \\ v(t) &= V_0 + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h\omega t + \delta_h) \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

olarak ifade edilmesi halinde akım ve gerilimin efektif değeri,

$$\left. \begin{aligned} I &= \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2} = (I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots)^{1/2} \\ V &= \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2} = (V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

olarak tanımlanabilir [Shepherd ve Zand, 1979; IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations, 1996]. Bu eşitliklerde I_0 ve V_0 sırasıyla akım ve gerilimin doğru bileşeni, h

harmonik mertebesi. I_h ve γ_h h. harmonik akımının efektif değeri ve faz açısı. V_h ve δ_h h. harmonik geriliminin efektif değeri ve faz açısıdır.

Harmoniklerle ilgili tanımlar arasında en yaygın olarak kullanılan, hem akım ve hem de gerilim için verilen "Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)" kavramıdır. IEEE ve ülkeler kabul ettikleri harmonik standartlarında harmonikleri sınırlandırmak için gerilim ve/veya akım için izin verilen en yüksek THD değerlerini vermektedirler. N gözönüne alınan en yüksek harmonik derecesi olmak üzere, akım ve gerilim için toplam harmonik distorsiyonu sırasıyla.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \quad (4.10)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \quad (4.11)$$

olarak tanımlanır.

Ayrıca akım ve gerilimin dalga şeklindeki bozulmanın toplam harmonik distorsiyonundan başka diğer bir göstergesi olarak "Distorsiyon faktörü (DF)" tanımlanmıştır. Akım ve gerilim için distorsiyon faktörü .

$$\left. \begin{aligned} DF_I &= \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I} \\ DF_V &= \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V} \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

olarak ifade edilir. Periyodik olarak değişen nonsinüsoidal dalgalar için tepe faktörü veya krest faktörü (Crest Factor, CF),

$$CF = \frac{\text{dalga'nın tepe değeri}}{\text{dalga'nın efektif değeri}} \quad (4.13)$$

şeklinde belirlenir [Dugan vd., 1996].

4.5 Üç Fazlı Enerji Sistemi Elemanlarının Faz Koordinatları ile Harmonik Bağımlı Olarak Modellenmesi

Enerji sistemlerinde, harmoniklerin etkisini araştırmak ve bunları elimine edecek harmonik filtrelerinin tasarımı için gerekli verileri elde etmek amacıyla harmonik yük akışı analizi yapılır. Bu analiz için, sistemdeki lineer ve nonlineer elemanların temel frekans ve harmonik frekanslarına uygun olarak modellenmesi gerekir. Harmonik simülasyon çalışmalarında enerji sistemi elemanlarının modellenmesi, temelde frekans domeninde ve zaman domeninde olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır.

Dengeli sistemlerde yük akış analizi için, sistemin bir faz eşdeğerinin göz önüne alınması ve elemanların modellenmesi için pozitif - sequence empedans yada admitans değerlerinin kullanılması yeterlidir. Üç fazlı, dengesiz nonlineer yükler içeren sistemlerde harmonik yük akış analizi için ise, sistemi ve yükleri üç fazlı olarak, harmonik bağımlı modellemek gerekir.

4.6 Harmonik Kaynakları

Bilindiği gibi, elektrik güç sistemlerinde gerilim ve akımın dalga şeklinin sinüs formundan sapmasına neden olan harmonik bileşenleri, harmonik kaynağı olarak nitelendirilen ve akım - gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar tarafından üretilmektedir. Harmonik kaynakları, genel olarak ark oluşturarak çalışan sistemler, magnetik doyma özelliğine sahip elemanlar, güç elektroniği devreleri fotovoltaik sistemler ve gaz deşarjı prensibine göre çalışan aydınlatma elemanlarıdır. Ark fırınları, transformatörler, döner tipte makinalar, HVDC sistemleri, VAR sistemleri, motor kontrol devreleri, civa ve sodyum buharlı lambalar ile floresan lambalar bunlara örnek olarak verilebilir [KOCATEPE, 1995; Dugan vd. , 1996].

Bir güç sisteminin harmonik simülasyonunun gerçekleştirilmesi bakımından, harmonik kaynakları üç gruba ayrılabilir [Arrillaga vd. 1997].

- Sistem içersine dağılmış çok sayıdaki küçük güçlü nonlinear elemanlar,
- Büyük güçlü, karakteristiği sürekli ancak rastgele değişen nonlinear yükler,
- Büyük güçlü statik konverterler ve iletim sistemlerindeki güç elektroniği düzenleri

İlk grupta sayılan harmonik kaynakları, çoğu alçak gerilim cihazının (TV, bilgisayar vb.) besleme kaynağı durumundaki tek fazlı köprü diyotlu doğrultuculardır. Gaz deşarjı prensibine göre çalışan lambalar da, tek fazlı alçak gerilim ile çalışmaları ve düşük güçlü olmaları nedeniyle bu gruba dahil edilebilir. Tek tek ele alındığı zaman, her birinin gücünün düşük olmasına rağmen, bu elemanların tek fazlı olması ve sistem içersinde çok sayıda var olmaları göz önüne alındığında tümünün etkisi önemli olabilmektedir. İkinci gruptaki harmonik kaynaklarının başlıca örneği, yüksek gerilim iletim şebekesine direkt olarak bağlanan, ancak gücü MW mertebelerinde olan, genellikle yeterli bir filtre sistemi ile donatılmamış ark fırınlarıdır. Üçüncü gruptaki büyük güçlü konverterler ve güç elektroniği düzenlerinin, gerek kontrol sistemlerinin çok karmaşık olması ve gerekse güçlerinin büyük olması nedeniyle simülasyonu zordur. Ayrıca, konverterin çalışması sırasında üretilen harmonik bileşenleri güç kaynağına olumsuz etki yapmaktadır. Bu nedenle, konverterin problemsiz çalışması için, güç sisteminin harmonik simülasyonuna önem verilmelidir.

Bu kısımda, yukarıda bahsi geçen harmonik kaynaklarından kısa kısa söz edilecektir.

4.6.1 Konverterler

Enerji sistemindeki başlıca harmonik kaynaklarından birisi de tek fazlı ve üç fazlı şebeke denetimli konverterlerdir. DC iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler şebeke denetimli konverterler üzerinden beslenir [Kocatepe, 1995]. Sistemdeki tek fazlı, büyük güçlü konverterlerin (kontrollü doğrultucular) kullanım alanlarından birisi de, konumuzla çok yakından alakalı olan elektrikli demiryolu ulaşım sistemleridir. Üç fazlı ideal (dengeli) konverterlerin tek fazlı konverterlere göre avantajı, üç ve üçün katları olan harmonikleri üretmesidir [Dugan vd., 1996]. Üç fazlı konverterler, konverter transformatorünün primer

tarafından. şebekeden çekilen ac akımın dalga formunun içerdiği darbe sayısı ile tanınır. Şekil - 4.1' de 6 darbeli bir konverterin bağlantı şeması ve hat akımının zamana göre değişimi gösterilmektedir [Arrillaga vd., 1985, Rashid, 1993]. Transformatorün yıldız - yıldız bağlı olması halinde, dengeli olarak çalışmakta olan konverterin Şekil - 4.1b ile verilen a - fazı hat akımının ani değeri,

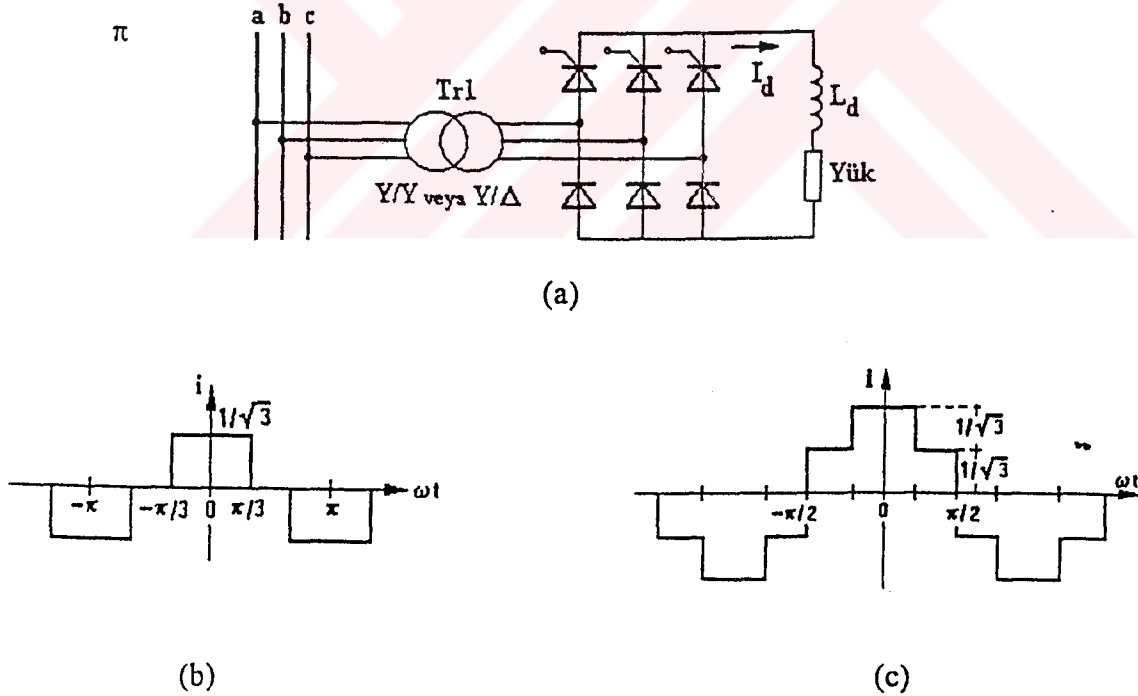
$$2.\sqrt{3}$$

$$i_a(\omega t) = \frac{2.\sqrt{3}}{\pi} . I_d . [\cos \omega t - (1/5).\cos 5\omega t + (1/7).\cos 7\omega t - (1/11).\cos 11\omega t - \dots] \quad (4.14)$$

olarak ifade edilebilir [Lander 1981, Arrillaga vd. 1985]. Transformatorün yıldız - üçgen bağlı olması halinde, şekil - 4.1c ile verilen a - fazı hat akımı ani değeri,

$$2.\sqrt{3}$$

$$i_a(\omega t) = \frac{2.\sqrt{3}}{\pi} . I_d . [\cos \omega t + (1/5).\cos 5\omega t - (1/7).\cos 7\omega t - (1/11).\cos 11\omega t + \dots] \quad (4.15)$$



Şekil - 4.1 Üç fazlı 6 darbeli konverter (yarı kontrollü doğrultucu)

a) Bağlantı şeması

b) Trf.' ün Y - Y bağlı olması halinde hat akımı dalga şekli

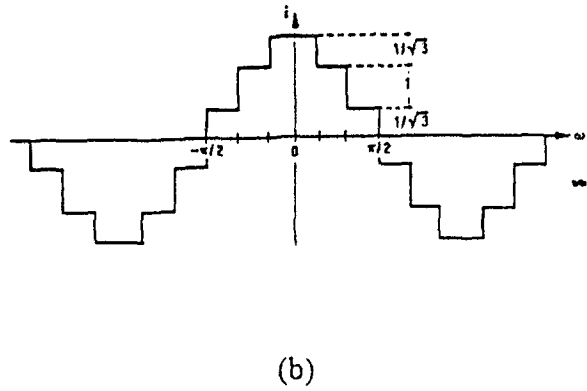
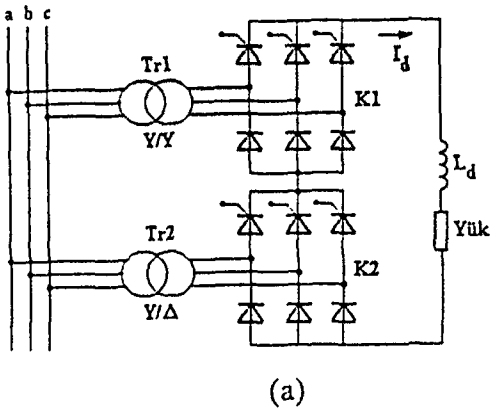
c) Trf.' ün Y - Δ bağlı olması halinde hat akımı dalga şekli

olarak ifade edilebilir. Bu durumda $k = 1, 3, 5, \dots$ olmak üzere, $6k \pm 1$ mertebesindeki harmonikler (5.. 7.. 17.. 19.. ...) yıldız - yıldız bağlı transformatörlü konverterin ürettiği harmoniklerin ters işaretlisi olmaktadır [Arrillaga vd., 1985].

Yukarıda akım ifadeleri verilmiş olan her iki tip 6 darbeli konverterin dc çıkışları seri bağlanarak elde edilen 12 darbeli konverter ile $6k \pm 1$ ($k = 1, 3, 5, \dots$) mertebesindeki harmoniklerin (5.. 7.. 17.. 19.. ...) ac şebekeye geçmesi engellenebilir. 12 darbeli konverter şebekeye $k = 1, 2, 3, \dots$ olmak üzere, sadece $12k \pm 1$ mertebesindeki harmonikleri (11.. 13.. 23.. 25.. ...) enjekte eder. Şekil - 4.2' de, 12 darbeli konverterin bağlantı şeması ve a - fazı hat akımının zamana göre değişimi gösterilmiştir [Lander 1981, Rashid 1993, Arrillaga vd. 1985]. Burada hat akımının ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \cdot I_d \cdot [\cos\omega t - (1/11)\cos 11\omega t + (1/13)\cos 13\omega t - (1/23)\cos 23\omega t - \dots] \quad (4.16)$$

olarak ifade edilebilir [Arrillaga vd. 1985]. Bu kısımda verilmiş olan konverter devreleri ve eşitliklerinde, transformatör çevirme oranları 1 : 1 olarak alınmıştır.



Şekil - 4.2 Üç fazlı 12 darbeli konverter (Yarı kontrollü doğrultucu)

a) Bağlantı şeması

b) Hat akımı dalga şekli

4.6.2 Transformatörler

Enerji sistemlerinde transformatörler gibi bir demir çekirdek üzerine yerleştirilmiş bobinlerden oluşan elemanlar, doyma özelliğine sahip demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle harmonikler üretirler [Dommel vd. 1986, Dugan vd. 1996].

Bilindiği gibi transformatörlerin mıknatıslanma akımının dalga şekli sinüs formundan oldukça uzaktır. Bu nedenle mıknatıslanma akımı yüksek genlikli harmonik akım bileşenleri içerir. Ancak transformatörün mıknatıslanma akımı ana akımının %1' i seviyesindedir. Güçelektroniği konverterleri ve ark fırınları gibi nominal akımlarının %20' sine varan oranlarda harmonik akımları üreten diğer harmonik kaynakları ile güç transformatörlerikarşılaştırılırsa, güç transformatörleri sistemde büyük harmonik kaynakları olarak dikkate alınmayabilir [Dugan vd. 1996]. Bu nedenle harmonik yük akış çalışmalarının bir kısmında, transformatörlerin lineer devre elemanları olarak modellendiği görülmektedir. Ancak bir dağıtım sisteminde yüzlerce transformatörün bulunduğu göz önüne alınırsa, bir bütün olarak transformatörler harmonik kaynağı olarak ele alınabilir. Çizelge - 4.1' de, bir dağıtım transformatörünün harmonik akım bileşenleri transformatörün mıknatıslanma akımı yüzdesi olarak verilmiştir [McGranaghan vd. 1984]. I_{μ} transformatörün transformatörün mıknatıslanma akımı, I_n ise transformatörün sisteme enjekte ettiği n. harmonik akımıdır.

Çizelge - 4.1 Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu

Harmonik Derecesi (n)	(%) $\frac{I_n}{I_{\mu}}$
3	50
5	20
7	5
9	2.6

Güç transformatörleri, mıknatıslanma eğrisinin lineer olduğu bölgede çalışmak üzere dizayn edilir. Ancak transformatör yükünün az olduğu zamanlarda, gerilimin yükselmesi nedeniyle magnetik nüve aşırı uyarılır ve çalışma, mıknatıslama eğrisinin lineer olmayan bölgelerinde gerçekleşir. Bu durumda, transformatör harmonik üretir ve çizelge - 4.1' de gösterildiği gibi, özellikle üçüncü harmonik bileşenleri etkili olur.

Transformatörlerin lineer olmayan yükleri beslemeleri sonucu, transformatör üzerinden akan yük akımı harmonik bileşenleri içerir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda, kuru tipte transformatörlerin nonsinüsoidal akımlar çeken yükleri besleyebilme kapasitesinin bir ölçüsü olarak kabul edilen " K - Faktörü " tanımlanmıştır [Kerszenbaum vd. 1991, Linden 1996]. K - Faktörü de, anma gerilimi yada anma gücü gibi, transformatör için imalatçısı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüktür. Bu faktör,

$$K - \text{faktörü} = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 n^2 \quad (4.17)$$

olarak tanımlanır [Linden 1996]. Bu bağıntıda n harmonik mertebesi, I_n ise, baz değeri olarak transformatörün anma akımının alınması ile hesaplanan n. harmonik akım bileşeninin per - unit değeridir. K - Faktörü, anma gücü 500 KVA' nın altındaki transformatörler için hesaplanmıştır.

4.6.3 Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları

Bir tüp içersindeki gazın deşarjı prensibine dayanarak geliştirilen aydınlatma elemanları (civa buharlı lambalar, flouresant lambalar, sodyum buharlı lambalar vb.) nonlineer akım - gerilim karakteristiğine sahip olduğu için harmonik üretirler [Dugan vd. 1996]. Bu tip lambalar iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Bina ve yol aydınlatmasında yaygın olarak kullanılan flouresant lamba tesislerinde, tek harmoniklerin seviyesi önemli oranda sistemi etkiler. Özellikle üç ve üçün katları mertebesindeki harmonik akım bileşenleri, üç fazlı dört iletkenli aydınlatma devrelerinde nötr iletkeninden geçerek, yüklenen iletkenin ısınmasına neden olur [Arrillaga vd. 1985, Grady ve Heydt 1985]. Ayrıca, flouresant lambalara bağlanan balastların da bir magnetik devreleri olması nedeniyle, bu yardımcı elemanlar da harmonik üretirler. Son yıllarda magnetik balastların yerine

kullanılmak üzere geliştirilen ve anahtarlama güç kaynağı prensibiyle çalışan elektronik balastlar da harmonik üretmekle beraber, balast içersine monte edilen filtre ile elektronik balastın ürettiği harmonik bileşenlerini elimine etmek mümkündür. Aşağıdaki çizelgede, magnetik balastlı bir flouresant lamba akımının harmonik spektrumu verilmiştir [Dugan vd. 1996].

Çizelge - 4.2 Magnetik balastlı bir flouresant lamba akımının harmonik spektrumu

	Harmonik (n)										
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
$(\%) \frac{I_n}{I_1}$	100	19.9	7.4	3.2	2.4	1.8	0.8	0.4	0.1	0.2	0.1

4.7 Harmoniklerin Enerji Sistemine Etkileri

Harmoniklerin enerji sistemlerinde varlığı, sinüsoidal formdaki akım ve gerilim dalga şekillerindeki bozulmalar ile anlaşılır. Harmoniklerin enerji sistemlerinde yol açtığı genel olarak şu şekilde sıralanabilir [IEEE Working Group on Power System Harmonics 1993, Kocatepe 1995].

- Generator ve şebeke geriliminin dalga şeklinin sinüs formundan sapması nedeniyle tüketicilerin çalışma koşullarının bozulması,
- Enerji sistemi elemanlarında ve yüklerde harmonikler nedeniyle ilave kayıpların oluşması,
- Akımın harmonik bileşenleri nedeniyle gerilim düşümünün artması
- Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri nedeniyle aşırı yüklenmeleri ve dielektrik zorlanma ile hasar görmeleri,
- Senkron ve asenkron motorlarda salınımların meydana gelmesi ve bu nedenle aşırı ısınmaları,

- Koruma sistemlerinin harmonikler nedeniyle hatalı çalışmaları,
- Kontrol sistemlerinde hatalı çalışmalar,
- Endüksiyon tipi sayaçların yanlış ölçüm yapmaları,
- İzolasyon malzemesinin delinmesi,
- Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde, harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim yada akımların oluşması ...

Enerji sistemlerinde, harmonikler nedeniyle ortaya çıkan problemler arasında en etkili olanları, kayıpların artması ile ölçü ve koruma sistemlerinin hatalı çalışmasıdır. Harmonik akım bileşenleri, omik direnç içeren tüm tesis elemanları üzerinde ilave harmonik kayıplara neden olmaktadır. Harmonikler nedeniyle oluşan ilave kayıpları azaltmak için, harmonik kaynağı durumundaki nonlineer yüklerin filtreler ile donatılması, konverter gibi güçelektronik devrelerinin tasarımında ise darbe sayısının mümkün olduğu kadar yüksek tutulması ile büyük genlikli harmonik bileşenlerinin şebekeye geçmesi önlenabilir. Harmoniklerin, koruma röleleri üzerine etkilerini incelemek üzere yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, harmoniklerin koruma rölelerine etkisi konusunda tam bir analitik yaklaşım ortaya konulamamış, elde edilen deneysel sonuçlar üzerine yorumlar yapılarak harmoniklerin etkisinin rölelerin tipine, imalatçısına ve röle girişindeki ölçü transformatörünün magnetik doyma karakteristiğine göre değişim gösterdiği ifade edilmiştir

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin bu harmonik etkilerden mümkün mertebe az zarar görmesini sağlamak ve tüketiciye daha kaliteli enerji vermek için, harmoniklerin belirli bir seviyenin altında tutulması gerekir. Bu amaçla, nonlineer yüklerin toplam harmonik distorsyonu ve harmoniklerin temel bileşene oranı her ülke tarafından sınırlandırılmaktadır. Çeşitli ülkeler tarafından harmonikler için tanımlanmış sınır değerleri çizelge - 4.3' de verilmiştir [Arrillaga vd. 1985, Kocatepe 1995].

4.7.1 Direncin, Endüktif ve Kapasitif Reaktansın Harmoniklere Bağlı Olarak Değişimi

Bir iletkenin içinden geçen akımın, frekans nedeniyle iletken yüzeyinde homojen dağılmaması yüzünden iletken direncinin değişmesi “ deri etkisi “ olarak tanınır. Frekans

Çizelge - 4.3 Çeşitli ülkelerin harmonik standartları

Ülke	Gerilim (kV)	(THD) _v (%)	V _h /V ₁ (Tek)	V _h /V ₁ (Çift)
A.B.D.	Genel 2.4-69 115≤ Özel 2.4 – 69	5 1.5 8		
Avustralya	Dağıtım 33≥ İletim 22, 33, 66 110≤	5 3 1.5	4 2 1	2 1 0.5
Fransa	Tüm Gerilimler	1.6	1	0.6
İngiltere	0.415 6.6, 11 33, 66 132	5 4 3 1.5	4 3 2 1	2 1.75 1 0.5
İsveç	0.43/0.25 3.3 – 24 84≥	4 3 1		

yükseldikçe akım iletkenin dış yüzeyine yakın bölgelerden akma eğilimi gösterir. Bu nedenle, iletkenin kullanılabilir kesiti azalmaktadır. Deri etkisi olayının sonucu, iletkenin direncinin artar ve endüktans azalır [Arrillaga vd. 1985]. Endüktif deri etkisi nedeniyle, iletkenin endüktansındaki değişim genellikle ihmal edilebilir [Kimbark 1971, Arrillaga vd. 1985].

Harmonik mertebesi ile frekansın orantılı olarak artması, direncin değerindeki harmonik bağımlı değişimi dikkate almayı zorunlu kılar. Literatürde, deri etkisi nedeniyle direnç

artışının hesaplanmasını sağlayan. deneysel çalışmalara dayalı bir çok bağıntı verilmiştir. Aşağıda, bunlardan bazıları açıklanmaktadır.

Galloway [1964] ile Magnusson' un [1965] çalışmalarına dayanan bir bağıntıda r_{dc} [Ω / km] olarak doğru akım direnci, μ_r ise silindirik iletkenin bağıl geçirgenliği olmak üzere.

$$M = 0.05 \sqrt{\frac{f \cdot \mu_r}{r_{dc}}} \quad (4.18)$$

katsayısı hesaplanarak M ' nin değerine bağlı olarak f frekansındaki direnç değeri.

$$\frac{r(f)}{r_{dc}} = \begin{cases} 0.035M^2 + 0.0938 & M < 2.4 \\ 0.35M + 0.3 & M \geq 2.4 \end{cases} \quad (4.19)$$

olarak hesaplanabilmektedir [EPRI report EL-2583 1982, Task Force on Harmonics Modeling and Simulation 1996].

Deri etkisi ile direncin değerini incelemek için verilen bir diğer bağıntı ise, 60 Hz temel frekans için, k harmonik mertebesi, r_{dc} [Ω / mil] cinsinden doğru akım direnci olmak üzere alternatif akım direnç.

$$r_{ac} = r_{dc} \cdot [0.288 + 0.175 \sqrt{(k / r_{dc})}] \quad (4.20)$$

olarak literatürde yer almaktadır [Stevenson 1982, Grady 1983, Song vd. 1984].

Deri etkisi oluşan direnç değişiminin bir diğer ifadesi de Arnold formülü olarak bilinmektedir [Çakır 1989]. Bu bağıntıda, f_1 temel frekans olmak üzere yeni tanımlanan $X(h)$ değişkeni.

$$X(h) = 0.050132 \sqrt{\frac{hf_1}{r_{dc}}} \quad (4.21)$$

olmak üzere. h . harmonik frekansı için iletken direnci.

$$r_{ac} = \begin{cases} 0 \leq x \leq 3 & \text{için } r_{ac} = k_1(h).r_{dc} \\ x > 3 & \text{için } r_{ac} = k_2(h).r_{dc} \end{cases} \quad (4.22)$$

olarak tanımlanmıştır. Bu ifadelerdeki $k_1(h)$ ve $k_2(h)$,

$$k_1(h) = \frac{1}{2} \left[1 + \left[1 + [x(h)^4 / 48]^{1/2} \right] \right] \quad (4.23)$$

$$k_2(h) = \left[0.26 + x(h) / 2.828 \right]$$

ile hesaplanabilir. Bu bağıntılarda görüldüğü gibi, harmonik mertebesi ve dolayısıyla frekans yükseldikçe $k_1(h)$ ve $k_2(h)$ katsayılarının değerleri artmaktadır. Bu durum, hat iletkeninin direnç değerinin artmasına neden olmaktadır.

Elektrik güç sistem elemanlarının (transformatör, iletim hattı, generator, motor, yük vb.) modellenmesinde, endüktif ve / veya kapasitif reaktanslar geniş bir yer tutmaktadır. Temel frekanstaki endüktif reaktansı $X_L^{(1)}$ olan bir bobin ile temel frekanstaki kapasitif reaktansı $X_C^{(1)}$ olan bir kondansatörün n . harmonik frekanstaki $X_L^{(n)}$ ve $X_C^{(n)}$ reaktansları.

$$\left. \begin{aligned} X_L^{(n)} &= n.X_L^{(1)} \\ X_C^{(n)} &= \frac{X_C^{(1)}}{n} \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

eşitlikleri ile bulunur. Bu eşitliklerde, bobin endüktansının (L) ve kondansatörünün kapasitesinin (C) frekans ile değişmediği kabul edilmiştir. R, L ve C elemanlarının empedans ve admitanslarının temel bileşen değeri ve harmonik eşdeğeri arasındaki ilişki çizelge - 4.4' de verilmiştir [Kocatepe 1995].

Çizelge - 4.4 Devre elemanlarının frekans bağımlı eşdeğerleri

Eleman (*)	Model	Parametre	Temel Bileşen Değeri	Harmonik Değeri
Direnc	Empedans	R	R	$R+R_h$
	Admitans	G	$1/R$	$1/(R+R_h)$
Endüktans	Empedans	X_L	X_L	nX_L
	Admitans	Y_L	Y_L	Y_L/n
Kapasite	Empedans	X_C	X_C	X_C/n
	Admitans	Y_C	Y_C	nY_C

(*) Elemanların ideal ve lineer oldukları kabul edilmiştir.

4.7.2 Harmoniklerin Kayıplara Etkisi

Bilindiği gibi, bir iletkenin direnci R ve iletkenen geçen akımın efektif değeri I ise, bu iletkendeki güç kaybı,

$$P_k = R \cdot I^2 \quad (4.25)$$

olarak tanımlanır. Bir nonlineer yük akımının efektif değeri,

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (4.26)$$

bağıntısı ile hesaplandığına göre, bu durumda R_1 iletkenin temel frekans direnci ve R_n iletkenin n. harmonik frekanstaki direnci olmak üzere, iletkendeki güç kaybı,

$$P_k = P_{k_1} + P_{k_{ek}} = R_1 I_1^2 + R_n \sum_{n=2}^N I_n^2 \quad (4.27)$$

olarak tanımlanır [Shepherd ve Zand 1979, Yumurtacı vd. 1997]. Bu eşitlikte görüldüğü gibi, harmonik akımlarının genliği arttıkça, harmonik akım bileşenleri nedeniyle oluşan ek kayıplar da artmaktadır.

Buraya kadar bahsedilen kısımda, güç sisteminde nonsinüoidal akıma bağlı kayıplar ifade edildi. Sistemde gerilime bağlı olarak oluşan kayıplar ise, elektrik makinalarının demir kayıpları ile kondansatörlerin dielektrik kayıplarıdır. Gerilimin nonsinüoidal olması, başka bir deyişle harmonik bileşenleri içermesi halinde de harmonikler nedeniyle ek kayıplar oluşur. Magnetik çekirdekli bir elemanda (motor, transformatör, self vb.) meydana gelen demir kayıpları, bu elemana uygulanan gerilimin efektif değeri,

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^N V_n^2} \quad (4.28)$$

olmak üzere,

$$P_{Fe} \cong C_m V^2 = C_m \sum_{n=1}^N V_n^2 \quad (4.29)$$

olarak hesaplanabilir [Kocatepe 1995]. Bu ifadede $\tan\delta$,

$$\tan\delta = 1 / R.\omega.C \quad (4.30)$$

ile ifade edilen kayıp faktörüdür. $\omega_n = 2.\pi.n.f_1$ ile hesaplanan n. harmonik için açısal frekans olup V_n ise n. harmonik geriliminin efektif değeridir.

5. STATİK REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONUNUN DEMİRYOLU SİSTEMLERİNE UYGULANMASI

Hızlı, güvenilir ve ekonomik bir ulaşım hiç şüphe yoktur ki, demiryolu ile yapılan ulaşım. Bütün kalkınmış ülkelerin demiryolu idareleri, bu gerçekten hareket ederek, demiryollarını daha modern bir hale getirmek için büyük yatırımlar yapagelmektedir. Bu yatırımların amacı, daha hızlı, daha güvenilir, daha ekonomik ve çevre dostu bir demiryolu ulaşımı sağlamaktır. Çeken ve çekilen araçların modernizasyonunun yanısıra, demiryolu altyapısı ile birlikte demiryollarının elektrifikasyonu, yani elektrikli işletme için gerekli tesisler ile donatılması, topyekün modernizasyonun ana ögesidir.

5.1 DEMİRYOLU ELEKTRİFİKASYONU

TCDD idaresi, işletmekte olduğu demiryollarının modernizasyonu için yaptığı atılımlar çerçevesinde, elektrikli işletmenin kesintisiz olarak Avrupa içlerine kadar uzanmasını sağlamak amacıyla, kalkınma planlarına da uygun olarak Tablo - 5.1' de gösterilmekte olan hatların elektrifikasyonunu sağlamıştır.

Çizelge - 5.1 TCDD hatlarında mevcut elektrifikasyon tesisleri

H A T	TOPLAM UZUNLUK KM	TESİSE BAŞLAMA TARİHİ	TESİSİN BİTİŞ TARİHİ
KAPIKULE-ÇERKEZKÖY	225	1991	1997
ÇERKEZKÖY-HALKALI	102	1977	1984
HALKALI-SİRKECİ	77	1952	1955
H.PAŞA-GEBZE	102	1965	1969
GEBZE-ARİFİYE	200	1972	1977
ARİFİYE-ESKİŞEHİR	278	1984	1991
ESKİŞEHİR-SİNCAN	266	1988	1993
SİNCAN-KAYAŞ	97	1969	1972
ANK.SİNC. 3-4 YOL	65	1993	1995
DİVRİĞİ-ISKENDERUN	720	1988	1996

5.2 Elektrifikasyon Tesisleri

Elektrifikasyon tesisleri üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar, katener tesisleri, trafo merkezleri - cer postaları ve telekomand - haberleşme tesisleridir. [Tekser, 1991]

5.2.1 Katener Tesisleri

Katener tesisleri, elektrik enerjisini trafo merkezinden alıp, demiryolu boyunca pantograf vasıtası ile elektrikli lokomotif ve elektrikli trenlere veren sistemdir. Bu tesis, seyir teli, portör teli (taşıyıcı tel) ve bunların asılmasıyla birlikte izolasyonu için gerekli olan direk, izolatörler ve çeşitli teçhizattan oluşmaktadır. [Gençyuva, 1998]

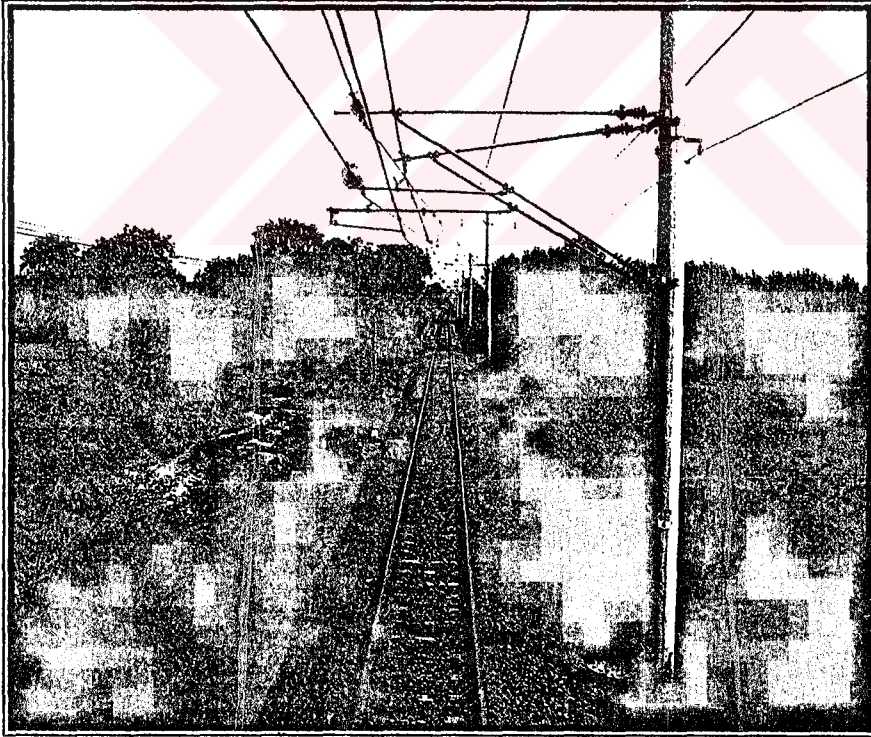
Katener sistemi inşa etmek için yapılacak çalışma yine üç aşamadan oluşmaktadır. Öncelikli olarak proje çalışmaları yapılır. Bu çalışmaların bünyesinde tek hat şemasının hazırlanması, besleme planının yapılması, piketaj (seyir hızı) planı çıkarılması, katener profil planının oluşturulması, direk ve lente yerlerinin kesit planlarının hazırlanması, temel planları ve topraklama planlarının çıkarılması, tel çekme planının yapılması, montaj planı ile koruma planlarının tek tek hazırlanması bulunmaktadır. [Gençyuva, 1998]

Proje çalışmalarının hemen akabinde malzeme temini işlemine geçilir. Bronz, sert bakır, bakır, aliminyum - çelik ve aliminyum teller portör teli, seyir teli ve diğer bazı maksatlarla kullanılmakta olan iletkenlerdir. Çelik çekme borular, aliminyum ve magnezyum borularsa taşıyıcı maksatlı kullanılan malzemelerdendir. İzolasyon maksadıyla ise cam ve porselen izolatörler kullanılmaktadır. [Gençyuva, 1998]

Üçüncü ve son aşama ise arazi çalışmaları olarak adlandırılır. Arazi çalışmaları oldukça uzun ve zahmetlidir. Öncelikle, demiryolu hattının profil planına uygunluğu kontrol edilir. Bu esnada, katener sistemlerinin kurulmasına engel teşkil edecek tesis ve malzemelerin tesbiti yapılır. Temel ölçüleri işaretlenir temel kazıları yapılır. Temel karotları ve kalıpları hazırlanır. Artık, temel betonu dökülebilecek aşamaya gelinmiştir. Beton dökümünün ardından, temel karotları ve kalıpları sökülür. Direk dikimi işlemi ayarlanır ve çevre betonları dökülür. Tüm direklere numara vurulur ve kırmızı renkte kot belirtilir. Direklere bağlantı parçalarının montaj

aşamasına gelinmiştir. Tünel, köprü ve düz yol gibi değişik durumlara ait değişik montaj tipleri belirlenerek yapılır. Topraklama teli çekilir ve topraklama irtibatları yapılır. Fider iletkeni çekilir. İzolatör ve bunlara ait bağlantı elemanları monte edilir. Portör teli çekilir ve monte edilir. Pandül markajı ve montesinin hemen ardından artık, seyir teli çekilmesi işlemine geçilir. Tel gerilmelerinin dengelenmesi ve otomatik germe cihazı montajı yapılır. Besleme iletkenleri monte edilir. Ayırıcı ve seksyonerlerin izolatörleri monte edilir. Nötr bölge ve cer postalarının şalt tesisleri kurulur. İkaz işaret ve levhaları monte edilir. Seyir teli bozuklukları giderilir ve katenerin son ince ayarı yapılır. Katener tesislerinin işletilmesine mani olan ağaç, havai hatlar vb. tesbit edilir ve kaldırılır.

Şekil - 5.1' de, Kapıkule - Çerkezköy arası, 140 km/h' lik katener tesisine ait bir bölüm görülmektedir.



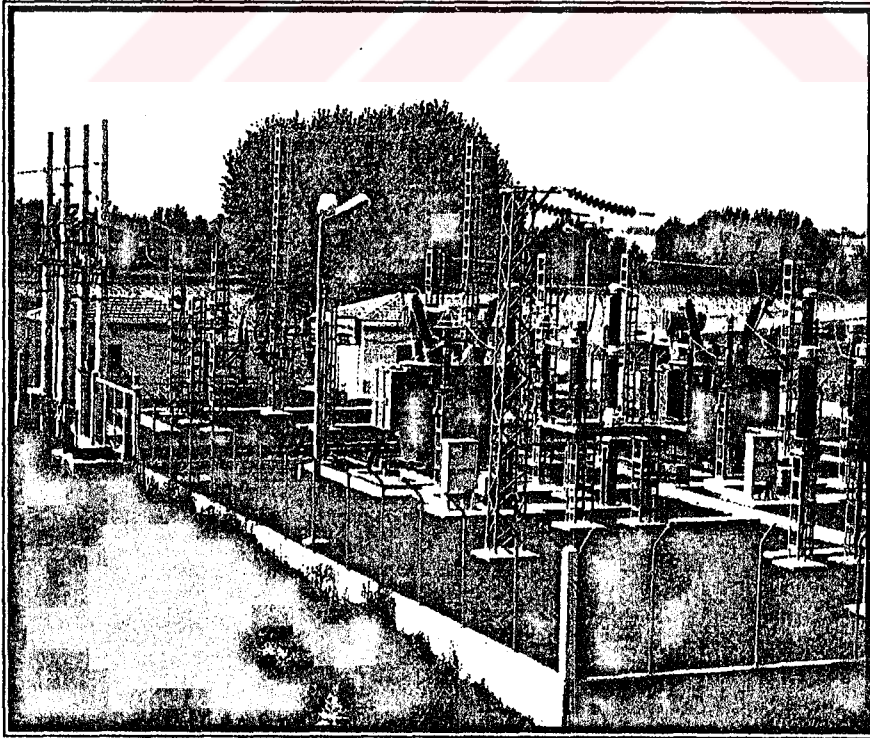
Şekil - 5.1 İnşaatı bitmiş bir katener tesis

5.2.2 Transformatör Merkezleri ve Cer Postaları

TCDD, işletmekte olduğu elektrikli demiryolu hatlarında, trenlerin pantografları vasıtasıyla enerjilerini almak için kullandıkları katener bir başka deyişle seyir telini beslemek için bölge bölge transformatör merkezleri inşa etmiştir. Hattın trafik yoğunluğuna ve diğer bazı faktörlere göre bir miktar değişiklik göstermekle birlikte bu merkezler, elektrikli hat boyunca 25 - 50 km mesafe ile sıralanmaktadır. 154 kV' luk ulusal elektrik şebekesine bağlı olan transformatör merkezleri, 154 kV - 50 Hz' lik elektrik enerjisini monofaze 27,5 kV - 50 Hz' e dönüştürerek katener hattını beslemektedir. [Tekser, 1991]

Transformatör merkezlerinden başka, çeşitli istasyonlarda, değişik elektriksel manevralar için ayrıca cer postaları inşa edilmiştir. Bu postalar yardımıyla, katener hattı üzerinde gerektiği zaman belirli yerlerin enerjileri kesilip, başka yerlere enerji verilmek suretiyle bazı bakım yada arızalara müdahale edilebilmektedir. [Tekser, 1991]

Aşağıdaki şekilde, Çerkezköy - Kapıkule hattında bulunan transformatör merkezlerinden birisi görülmektedir.



Şekil - 5.2 İnşaatı bitmiş bir transformatör merkezi

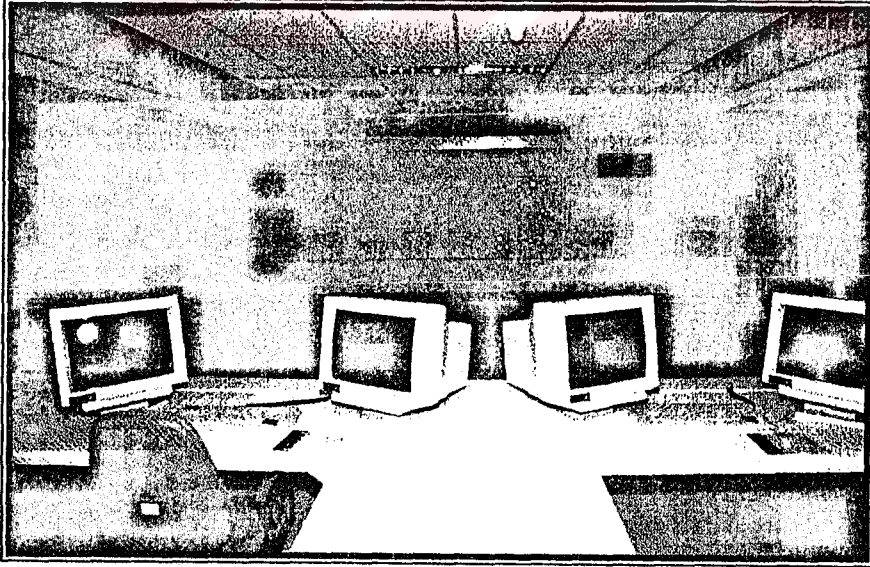
5.2.3 Uzaktan Kumanda (Telekomand) Sistemi

Bu sistem endüstride SCADA sistemi olarak bilinmektedir. TCDD' nin işlettiği tüm elektrikli hatlarda kontrol, süpervizyon ve hadise kayıtlarının tutulabilmesi için çeşitli merkezlerde (Haydarpaşa, Çerkezköy vb.) uzaktan kumanda sistemi tesis edilmiştir. Bu sistem, tüm transformatör merkezleri ve cer postalarını kontrol edebilmektedir. [Tekser, 1991]

Sisteme ait telekomünikasyon ses frekanslı kanallar ve kablo üzerinden yapılmaktadır. Transformatör merkezleri ve cer postalarının haricinde, hat boyu çalışmaları ve ihbarlar için de yaklaşık her 1000 m' de bir, kurulmuş telefon prizleri inşa edilmiş olup, bu prizele portatif bir telefonla girilerek gerekli haberleşme sağlanmaktadır. [Tekser, 1991]

Telekomand sistemi, gelişmiş mikrodnetleyiciler ile teçhiz edilmiştir.

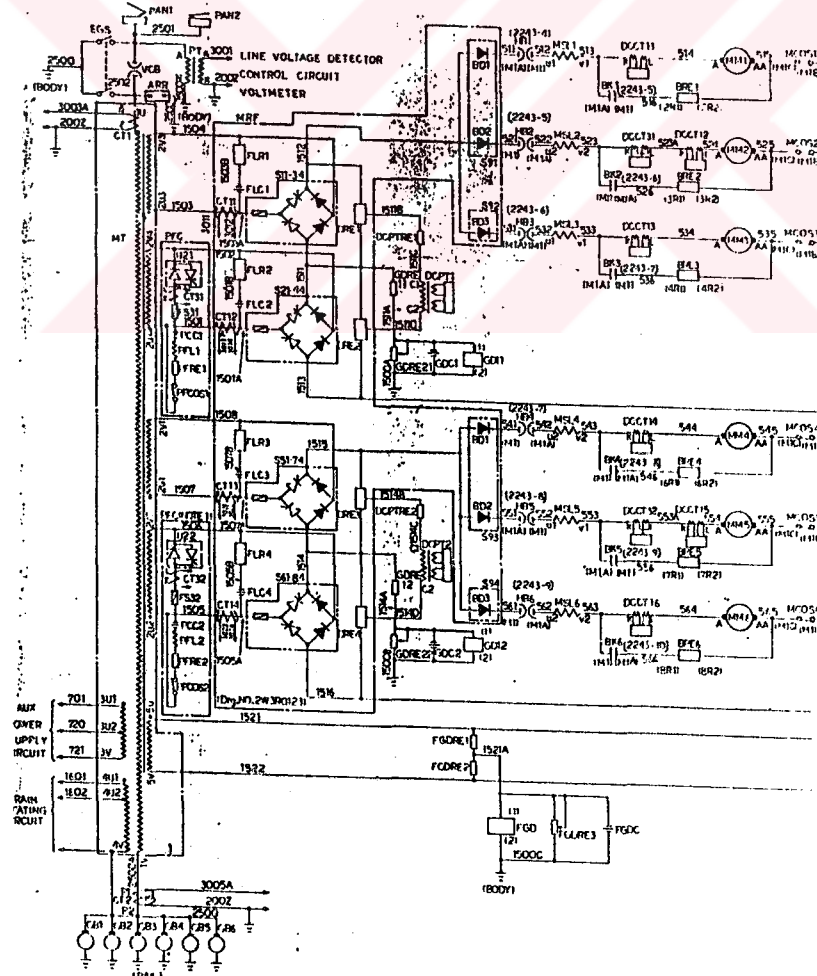
Aşağıda, Çerkezköy' de bulunan telekomand merkezine ait mimik panel görölmektedir.



Şekil - 5.3 İnşaatı bitmiş bir telekomand merkezi

5.3 Elektrikli Demiryolu Ulaşımında SRS' nin Uygulanması

Son yıllarda, özellikle elektrik enerjisi üretiminde baş gösteren aksama ve zorlukların yanı sıra, taşımacılığın yoğun olduğu sabah ve akşam saatlerinde kateneri beslemekte olan transformatör merkezleri, o anda hatta seyir halinde olan elektrikli tren ve elektrikli lokomotiflere gereken gücü aktarmada büyük ölçüde yetersiz kalmaktadırlar. Giriş ve üçüncü bölümde de genel olarak değinildiği gibi, tek fazlı sistemden beslenmekte olan elektrikli demiryolu araçları, aynı zamanda da aşırı ve hızlı değişen yükler sınıfına girmektedirler. Halen, dünyanın pek çok diğer ülkesinde de olduğu gibi, TCDD' nin işletmekte olduğu elektrikli tren ve elektrikli lokomotiflerin tamamına yakını, tristör ve diyotlar içeren kontrollü doğrultucular ile cer motorlarına kumanda etmektedir. Şekil - 5.4' de, TCDD tarafından yük ve yolcu taşımacılığında kullanılmakta olan ağır hizmet ve genel maksat tipi, E 43000 serisi elektrikli lokomotifte ait cer devresi şematik diyagramı gösterilmektedir.



Şekil - 5.4 E 43000 tipi elektrikli lokomotifte ait cer motor kontrol devre şeması

Güçelektroniği devrelerinde, faz kesme metodu ile motor hız kontrolunda kullanılan tristörlü redresörler her zaman en büyük reaktif gücü çeken konverterler olmuşlardır. Bu devrelerin şebekeden çektikleri reaktif güç :

$$Q_R = P_{yük} \cdot \tan \alpha \quad (5.1)$$

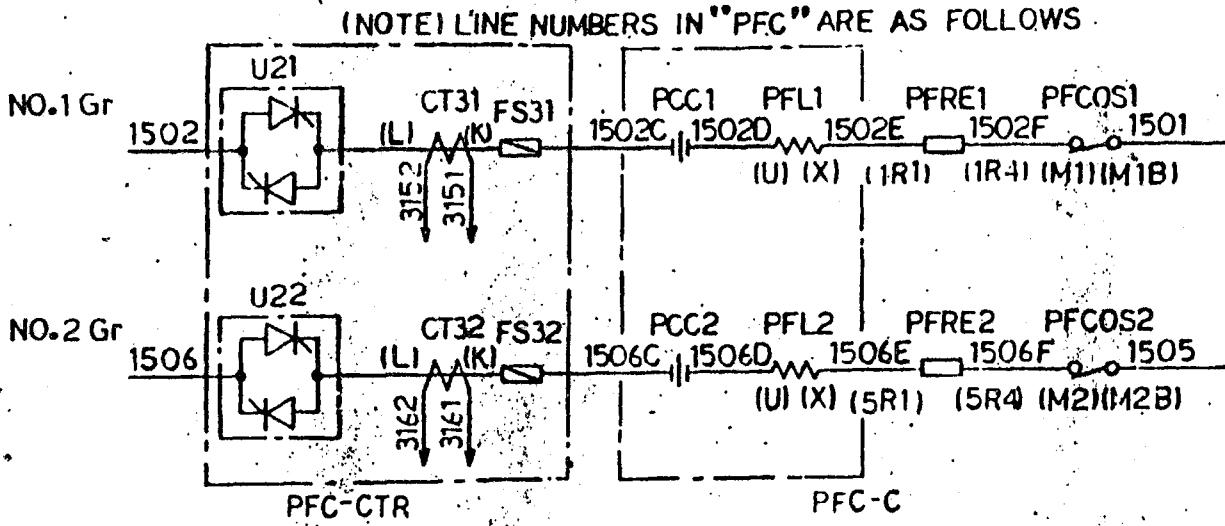
şeklinde hesaplanabilir olup bu ifadede, $P_{yük}$ yük tarafından konverterden çekilen aktif gücü, α ise bu devredeki tristör tetikleme açısını sembolize etmektedir. [Rashid, 1993]

Görüldüğü gibi, faz kontrollu konverterlerde güç faktörü tristör tetikleme açısına bağlıdır ve genellikle de düşük çıkış gerilimi gerektiren durumlarda da oldukça kötüdür. Bu konverterler, aynı zamanda şebeke içersinde harmonikler de üretmektedirler. Bir takım zorlamalı komütasyon metotları ile, şebeke tarafındaki güçkatsayısı bir miktar düzeltilebilir ve harmonik seviyeleri de düşürülebilir. Son günlerde, bu ac - dc dönüştürücü konverter devreleri için, zorlamalı komütasyon teknikleri ile bu tür iyileştirmelere gitmek yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Güç elektroniğinde kullanılan yarı iletken elemanlardaki hızlı teknolojik gelişme, zorlamalı komütasyonu pratik uygulama alanlarına taşıyabilmiştir. Bu tekniklerden bazıları :

- a) Tetikleme açısı kontrolü
- b) Simetrik açı kontrolü
- c) Darbe genişlik modülasyonu
- d) Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu

olarak sayılabilirler. [Rashid, 1993]

Gerek TCDD ve gerekse diğer ülkelerde kullanılmakta olan elektrikli tren ve elektrikli lokomotifler olsun, son yıllarda gelişen teknoloji sayesinde, bu ulaşım araçlarının bizzat kendilerinde güçkatsayısı düzeltme devreleri mevcut olarak imal edilmektedir. Şekil - 5.5' de, TCDD' nin kullanmakta olduğu E 43000 tipi genel maksatlı ağır hizmet lokomotifine ait PFC devresi (Powerfactor Correcting) şematik diyagramı gösterilmektedir. Bununla birlikte, her



PFC	POWER FACTOR CORRECTING DEVICE
PFCOS1-2	ISOLATING SWITCH FOR PFC
PFL1-2	REACTOR FOR PFC
PFRE1-2	RESISTOR FOR PFC
PT	POTENTIAL TRANSFORMER

Şekil - 5.5 E 43000 tipi elektrikli lokomotifte ait güçkatsayısı düzeltme devresi

elektrikli tren yada elektrikli lokomotifte bu devrenin bulunduğu söylenemez. TCDD işletmesinin kullanmakta olduğu en düşük güçlü elektrikli trenin bile megawattlar mertebesinde olduğu ve özellikle de düşük hız seviyelerinde de yüksek α tetikleme açlarına ihtiyaç bulunduğu için, 5.1' deki ifadeden de görüleceği üzere megaVAR' ler mertebesinde reaktif güç tüketimi söz konusu olacaktır. İşte tüm bu sebeplerden ötürü, katener hattını besleyen transformatör merkezlerinde, büyük güçlü reaktif güç kompanzasyon tesisleri kurulmaktadır. Bu bölüm içerisinde, TCDD işletmesine ait bir transformatör merkezi ve buna bağlı olan otomatik statik reaktif güç kontrol sistemi örnek olarak etraflıca anlatılacaktır.

5.4 SRS' li Bir Transformatör Merkezi

İncelemeler sırasında örnek olarak ele alınan transformatör merkezi, Kalburcu isimli ve Yarımca - İzmit' te bulunan katener besleme merkezidir. 1997 yılında bu merkez için yapılan

reaktif güç kompanzasyon sistemi tasarımı, analizler ve detaylı ölçümler ilerleyen başlıklar altında etraflıca anlatılmıştır.

5.4.1 Transformatör Merkezi ile İlgili Ölçümler ve Analizler

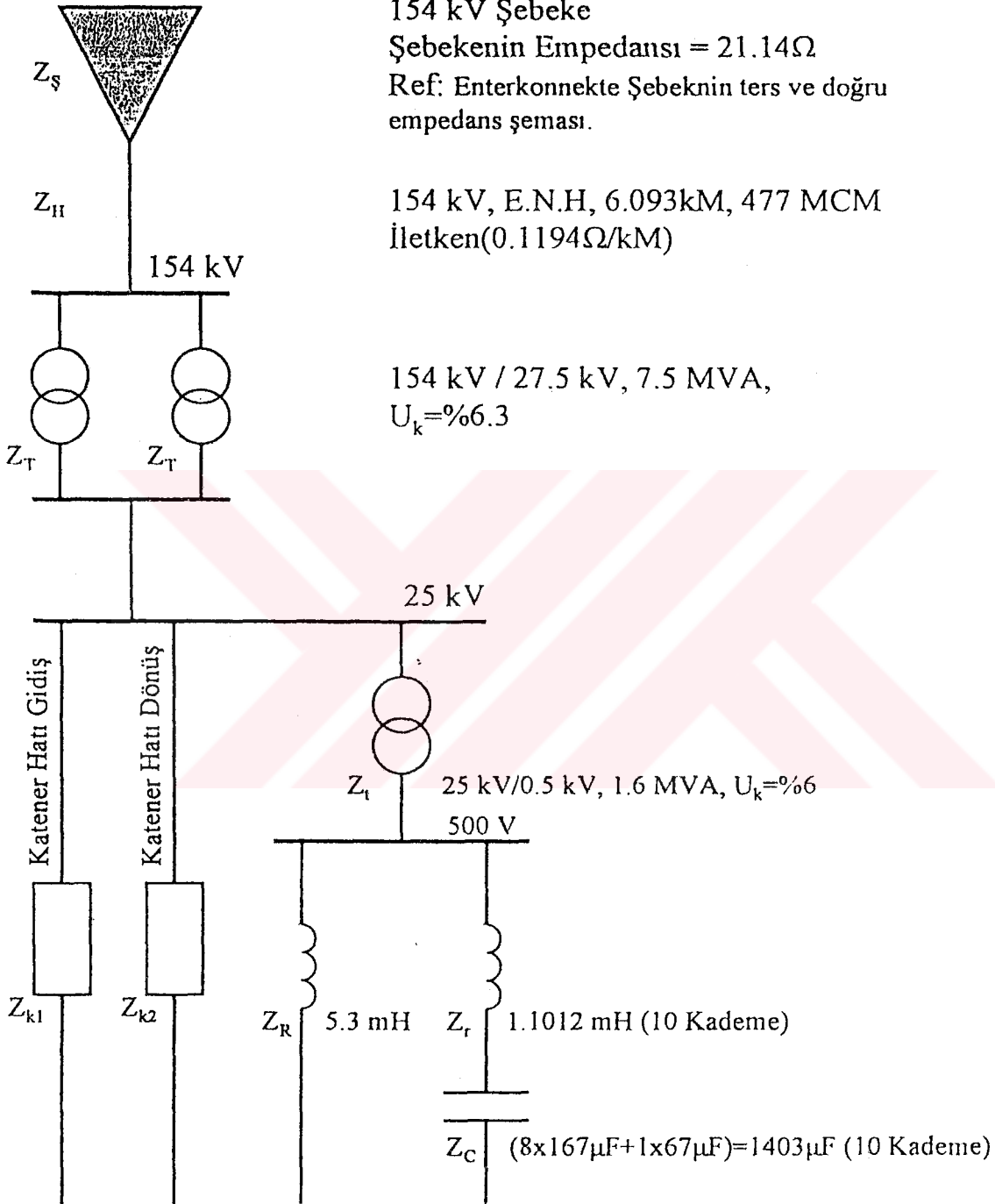
Transformatör merkezine kurulacak olan SRS' nin belirlenmesi için günlük çekilen yük miktarı, yükün şekli ve yük tarafından üretilen harmoniklerin analiz edilmesi gerekmiştir. Tüm ölçümler, harmonik analizörü adı verilen gelişmiş ve çok işlevli bir cihazla yapılmıştır. Bu cihaz, akım, gerilim, aktif güç, reaktif güç, güç faktörü ve oldukça düşük seviyelere kadar olan bileşenlere ait harmonik akım ve gerilim değerlerini ölçebilmelidir. 24 saat boyunca, oldukça sık ve belirli aralıklar ile yapılacak olan ölçümler, bu ölçümler sırasında gözlenen maksimum değerler ve harmonik miktarları SRS' nin belirlenmesinde önem arzeder.

Örnek olarak ele alınan Kalburcu Transformatör Merkezine ilişkin yükün çok değişken olduğu gözlenmiş ve dolayısıyla tristör anahtarlamalı otomatik kompanzasyon sisteminin yük karakteristiğine en uygun şekil olduğu tespit edilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, katener şebekesinin yüksüz durumlarda 60 - 160 kVAr civarı bir reaktif güç ürettiği ve enterkonnekte şebekeye ileri fazda bir akım verdiği de tespit edilmiştir.

Şekil - 5.6' da, Kalburcu Transformatör merkezinin tek hat şeması gösterilmektedir. Gerekli kompanzasyon sistemi için kademe ve eleman hesaplamaları yapılırken, bu şemada gösterilmekte olan 154 kV şebeke iletkeni de dahil olmak üzere tüm elemanların direnç, empedans, bağlı kısadevre gerilim vb. değerleri dikkate alınmıştır. Reaktif güç kompanzasyonu öncesi 10 dakikada bir yapılan periyodik ölçümler ile çekilen güç, akım, güçkatsayısı vb. teker teker belirlenmiştir. Tüm bu veriler çizelge - 5.2' de detaylı bir şekilde gösterilmektedir.

5.4.2 Reaktif Güç Kontrol Sistemi Dizayn Kriterleri

Kompanzasyon sisteminin alçak gerilim ile çalışmasını temin etmek için 25 / 0.5 kV' luk bir indirici transformatör ön görülmüştür. Yapılmış olan ölçümlerden de yola çıkarak 1250 kVAr' lık bir reaktif güç kompanzasyon sisteminin bu transformatör merkezi için yeterli olacağı



Şekil - 5.6 TCDD Kalburcu Transformator Merkezi tek hat şeması

Çizelge - 5.2 Reaktif güç kompanzasyonu öncesi transformatör merkezine ait ölçümler

ZAMAN	kV	Periyot Ortalaması			Maximum			PF
		A	MW	MWAr	A	MW	MVAr	
00:03	27.25	62.00	1.30	1.26	135.00	2.50	2.70	0.68
00:13	27.25	36.00	0.70	0.82	103.00	1.49	2.38	0.53
00:23	27.25	95.00	1.90	1.86	235.00	4.13	4.89	0.65
00:33	27.25	67.00	1.39	1.30	178.00	3.03	3.79	0.63
00:43	27.25	44.00	0.90	0.95	187.00	2.99	4.13	0.59
00:53	27.25	65.00	1.29	1.32	200.00	3.35	4.30	0.62
01:03	27.25	57.00	1.11	1.23	123.00	1.91	2.76	0.57
01:13	27.00	35.00	0.67	0.79	125.00	1.78	2.87	0.53
01:23	27.25	39.00	0.72	0.91	103.00	1.48	2.38	0.53
01:33	27.25	20.00	0.30	0.60	38.00	0.42	0.95	0.41
01:43	27.25	28.00	0.51	0.77	74.00	0.83	1.84	0.41
01:53	27.25	6.00	0.11	0.35	31.00	0.23	0.81	0.27
02:03	27.25	5.00	0.08	0.33	6.00	0.04	0.16	0.22
02:13	27.25	4.00	0.07	0.34	6.00	0.04	0.16	0.22
02:23	27.25	4.00	0.08	0.32	6.00	0.04	0.16	0.23
02:33	27.25	4.00	0.09	0.31	5.00	0.04	0.13	0.26
02:43	27.50	4.00	0.09	0.32	5.00	0.04	0.13	0.27
02:53	27.25	4.00	0.10	0.31	7.00	0.06	0.18	0.30
03:03	27.25	4.00	0.09	0.32	5.00	0.04	0.13	0.28
03:13	27.25	4.00	0.10	0.32	6.00	0.05	0.16	0.30
03:23	27.50	4.00	0.10	0.33	6.00	0.05	0.16	0.28
03:33	27.25	4.00	0.09	0.32	5.00	0.04	0.13	0.28
03:43	27.25	4.00	0.10	0.32	5.00	0.04	0.13	0.28
03:53	27.25	4.00	0.10	0.32	5.00	0.04	0.13	0.28
04:03	27.50	4.00	0.10	0.32	5.00	0.04	0.13	0.28
04:13	27.50	4.00	0.10	0.32	5.00	0.04	0.13	0.30
04:23	27.25	4.00	0.10	0.32	5.00	0.04	0.13	0.29
04:33	27.50	4.00	0.11	0.32	5.00	0.04	0.13	0.31
04:43	27.50	4.00	0.10	0.32	5.00	0.04	0.13	0.29
04:53	27.25	4.00	0.10	0.32	6.00	0.05	0.16	0.30
05:03	27.25	15.00	0.30	0.32	76.00	0.72	1.94	0.35
05:13	27.25	26.00	0.72	0.11	94.00	1.14	2.29	0.45
05:23	27.25	37.00	0.64	0.93	88.00	1.17	2.09	0.49
05:33	27.25	19.00	0.28	0.59	63.00	0.65	1.59	0.38
05:43	27.25	43.00	0.62	1.11	119.00	1.44	2.91	0.44
05:53	27.00	113.00	1.98	2.47	168.00	2.78	3.58	0.61
06:03	27.00	139.00	2.57	2.95	240.00	4.15	4.98	0.64
06:13	27.00	148.00	2.79	3.01	309.00	5.33	6.42	0.64
06:23	27.00	153.00	2.80	3.22	259.00	4.47	5.38	0.64
06:33	27.00	182.00	3.29	3.77	299.00	5.13	6.23	0.64
06:43	27.00	185.00	3.47	3.76	329.00	5.74	6.67	0.65
06:53	27.00	144.00	2.71	2.96	287.00	4.88	6.02	0.63

Zaman	kV	Periyod Ortalaması			Maxsimum			PF
		A	MW	MVAr	A	MW	MVAr	
07:03	27.00	149.00	2.93	2.92	241.00	5.52	4.68	0.69
07:13	27.25	109.00	2.15	2.14	274.00	4.91	5.62	0.66
07:23	27.25	100.00	1.95	2.02	181.00	3.23	3.73	0.65
07:33	27.25	70.00	1.35	1.40	217.00	3.67	4.64	0.62
07:43	27.25	59.00	1.20	1.14	175.00	3.21	3.53	0.67
07:53	27.00	93.00	1.73	1.90	185.00	3.01	3.98	0.60
08:03	27.00	125.00	2.44	2.42	323.00	5.67	6.63	0.65
08:13	27.00	150.00	2.92	2.94	242.00	4.43	4.80	0.68
08:23	26.75	197.00	3.90	3.69	369.00	7.11	6.85	0.72
08:33	26.75	148.00	2.93	2.80	298.00	5.60	5.67	0.70
08:43	26.75	161.00	3.27	2.91	376.00	7.32	6.90	0.73
08:53	27.00	88.00	1.85	1.60	258.00	5.36	4.44	0.77
09:03	27.25	15.00	0.32	0.10	67.00	0.84	1.62	0.46
09:13	27.25	75.00	1.77	1.15	202.00	4.35	3.37	0.79
09:23	27.25	57.00	1.40	0.76	139.00	3.05	2.25	0.81
09:33	27.25	63.00	1.50	1.08	110.00	2.31	1.92	0.77
09:43	27.50	53.00	1.26	0.87	166.00	3.26	3.14	0.72
09:53	27.25	29.00	0.70	0.56	108.00	1.79	2.34	0.61
10:03	27.50	45.00	1.03	0.62	211.00	3.45	4.66	0.60
10:13	27.50	4.00	0.06	0.21	5.00	0.04	0.13	0.28
10:23	27.25	30.00	0.67	0.54	84.00	1.43	1.79	0.63
10:33	27.00	9.00	0.19	0.13	68.00	0.74	1.68	0.40
10:43	27.00	49.00	1.13	0.82	150.00	2.88	2.84	0.71
10:53	27.00	30.00	0.74	0.40	70.00	1.27	1.40	0.67
11:03	27.00	30.00	0.74	0.35	57.00	1.08	1.09	0.70
11:13	27.25	51.00	1.17	0.97	169.00	3.27	3.24	0.71
11:23	27.25	69.00	1.58	1.17	218.00	4.52	3.85	0.76
11:33	27.00	95.00	2.00	1.75	214.00	4.19	3.98	0.73
11:43	27.25	81.00	1.72	1.50	228.00	4.61	4.17	0.74
11:53	27.00	93.00	1.87	7.38/5	192.00	3.64	3.69	0.70
12:03	27.25	61.00	1.33	1.18	138.00	2.71	2.61	0.72
12:13	27.50	48.00	0.94	0.93	160.00	3.12	3.10	0.71
12:23	27.50	52.00	1.00	1.02	158.00	3.04	3.10	0.70
12:33	27.25	40.00	0.65	0.75	167.00	2.70	3.66	0.59
12:43	27.25	48.00	1.01	0.94	155.00	2.66	3.28	0.63
12:53	27.25	74.00	1.58	1.43	147.00	2.78	2.88	0.69
13:03	27.25	57.00	1.25	1.04	127.00	2.47	2.48	0.71
13:13	27.25	49.00	0.91	0.98	128.00	2.37	2.56	0.68
13:23	27.50	25.00	0.53	0.32	100.00	1.12	2.51	0.41
13:33	27.25	24.00	0.56	0.31	80.00	1.21	1.81	0.56
13:43	27.00	74.00	1.62	1.62	205.00	3.65	4.16	0.66
13:53	27.00	59.00	1.30	1.30	155.00	3.09	2.82	0.74

Zaman	kV	Periyod Ortalaması			Maximum			PF
		A	MW	MVAr	A	MW	MVAr	
14:03	27.00	73.00	1.53	140	222.00	4.36	4.12	0.73
14:13	26.75	88.00	1.80	1.69	252.00	4.97	4.56	0.74
14:23	26.75	87.00	1.84	1.58	187.00	3.72	3.34	0.74
14:33	27.00	62.00	1.43	1.04	133.00	2.90	2.12	0.81
14:43	27.00	15.00	0.35	0.03	54.00	0.78	1.23	0.53
14:53	27.00	56.00	1.26	0.87	110.00	2.08	2.12	0.70
15:03	27.00	38.00	0.84	0.60	194.00	3.06	4.25	0.58
15:13	26.75	69.00	1.38	1.37	139.00	2.43	2.82	0.65
15:23	26.50	117.00	2.25	2.25	252.00	4.51	4.93	0.68
15:33	26.50	129.00	2.62	2.35	307.00	5.69	5.81	0.70
15:43	26.50	147.00	2.97	2.66	225.00	4.18	4.25	0.70
15:53	26.75	112.00	2.25	2.11	200.00	3.69	3.87	0.69
16:03	26.75	111.00	2.30	1.95	219.00	3.99	4.29	0.68
16:13	27.00	65.00	1.38	1.15	195.00	3.37	4.05	0.64
16:23	27.00	34.00	0.74	0.62	104.00	1.87	2.10	0.67
16:33	27.00	85.00	1.85	1.46	174.00	3.33	3.31	0.71
16:43	27.00	106.00	2.23	1.98	340.00	6.54	6.45	0.71
16:53	27.00	47.00	0.91	0.95	113.00	1.92	2.37	0.63
17:03	27.00	110.00	2.34	1.98	279.00	5.56	5.08	0.74
17:13	27.00	113.00	2.34	2.13	233.00	4.47	4.43	0.71
17:23	27.25	43.00	0.98	0.68	204.00	3.40	4.40	0.61
17:33	27.00	94.00	2.05	1.69	210.00	4.02	4.00	0.71
17:43	27.25	58.00	1.24	1.10	129.00	2.24	2.71	0.64
17:53	27.00	75.00	1.60	1.37	186.00	3.60	3.50	0.72
18:03	27.25	46.00	1.06	0.84	153.00	2.96	2.93	0.71
18:13	27.25	59.00	1.21	1.16	108.00	2.03	2.13	0.69
18:23	27.25	68.00	1.39	1.30	166.00	3.04	3.35	0.67
18:33	27.25	104.00	2.23	1.89	175.00	3.43	3.31	0.72
18:43	27.25	73.00	1.67	1.12	177.00	3.69	3.11	0.77
18:53	27.25	86.00	1.92	1.47	208.00	4.29	3.70	0.76
19:03	27.25	110.00	2.29	2.09	300.00	5.53	6.02	0.68
19:13	27.25	163.00	3.38	3.01	344.00	6.63	6.32	0.74
19:23	27.25	106.00	2.08	2.07	165.00	2.96	3.38	0.66
19:33	27.25	157.00	3.33	2.87	289.00	5.76	5.37	0.73
19:43	27.00	172.00	3.58	3.13	309.00	6.11	5.68	0.73
19:53	27.25	81.00	1.63	1.60	203.00	3.60	4.20	0.65
20:03	27.00	110.00	2.26	2.06	252.00	4.49	5.11	0.66
20:13	27.25	44.00	0.87	0.98	120.00	1.73	2.77	0.53
20:23	27.00	52.00	1.05	1.08	117.00	1.85	2.56	0.59
20:33	27.00	99.00	2.10	1.78	205.00	3.86	3.97	0.70
20:43	27.00	63.00	1.14	1.34	182.00	2.56	4.20	0.52
20:53	27.00	89.00	1.67	1.85	205.00	3.42	4.35	0.62

Zaman	kV	Periyod Ortalaması			Maximum			PF
		A	MW	MVAr	A	MW	MVAr	
21:03	27.00	109.00	2.01	2.28	301.00	4.97	6.43	0.61
21:13	27.00	80.00	1.46	1.69	202.00	3.16	4.45	0.58
21:23	27.00	125.00	2.38	2.54	217.00	3.80	4.46	0.65
21:33	27.25	69.00	1.23	1.52	175.00	2.61	3.99	0.55
21:43	27.25	49.00	0.93	1.11	260.00	3.12	6.36	0.44
21:53	27.25	29.00	0.43	0.81	107.00	1.08	2.71	0.37
22:03	27.25	59.00	1.04	1.25	221.00	3.13	5.14	0.52
22:13	27.50	43.00	0.74	1.05	153.00	2.65	3.27	0.63
22:23	27.25	117.00	2.32	2.35	307.00	5.35	6.43	0.64
22:33	27.25	129.00	2.47	2.60	276.00	4.88	5.72	0.65
22:43	27.00	164.00	3.29	3.13	342.00	6.38	6.67	0.69
22:53	27.25	154.00	3.07	3.02	223.00	4.24	4.35	0.70
23:03	27.25	117.00	2.32	1.33	224.00	4.01	4.60	0.66
23:13	27.25	130.00	2.66	2.50	221.00	4.11	4.40	0.68
23:23	27.50	75.00	1.51	1.54	240.00	3.96	5.28	0.60
23:33	27.50	30.00	0.54	0.76	133.00	1.59	3.30	0.43
23:43	27.25	68.00	1.46	1.29	174.00	2.89	3.76	0.61
23:53	27.25	57.00	1.20	1.14	124.00	2.07	2.67	0.61

belirlenmiştir. Yakın bir gelecek içerisindeki yaklaşık % 20' lik güç artışı ihtimali de göz önüne alınarak $Q_c = 1500 \text{ kVAr}$ ' lık bir kompanzasyon sistemi üzerinde karar kılınmıştır. Buna göre 1600 kVA gücünde bir indirici transformator yeterli olmuştur.

Yapılmış olan ölçümler ışığında, 1250 kVAr' lık ve 500 V' ta çalışan bir kompanzasyon sistemi ile güç faktörünün 0.94' e yükseltilebileceği belirlenmiştir.

Yapılmış olan ölçümlerde, 10' ar dakikalık periyotlar ile ortalama ve maksimum değerler belirlenmiştir. Bu ölçümleri, TCDD İşletmesi' nin açmış olduğu ihaleye kazanan bir konsorsiyum, yüklenici firma olarak yapmıştır. Çizelge - 5.3' de ise kompanzasyon sonrası alınan ölçüm değerleri mevcuttur. Bu değerler ise tamamen kendi çabalarımız ve imkanlarımız doğrultusunda elde edilmiştir. Kompanzasyon sonrası yapılan ölçümler anlık değerleri ifade etmektedir.

Çizelge - 5.3 Reaktif güç kompanzasyonu sonrası transformatör merkezine ait ölçümler

Zaman	kV.	A	Hz	Cos Q
12.14	25.227	192	50.0	0.95
12.34	25.227	84	49.8	0.93
12.54	25.340	195	49.8	0.97
13.14	25.340	000	50.0	00.0
13.34	25.227	132	49.9	0.96
13.54	25.227	138	49.9	0.97
14.14	25.340	201	49.9	0.95
14.34	25.340	6	49.9	0.09
14.54	25.340	000	49.9	0.0
15.14	25.340	300	50.0	0.95
15.34	25.454	000	49.8	0.0
15.54	25.113	189	49.9	0.96
16.14	25.909	75	49.9	0.94
16.34	25.340	132	49.8	0.94
16.54	25.340	000	49.9	0.0
17.14	25.340	66	49.9	0.94
17.34	25.340	3	49.9	0.0
17.54	25.113	000	49.5	0.0
18.14	25.227	000	49.8	0.0
18.34	25.795	000	49.8	0.0
18.54	25.340	42	49.9	0.69
19.14	25.227	420	49.7	0.93
19.34	25.454	12	50.0	0.21
19.54	25.340	75	50.0	0.80
20.14	25.454	216	50.2	0.97
20.34	25.454	144	49.5	0.90
20.54	25.227	390	50.0	0.89
21.14	25.568	78	49.9	0.63
21.34	25.568	000	49.7	0.0
21.54	25.568	60	50.0	0.81
22.14	25.454	51	49.7	0.88
22.34	25.227	186	49.8	0.97
22.54	25.340	210	50.0	0.94
23.14	25.227	189	50.0	0.98
23.34	25.113	189	49.9	0.96
23.54	24.772	69	50.1	0.82
00.15	24.999	78	50.1	0.91
00.35	24.999	27	49.8	0.47
00.55	25.227	000	49.9	0.0

Zaman	kV	A	Hz	Cos Q
01.15	25.618	000	49.9	0.0
01.35	25.227	000	50.0	0.0
01.55	25.227	000	50.1	0.0
02.15	25.340	000	49.8	0.0
02.35	25.340	000	49.9	0.0
02.55	25.340	000	50.0	0.0
03.15	25.227	000	50.0	0.0
03.35	25.681	000	50.0	0.0
03.55	24.999	000	50.0	0.0
04.15	24.999	000	50.0	0.0
04.35	25.340	159	49.9	0.97
04.55	25.681	000	49.9	0.0
05.15	25.113	18	50.0	0.11
05.35	25.113	87	50.1	0.95
05.55	24.886	699	50.2	0.91
06.15	25.227	237	50.1	0.98
06.35	25.113	273	50.1	0.95
06.55	25.113	000	49.9	0.0
07.15	24.999	204	50.1	0.97
07.35	25.113	15	50.0	0.25
07.55	25.113	255	49.9	0.96
08.15	25.113	000	50.0	0.0
08.35	25.227	000	49.9	0.0
08.55	25.113	165	49.9	0.96
09.15	25.113	349	50.0	0.91
09.35	25.113	156	49.8	0.94
09.55	24.999	228	49.9	0.97
10.05	25.113	33	49.9	0.39
10.35	25.227	000	49.9	0.0
10.55	25.340	000	49.9	0.0
11.15	25.454	33	50.1	0.68
11.35	25.454	000	50.1	0.0
11.55	25.454	201	50.0	0.96

Çizelge - 5.3' de ölçülen değerler, daha önce de belirtildiği üzere anlık değerler olup, reaktif güç kompanzasyonundan önce, yüklenici firma tarafından yapılmış olan detaylı, periyodik ortalama ve maksimum değerleri ayrı ayrı içeren ölçümlerden farklıdır. Görüldüğü gibi, hat üzerinde seyir halinde olan herhangi bir elektrikli tren mevcut değilken, o ana tesadüf eden ölçümlerde hiçbir akım yada güçkatsayısı değeri elde edilememiştir.

Yüklenici firma ile TCDD arasında yapılan anlaşma tarihinde, yönetmelikler gereği daha düşük bir değer olan 0.90' lık güçkatsayısı dikkate alınmış olduğu için, şu anda sınır değer olarak tanımlanan 0.95' lik $\cos \phi$ değerinden uzak kalınmıştır. Halen, TCDD katener hatlarında güçkatsayısı geliştirme çalışmaları devam etmektedir.



6. SONUÇ

Reaktif güç kompanzasyonunun ilk uygulama şekilleri olan dinamik kompanzatorlerin dezavantajları, yıllar önce kontaktörler vasıtası ile devreye alınan kondansatörlerin kullanılmasını gerektirdi. Klasik kompanzasyon uygulaması adıyla da bilinen bu sistemler, günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, ana konumuz olan demiryolu sistemleri ve bunun gibi hızlı, aşırı değişken yük durumlarında ihtiyaca cevap vermekten uzak kalan bu sistemlerin yerini modern, hızlı ve biraz da karmaşık olan statik reaktif güç kontrol teknikleri almıştır.

Beşinci bölümde de bahsedildiği üzere, özellikle demiryolu trafiğinin yoğun olduğu sabah ve akşam saatlerinde hızlı değişimler gösteren katener hattı yük durumları ancak ve ancak yarıiletken güçelektronik elemanları ile yapılan kompanzasyonu zorunlu hale getirmiştir. Halen demiryolu sistemlerinde kullanılan ve faz kesme metodu olarak bilinen dc motor hız kontrol uygulamaları da zaten bu kompanzasyon tekniğinden yararlanmayı gerektirmektedir.

Çizelge - 5.2' de verilmiş olan, reaktif güç kompanzasyonu mevcut değilkenki ölçüm değerleri, güçkatsayısının ne kadar düşük olduğunu vurgulamaktadır. Başarılı bir statik reaktif güç kompanzasyonu uygulaması ile ise, yük miktarının en büyük olduğu anlarda dahi güçkatsayısı istenilen ve hedeflenen değerlerde tutulabilmektedir. Bu durum çizelge 5.3' de de kolayca görülebilmektedir.

Reaktif güç kompanzasyonu uygulamalarında, SRS' gittikçe daha yaygın olarak kullanıma geleceği ve en etkili çözüm olduğu bir gerçektir.

**TC YÖREKÖZÜLTÜ KURULU
KOMANZASYON MERKEZİ**

KAYNAKLAR

Bayram, M., (1999), Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu. Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları, İstanbul.

İnan, A., (1992), Statik VAR Kompanzatorların Enerji İletim ve Dağıtım Sistemlerine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kocaoğlu, M., (1999), Güç Katsayısı Doğrultma, Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları, İstanbul.

Miller, T.J.E. , (1982), Reaktive Power Control in Electrical Systems. Prentice Hall, New York.

Yumurtacı R., (2000), Lineer Olmayan Dengesiz Yükler İçeren Enerji Sistemlerinde Üç Fazlı Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Rashid, M. , (1993), Powerelectronics with Using PSPICE, Prentice Hall, New Jersey.

Tekser, C. , (1991), Çerkezköy - Kapıkule Demiryolu Elektrifikasyonu Projesi. TCDD Matbaası, İzmir.

Gençyuva, C. , (1998), Demiryolu Elektrifikasyonu Katener Tesisleri, TCDD Matbaası, İzmir.

Miyazaki, A. , (1986), TCDD Type E 43000 ac - Electric Locomotives. Toshiba Group, Tokyo.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	12.11.1975	
Doğum yeri	Karabük	
Lise	1989 – 1992	Demirçelik Lisesi
Lisans	1992 – 1996	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1996 - 2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Çalıştığı kurumlar

1997 – 1998	YTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi
1998 – Devam ediyor	Türk Telekom A.Ş.