

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE
KOMPANZASYON VE ENERJİ KALİTESİ SORUNLARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elk. Müh. Barış ENGİN**

Anabilim Dalı : ENERJİ BİLİM VE TEKNOLOJİ

Programı : ENERJİ BİLİM VE TEKNOLOJİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE
KOMPANZASYON VE ENERJİ KALİTESİ SORUNLARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elk. Müh. Barış ENGİN
301031041**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 2 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Adnan KAYPMAZ
Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Belgin TÜRKAY (İ.T.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Önder GÜLER (İ.T.Ü.)**

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması ile bana çok şey kazandıran yüksek lisans eğitimimin de sonuna gelmiş bulunuyorum. Tezimi hazırlarken her aşamada bana büyük destek olan değerli hocalarım Prof. Dr. Adnan Kaypmaz'a ve Yrd. Doç. Dr. Ömer Gül'e, beni her zaman destekleyen ve sevgilerini hep yanımda gördüğüm Kimya Mühendisi Berrin Bay'a ve anneme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2008

Elk. Müh. Barış ENGİN

İÇİNDEKİLER	Sayfa No
ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Elektrik Dağıtım Sistemleri	2
1.2 Reaktif Güç Kompanzasyonu	3
1.3 Harmonikler	5
2. ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE KOMPANZASYON	11
2.1 Elektrik Dağıtım Sisteminin Genel Yapısı	11
2.2 Elektrik Dağıtım Sistemlerinin Şekilleri	12
2.2.1 Dallı Şebeke	12
2.2.2 Halka Şebeke	13
2.3 Temel Tanım ve Matematiksel Esaslar	13
2.4 Kompanzasyonun Amacı	15
2.5 Kompanzasyonun Faydaları	16
2.5.1 Sisteminin Kapasitesinin Artması	16
2.5.2 Isı Kayıplarının Azalması	17
2.5.3 Gerilim Düşümünün Azalması	18
2.6 Reaktif Güç İhtiyacının Belirlenmesi	18
2.6.1 Aktif Gücün Sabit Olması Hali	19
2.6.2 Görünür Gücün Sabit Olması Hali	19
2.7 Kompanzasyon Tesisinin Düzenlenmesi	20
2.7.1 Bireysel Kompanzasyon	20
2.7.2 Grup Kompanzasyon	21
2.7.3 Merkezi Kompanzasyon	22
2.7.4 Reaktif Gücün Otomatik Ayarı	24
3. KOMPANZASYON TESİSLERİNDE HARMONİKLER	26
3.1 Temel Tanım ve Matematiksel Kavramlar	26
3.2 Harmoniklerin Oluşması	31
3.2.1 Konvertörler (Kontrollü Doğrultucular)	33
3.2.2 Transformatörler	33
3.2.3 Generatörler	33
3.2.4 Ark Fırınları	34
3.2.5 Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları	34
3.2.6 Statik VAR Kompanzatorler	35

3.2.7 Bilgisayarlar ve Elektronik Balastlar	36
3.3 Harmoniklerin Kompanzasyon Tesislerine Etkileri	36
3.3.1 Kondansatörler	37
3.3.2 Aşırı Gerilim	39
3.3.3 Aşırı Akım	39
3.3.4 Aşırı Reaktif Yük	41
3.3.5 Kayıp Güç	42
3.4 Kompanzasyon Tesislerinde Rezonans Olayları	43
3.4.1 Harmoniksiz Durumda Rezonans Oluşumu	43
3.4.1.1 Seri Rezonans	43
3.4.1.2 Paralel Rezonans	44
3.4.2 Harmonikli Durumda Rezonans Oluşumu	45
3.4.3 Rezonansın Etkileri	48
3.4.4 Rezonansın Önlenmesi	49
3.5 Harmonik Filtreli Kompanzasyon Sistemleri	50
3.6 Kompanzasyon Uygulamalarında Dikkat Edilmesi Gereken Konular	52
3.7 Harmonik Filtre Tasarım Prosedürü	53
3.7.1 Filtrenin Reaktif Gücünün Belirlenmesi	56
3.7.2 Filtre Ayarının Seçilmesi	56
3.7.3 Filtrenin Optimizasyonu	57
3.7.4 Eleman Değerlerinin Belirlenmesi	58
3.8 Bilgisayar Çalışması	58
4. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONUNDA YENİ YÖNTEMLER	79
4.1 Giriş	79
4.2 Statik VAR Kompanzatör (SVC)	81
4.2.1 SVC Tesisinde İsdemir Örneği	84
4.3 Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)	89
4.4 Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC)	91
4.5 Aktif Filtre	92
4.5.1 Aktif Filtre Konfigürasyonları	94
4.5.1.1 Devre Yapısına Göre Sınıflandırma	95
4.5.1.2 Bağlantı Şekline Göre Sınıflandırma	96
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	100
KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ	104

KISALTMALAR

TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
kVA	: Kilo Volt Amper
kV	: Kilo Volt
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyonu
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	: International Electrotechnical Commission
MW	: Mega Watt
MVA	: Mega Volt Amper
VAr	: Volt Amper Reaktif
TS	: Türk Standardı
TTD	: Toplam Talep Distorsiyonu
İsdemir	: İskenderun Demir ve Çelik Fabrikaları A.Ş.
kW	: Kilo Watt
kVAr	: Kilo Volt Amper Reaktif
RMS	: Etkin Değer
ASUM	: Aritmetik Toplam
Erdemir	: Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları A.Ş.
GTO	: Kapı Sönümlü Tristör
IGCT	: Integrated Gate-Commutated Thyristor
IECT	: Integrated Enhanced Commutated Transistor
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
SVC	: Statik Var Kompanzatör
TCSC	: Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör
TCPAR	: Tristör Kontrollü Faz Açısı Regülatörü
SSSC	: Statik Senkron Seri Kompanzatör
STATCOM	: Statik Senkron Kompanzatör
TCSR	: Tristör Kontrollü Seri Reaktör
DVR	: Dinamik Gerilim Yükseltici
FACTS	: Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi
UPFC	: Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolörü
TCR	: Tristör Kontrollü Reaktör
MVAr	: Mega Volt Amper Reaktif
TKR	: Tristör Kontrollü Reaktör
VSC	: Gerilim kaynaklı Konvertör
DC	: Doğru Akım
PWM	: Darbe-Genişlik Modülasyonu
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1: Paralel kondansatör eklenerek sağlanan faydalar	5
Tablo 1.2: Ülkemizde karşılaşılan başlıca harmonikler ve frekansları	6
Tablo 1.3: Pasif ve aktif filtrelerin karşılaştırılması	10
Tablo 3.1: Bir ark fırınına ait harmonik akım değerleri (% temel bileşen)	34
Tablo 3.2: Manyetik balastlı bir floresan lambanın akım harmonik spektrumu ..	35
Tablo 3.3: Dağıtım sistemleri için harmonik akım bozunum sınırları	52
Tablo 3.4: Kondansatörsüz yük akışı değerleri	61
Tablo 3.5: Kompanzasyon öncesi kayıplar	62
Tablo 3.6: Kondansatörlü yük akışı değerleri	63
Tablo 3.7: Kondansatörlü durumda sistemdeki kayıplar	64
Tablo 3.8: Merkezi kompanzasyonda sistem değerleri	65
Tablo 3.9: Merkezi kompanzasyonda sistem kayıpları	66
Tablo 3.10: Dağıtım sistemindeki harmonikler	69
Tablo 3.11: Baralardaki harmonik gerilim bozunumları	70
Tablo 3.12: Transformatör akımlarındaki harmonik değerleri	70
Tablo 4.1: Kompanzasyon sistemleri ve kontrol bölgeleri	81

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	: Tek ayarlı filtre devresi (alçak geçiren)	8
Şekil 1.2	: Düşük Q tipi pasif filtre (yüksek geçiren)	8
Şekil 1.3	: Aktif harmonik filtrenin çalışma prensibi	9
Şekil 2.1	: Dallı şebeke	13
Şekil 2.2	: Halka (ring) şebeke	13
Şekil 2.3	: Akım, gerilim ve güçlerin fazör diyagramında gösterilmesi	14
Şekil 2.4	: İdeal sinüs şekilli akım ve gerilim dalgası	15
Şekil 2.5	: Bir dağıtım hattından beslenen tüketici	16
Şekil 2.6	: Güç katsayısının gerilim düşümü üzerindeki etkisi	18
Şekil 2.7	: Aktif gücün sabit olması halinde reaktif güç ihtiyacının belirlenmesi	19
Şekil 2.8	: Görünür gücün sabit olması halinde reaktif güç ihtiyacının belirlenmesi	20
Şekil 2.9	: Bireysel kompanzasyon	21
Şekil 2.10	: Grup kompanzasyon	22
Şekil 2.11	: Merkezi kompanzasyon	22
Şekil 2.12	: Aşırı kompanzasyon sonucunda gerilim yükselmesi	23
Şekil 2.13	: Modüler yapıli bir kompanzasyon paneli	25
Şekil 3.1	: Doğrusal olmayan bir elemanın akım-gerilim eğrisi	26
Şekil 3.2	: Sinüs şekilli gerilim ve akım fonksiyonları	27
Şekil 3.3	: Harmonikli ve harmoniksiz sinüs eğrileri	27
Şekil 3.4	: Bozulmuş bir dalga ve bu dalgayı oluşturan bileşenler	29
Şekil 3.5	: Bir tristör kontrollü reaktörün temel gösterimi	35
Şekil 3.6	: Doğrusal olmayan yüklerle harmonikli gerilimin oluşması	38
Şekil 3.7	: Seri rezonansta akım ve empedansın frekansa göre değişimi	44
Şekil 3.8	: Paralel rezonansta akım ve empedansın frekansa göre değişimi	45
Şekil 3.9	: Paralel rezonansta rezistif yükün etkisi	47
Şekil 3.10	: Seri ve paralel rezonanslarda sistem cevabı	48
Şekil 3.11	: Modüler yapıli harmonik filtreli kompanzasyon paneli	51
Şekil 3.12	: Harmonik Gerilim bozunumunu belirlemek için izlenecek yöntem	55
Şekil 3.13	: Bilgisayar simülasyonu için oluşturulan örnek dağıtım sistemi	60
Şekil 3.14	: ROT barasının kondansatör bağlanmadan önceki durumu	67
Şekil 3.15	: ROT barasındaki kondansatörün devreye alınması durumu	67
Şekil 3.16	: ROT barasındaki gerilim harmonikleri	68
Şekil 3.17	: 28DM-T1 transformatöründeki akım	68
Şekil 3.18	: Basbar A ve B'ye ait harmonik spektrumu	71
Şekil 3.19	: Dağıtım sistemine ait harmonik spektrumu	71
Şekil 3.20	: Filtreler devreye alındığında sistem değerleri	73
Şekil 3.21	: Merkezi filtreleme durumunda harmonikler	75
Şekil 3.22	: Transformatörlerin yıldız topraklı bağlı olması durumu	77
Şekil 4.1	: Basit bir SVC'nin tek hat diyagramı	82
Şekil 4.2	: Endüktif yüklü alternatif akım kıyıcı (TCR)	82
Şekil 4.3	: Tristör kontrollü reaktör ve sabit kapasite	83

Şekil 4.4	: B süseptansının endüktif ve kapasitif bölgede α 'ya göre değişimi	83
Şekil 4.5	: 500 kV gerilimde ve 250 MVar gücünde bir SVC tesisi	84
Şekil 4.6	: İsdemir SVC tesisi	85
Şekil 4.7	: İsdemir SVC tesisinin ve yüklerin bağlantısı	85
Şekil 4.8	: Yükün çektiği akım ve güç faktörü	86
Şekil 4.9	: SVC tesisi tek hat şeması	86
Şekil 4.10	: TKR ünitesi	87
Şekil 4.11	: TKR ünitesindeki reaktörler	87
Şekil 4.12	: SVC içindeki harmonik filtre ünitesi	88
Şekil 4.13	: Reaktörleri kontrol eden tristörler	88
Şekil 4.14	: Tristörler ve kontrol paneli	89
Şekil 4.15	: Harmonik filtrelerin kontrol panosu	89
Şekil 4.16	: SVC ve STATCOM çalışma bölgeleri	90
Şekil 4.17	: Statik senkron seri kompanzatörün çalışma diyagramı: şebeke, SSSC ve yük seri bağlı; sisteme gerilim verilmesine dair fazör diyagramı	91
Şekil 4.18	: Maxsine modeli aktif filtre	94
Şekil 4.19	: Akım kaynaklı aktif filtre (seri bağlı)	95
Şekil 4.20	: Gerilim kaynaklı aktif filtre (paralel bağlı)	96
Şekil 4.21	: Paralel aktif filtrenin iç yapısı	97
Şekil 4.22	: Hibrid aktif filtre	98
Şekil 4.23	: Birleşik güç kalite düzenleyicisi (UPFC)	98
Şekil 4.24	: 3 telli ve 4 telli aktif filtre bağlantı şemaları	99

SEMBOL LİSTESİ

C	: Kondansatör
L	: Endüktans
P	: Aktif güç
S	: Görünür güç
Q	: Reaktif güç
I_p	: Aktif akım
I_q	: Reaktif akım
I	: Görünür akım
φ	: Faz açısı
cosφ	: Güç faktörü
U₁	: Hattın başındaki faz-nötr gerilimi
U₂	: Hattın sonundaki faz-nötr gerilimi
R	: Hattın aktif direnci
X	: Hattın reaktif direnci
U_N	: Yüken nominal gerilimi
ω	: Periyodik dalğanın açısal hızı
tanδ	: Kondansatör için kayıp faktörü
Z	: Empedans
f_r	: Rezonans frekansı
X_L	: Reaktör reaktansı
X_C	: Kondansatör reaktansı
h_r	: Rezonans harmoniği
X_{SC}	: Sistemin kısa devre reaktansı
MVA_{SC}	: Sistemin kısa devre gücü
MVA_{r_{cap}}	: Kondansatör bankının gücü
kVA_{r_{cap}}	: Kondansatör bankının gücü
kVA_{tr}	: Düşürücü transformatörün görünür gücü
Z_{tr}	: Düşürücü transformatörün empedansı
h	: Harmonik derecesi
X_{eff}	: Harmonik filtrenin efektif reaktansı
Q_{eff}	: Filtrenin efektif reaktif gücü
V_{ff}	: Sistemin nominal faz-faz gerilimi
V(h)	: h. harmonikte filtrenin kondansatörü üzerinde oluşan gerilim düşümü
I(h)	: h. harmonikte kondansatörden akan akımı
Q_{anma}	: Kondansatör bankının anma gücü
α	: Devrenin tetikleme açısı
B(α)	: Toplam süseptans

ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE KOMPANZASYON VE ENERJİ KALİTESİ SORUNLARI

ÖZET

İnsanlığın elektrik enerjisi ihtiyacı her geçen gün artmaktadır; ancak bu ihtiyacın sahip olduğumuz kısıtlı kaynaklarla karşılanması gittikçe zorlaşmaktadır. Bu nedenle kullandığımız elektriği tasarruf etmenin yanında kalitesini de arttırmak arayışına gidilmiştir. Tüketicilere sunulan elektrik enerjisinin kesintisiz sağlanması ve gerilim, frekans ve güç faktörü gibi büyüklüklerin istenen sınırlar içerisinde kalması olarak tanımlanabilecek enerji kalitesi kavramı, uzun süredir elektrik mühendislerinin başlıca çalışma konuları arasında yer almaktadır.

Elektrik enerji sistemlerinde işletmeyi kolaylaştırmanın, verimi artırmanın ve enerji tasarrufu sağlamanın en etkin ve en kolay yöntemlerinden birisi reaktif güç kompanzasyonudur. Bu tez çalışmasının amacı, orta gerilim elektrik dağıtım sistemlerinde reaktif güce bağlı olarak ortaya çıkan enerji kalitesi problemlerini ve bunların çözüm yöntemlerini incelemektir. Bu kapsamda öncelikle dağıtım sistemleri incelenmiş, ardından reaktif güç kompanzasyonu hakkında bilgi verilmiştir.

Sinüzoidal bir kaynaktan beslenen doğrusal olmayan yüklerde güç faktörünün tam olarak bir yapılması, sadece reaktif güç kompanzasyonu ile yeterli değildir. Güç faktörünün yükseltilmesi için sistemde mevcut olan harmonikler filtrelenerek kompanzasyon yapılmalıdır. Bu nedenle tezin üçüncü bölümünde harmonikler ve harmonikli durumda kompanzasyon konuları işlenmiştir. Ayrıca konunun pratiğinin anlaşılabilmesi için bir demir-çelik fabrikası elektrik dağıtım sistemi esas alınarak bir model şebeke oluşturulmuş ve bu modelin bilgisayar simülasyonu yapılmıştır.

Günümüzde enerji sistemlerinde güç kalitesini sağlamak için SVC, STATCOM, SSSC ve aktif harmonik filtre gibi modern teknolojilerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu cihazlar aynı anda birçok değişkeni kontrol edebildiği için çoğunlukla tercih edilmektedir. Tez çalışmasının son bölümünde FACTS sistemleri denen modern enerji kalitesi cihazları incelenmiş ve SVC sistemi için demir-çelik fabrikası örneği verilmiştir.

REACTIVE POWER COMPENSATION AND POWER QUALITY PROBLEMS IN ELECTRICITY DISTRIBUTION SYSTEMS

SUMMARY

It is impossible for us to meet our growing electrical energy demand with the world's limited resources. We should improve the quality of the energy while saving it. The power quality concept that has been in the electrical engineers' research area for a long time can be defined as the electrical energy that is uninterrupted and its voltage, frequency and power factor are in allowable ranges.

One of the most efficient and easy methods of making operation easier, improving efficiency and saving energy is power factor correction. The aim of this thesis is examining the power quality problems related to reactive power and their solution methods. To do this firstly distribution systems are studied and then power factor correction methods are examined.

It is impossible to keep the power factor at unity with only power factor correction. To improve power factor, one must filter the harmonics in the system. In the third chapter of the thesis, harmonics and power factor improvement in harmonic-polluted systems are examined. For further understanding of the subject a computer simulation based on an iron and steel factory electrical distribution system has also been added.

Modern technologies such as SVC, STATCOM, SSSC and active filter are taking more common part to maintain power quality in power systems. Because these devices can control many parameters at the same time they are preferred for use in power systems by electrical engineers. These modern systems are called FACTS devices and are studied in the last chapter of the thesis. An example SVC plant from iron and steel industry has also been added.

1. GİRİŞ

Dünya genelinde nüfus artışı ve sanayileşmeye bağlı olarak elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu durum artık öyle bir hâl almıştır ki günümüzde gelişmiş ülkelerde kişi başına tüketilen elektrik enerjisi miktarı, gelişmişlik düzeyinin en büyük ölçütlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Sanayileşmenin bir sonucu olarak teknolojinin de gelişimi ile yaşam kalitemiz yükselmiş, buna paralel olarak tükettiğimiz elektrik enerjisinde de kalite aranır hale gelmiştir. Bunun sonucunda literatürde enerji kalitesi olarak tanımlanan kavram doğmuştur. Elektrik enerjisinin kesintisiz sağlanması ve geriliminin, frekansının ve güç faktörünün istenen değerlerde olması şeklinde tanımlayabileceğimiz enerji kalitesi, kavram olarak yeni olmakla birlikte aslında uzun süredir üzerinde çalışılan bir konudur.

Enerji kalitesi konusundaki çalışmalar genellikle gerilimdeki dalgalanmalar, çökmeler ya da kesintiler ve geçici olaylar üzerinde olmakla birlikte, hiç şüphesiz, en çok reaktif güç kompanzasyonu ve harmonikler konularında yapılmaktadır.

Elektrik enerji sistemlerinde işletmeyi kolaylaştırmanın, verimi arttırmanın ve enerji tasarrufu sağlamanın en etkin ve en kolay yöntemlerinden birisi reaktif güç kompanzasyonudur[1]. Bu tez çalışmasının amacı, orta gerilim elektrik dağıtım sistemlerinde reaktif güce bağlı olarak ortaya çıkan enerji kalitesi problemlerini ve bunların çözüm yöntemlerini incelemektir. Bu doğrultuda elektrik dağıtım şebekeleri ile birlikte reaktif güç kompanzasyonunun gerekliliği, matematiksel esasları, harmonikler ve harmonikli durumda kompanzasyon ve modern kompanzasyon sistemleri incelenmiştir. Ayrıca ETAP yazılımı ile yapılan simülasyon çalışmalarına ve örnek bir statik kompanzator tesisi incelemesine de tez içerisinde yer verilmiştir.

Tezde bölümlere göre yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

Birinci bölümde enerji kalitesi konusu tanıtılmış, tez çalışmasının amacı ve tezde izlenen yöntem belirtilmiş, elektrik dağıtım sistemleri ile reaktif güç kompanzasyonu ve harmonikler konularında özet nitelikli bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde elektrik dağıtım şebeke biçimleri, dağıtım sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonunun esasları ve kompanzasyon tesislerinin düzenlenmesi konuları incelenmiştir.

Üçüncü bölümde ise harmonikli elektrik dağıtım sistemlerinde kompanzasyon konusu işlenmektedir. Burada harmoniklerin oluşması, kompanzasyon tesislerine etkileri ve filtrelenmesi ile beraber harmonikler nedeni ile oluşabilecek rezonans olayları da açıklanmıştır. Ayrıca harmonik filtreli bir kompanzasyon sisteminin tasarım esasları ve çalışma mantığı işlenmiştir. Kompanzasyon ve harmonik filtrelerle ilgili simülasyon çalışmaları da bu bölümde yer almaktadır. Simülasyon çalışmalarında Operation Technology firmasına ait ETAP PowerStation yazılımı kullanılmıştır.

Dördüncü bölümde, günümüzde elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanılan yarıiletken teknolojisine dayalı modern sistemler incelenmiştir. Bu sistemler yalnızca reaktif gücün kompanze edilmesinde kullanılmaz, aynı zamanda harmoniklerin filtrelenmesi, gerilim kararlılığının sağlanması ve hata akımlarının sınırlandırılmasında da etkilidir. Bu nedenle bunlara genel olarak enerji kalitesi düzenleyicileri de denir.

Beşinci bölümde ise tez çalışmasının sonuçları irdelenmiş ve simülasyon çalışmasının teori ile karşılaştırması yapılmıştır.

1.1 Elektrik Dağıtım Sistemleri

Günümüzde elektrik enerjisi genellikle büyük güçlü üretim yapan merkezi santrallerde üretilmekte, iletim hatlarıyla tüketim merkezlerine taşındıktan sonra dağıtım sistemi ile tüketicilere ulaştırılmaktadır. Üretim tesisinin iletim sistemine bağlantısı için belirlenen iletim kapasitesi, herhangi bir arızadan önce; teçhizatın kapasitesinin üzerinde yüklenmemesi, gerilimlerin normal işletme koşulları için belirlenen sınırların dışına çıkmaması ve gerilim regülasyonunun yetersiz kalmaması, sistemin kararlılığını kaybetmemesi şartları sağlanacak şekilde planlanır[2]. Üretim merkezleri ve iletim sistemleri, bütün tüketicilerin bağlı olduğu sistemi besleyecek şekilde düzenlenerek ve birbirine bağlanarak enterkonnekte şebekeyi oluştururlar.

Günümüzde dağıtım sistemleri işletme sırasında oluşabilecek enerji kalitesini bozucu etkilere karşı tüketicileri korumak için henüz planlama aşamasında yük akışı, kısa

devreler, geçici olaylar ve harmonikler gibi pek çok analiz yöntemi ile bilgisayarda simüle edilir. Bu simülasyon çalışmalarının sonucunda sistemin zayıf noktaları belirlenerek gerekli önlemler alınır.

Elektrik enerjisini mümkün olan en yüksek verimle dağıtmak için çeşitli özelliklere sahip şebekeler geliştirilmiştir. Elektrik dağıtım şirketi açısından bir şebekenin sahip olması gereken başlıca özellikler; kesintisiz bir enerji akışı sağlaması, güvenilir ve sağlam olması ve gerilim ile frekansın izin verilen sınırların dışına çıkmaması olarak sıralanabilir.

Sistemin nominal frekansı TEİAŞ tarafından 50 Hz etrafında 49,8 – 50,2 Hz aralığında kontrol edilir. İşletme sınırı on dakikadan daha uzun süre geçilemez. Normal sistem işletmesi ve otomatik üretim kontrolü için hedef sistem frekansı 49,95 ile 50,05 Hz arasındadır[2].

Elektrik enerjisini tüketicilere ulaştıran dağıtım şebekeleri gerilimlerine ve kullanım amaçlarına göre genellikle iki şekilde kurulur. Bunlar dallı şebekeler ve ring şebekelerdir[3]. Bu şebeke türlerinin her birinin diğerine göre üstünlükleri ve zayıf yanları vardır.

En basit şebeke türü dallı şebekedir. Bunlarda besleme çoğu zaman tek kaynaktan yapılır. Basit ve ucuz bir şebeke olmasına karşın özellikle besleme noktasında oluşan arızalara karşı toleransı çok düşüktür.

Ring şebekeler kapalı şebeke türündendir. Bu tür şebekelerde besleme tek bir kaynaktan yapılabildiği gibi birkaç kaynaktan da yapılabilir. Ring şebeke ile tüketicilerin ihtiyaçları kesintisiz olarak karşılanabilir. Arıza durumunda arızalı bölge sistemin geri kalanından yalıtılabilir.

1.2 Reaktif Güç Kompanzasyonu

Enerji kalitesi konusundaki en önemli uğraşı alanlarından birisi de tüketilen fazla reaktif gücün kompanze edilmesi yani azaltılmasıdır ki bu, aynı zamanda bu tez çalışmasının da ana konusudur.

Elektrik dağıtım şebekesine bağlanan cihazların büyük bir kısmı şebekeden aktif güç yanında reaktif güç de çeker. Aktif güç, faydalı işe dönüştürülebilir ancak reaktif güç dönüştürülemez. Bununla beraber manyetik alan prensibiyle çalışan cihazların

düzgün çalışabilmesi için reaktif güce ihtiyaç duyulur. Aktif gücün elektrik santrallerinde üretilmesi gerektiği halde reaktif güç için böyle bir zorunluluk yoktur; yükün yanında kurulacak yardımcı sistemler aracılığıyla reaktif güç üretimi tüketici tarafından da yapılabilir. Basitçe yüke paralel olarak bağlanan kondansatörler yardımıyla reaktif güç üretimi yapılması, işletmenin reaktif enerji için ceza ödemesini de engeller. Bunun yapılması da teşvik edilmektedir, çünkü ihtiyaç duyulan reaktif enerji şebekeden çekilecek olursa, şebeke elemanlarını gereksiz yere yükleyip kapasiteyi azaltacağı gibi işletmenin elektrik faturasını da arttıracaktır.

Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliği'ne göre reaktif enerji miktarını ölçmek üzere gerekli ölçme düzeneği, ilgili mevzuata göre reaktif enerji tarifesi uygulanmayacak aboneler dışında kalan müşteriler tarafından tesis edilir. Bu müşterilerden, kurulu gücü 50 kVA'nın altında olanlar, çektikleri aktif enerji miktarının yüzde otuz üçünü aşan şekilde endüktif reaktif enerji tüketmeleri veya aktif enerji miktarının yüzde yirmisini aşan şekilde kapasitif reaktif enerji tüketmeleri halinde; kurulu gücü 50 kVA ve üstünde olanlar ise, çektikleri aktif enerji miktarının yüzde yirmisini aşan şekilde endüktif reaktif enerji tüketmeleri veya aktif enerji miktarının yüzde on beşini aşan şekilde sisteme kapasitif reaktif enerji vermeleri halinde, reaktif enerji tüketim bedeli ödemekle yükümlüdür[4].

Dağıtım Sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu, senkron motorlarla (dinamik faz kaydırıcılar) ve kondansatörlerle (statik faz kaydırıcılar) olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Senkron motorların uyartım akımlarının değiştirilmesi ile motorun kapasitif veya endüktif olarak çalıştırılması sağlanabilmektedir. Ayrıca senkron motorun şebekeden çektiği reaktif gücün miktarı da, uyartım akımı ile ayarlanabilir. Bundan dolayı, senkron motorlar, dinamik kompanzatör olarak kullanılmaktadırlar. Senkron motor, reaktif güç kompanzatörü olarak kullanılırken üzerinde herhangi bir yük yoksa kaynaktan çekeceği aktif güç, sadece mekanik kayıpları karşılamak için gereklidir. Ancak senkron motor, kompanzasyon yapılan sistemde başka bir amaçla kullanılmıyorsa ekonomik değildir. Günümüzde ekonomik olması, bakım gerektirmemesi ve az yer kaplaması nedeniyle kompanzasyon sistemlerinde çoğunlukla kondansatörler kullanılmaktadır. Bundan dolayı bu tez çalışmasında bahsedilen kompanzasyon konuları, kondansatörlerle yapılan kompanzasyondur.

Enerji kalitesini sağlamak için iletim ve dağıtım sistemlerine paralel kondansatör eklenmesi ile elde edilen faydalar Tablo 1.1'de görülmektedir. Bu tabloda 1 ile

gösterilenler birincil öncelikli olanlar, 2 ile gösterilenler ise ikincil öncelikli olanlardır[5].

Tablo 1.1: Paralel kondansatör eklenerek sağlanan faydalar

Faydalar	İletim Sistemi	Dağıtım Sistemi
Ek reaktif güç	1	2
Gerilim kontrolü	1	1
Sistem kapasitesinin artması	2	1
Güç kayıplarının azalması	2	1
Maliyetlerin azalması	-	1

Reaktif enerjinin istenen yerde ve istenen miktarda üretilmesi suretiyle elektrikli cihazların şebekeden çektiği reaktif gücün azaltılmasına reaktif güç kompanzasyonu denir. Böylece güç faktörü denem $\cos\phi$ 1'e yaklaştırılmış olur. Elektrik dağıtım sisteminde güç faktörü örneğin 0,80 ise görünür gücün % 80'i faydalı güce dönüşüyor demektir[6]. Bu değer 1'e mümkün olduğu kadar yakın olması istenir. Bunun sebebi, reaktif enerjinin sınırlandırılması ve elektrik sistemi elemanlarının fazla yüklenmekten kurtarılmasıdır. Bu sayede kayıplar azalırken sistem elemanlarının ömrü artar ve maliyetleri düşer. Bu nedenle her işletme, şebekeden çektiği reaktif gücü kontrol etmeli yani güç faktörünü belli sınırlar içinde tutmalıdır. Bunu sağlamak için reaktif güç kompanzasyon sistemleri kullanılır. Bu sistemlerde bulunan reaktif güç kontrol rölesi, işletmenin güç faktörünü sürekli olarak ölçer ve gerektiğinde kondansatör gruplarını devreye alır veya devreden çıkarır.

1.3 Harmonikler

Yarı iletken sistemlerin ve güç elektroniğinin gelişmesine paralel olarak günümüzde motor sürücüleri, frekans dönüştürücüleri ve doğrultucular gibi elektronik cihazlarla hemen hemen bütün endüstriyel uygulamalarda karşılaşmak mümkündür. Elektrik enerjisini oldukça verimli bir şekilde kullanan bu cihazlar, şebekeden doğrusal olmayan akım çekerler. Bunun sonucunda oluşan farklı frekanslardaki büyüklükler, sistem geriliminde ve akımında bir takım bozuklukların doğmasına sebep olur; tüketicinin dalga şekli sinüs biçiminden uzaklaşır. Buna harmonik bozunma denir.

Harmonikler, günümüzde elektriksiz hatalar söz konusu olduğunda en çok kullanılan ve enerji kalitesini bozan en büyük etkenlerden birisidir. Doğrusal olmayan yüklerin oluşturduğu harmonik bileşenleri, sistemde harmonik gerilimlerin oluşmasına neden

olur. Böylece, kendileri harmonik üretmeyen elemanlar (diğer tüketiciler) harmonik kirlenmeye maruz kalabilirler[7].

Sinüzoidal bir kaynaktan beslenen doğrusal olmayan yüklerde güç faktörünün tam olarak 1 yapılması, sadece kompanzasyon ile yeterli değildir. Bağlanan kondansatör ile güç faktörü, belli bir aralıkta değişmektedir. Güç faktörünün yükseltilmesi için akım harmonikleri filtrelenerek kompanzasyon yapılmalıdır. Doğrusal olmayan yüklerde paralel bağlanan kondansatör değerinin artması ile güç faktörü aynı şekilde artmamaktadır. Güç faktörü belli bir değere kadar artış gösterip sonrasında kondansatör ilave edilmesine rağmen azalmaktadır. Bu olay bize pratikte ne kadar gereksiz kondansatör kullanıldığını gösterir[7].

Reaktif güç kompanzasyonu konusunda çalışma yaparken harmonikler gözardı edilmemelidir. İşletmede harmoniklerin mevcut olması halinde gerilim ve akımın dalga şekilleri bozulacağı için güç faktörü saf sinüzoidal duruma göre farklı bir değer alacaktır. Harmonikler nedeniyle kompanzasyon sistemlerinde de istenmeyen etkiler görülebilir. Bunlardan en önemlileri rezonans olayıdır. Rezonanstan dolayı sistemden büyük akımlar akacağı için kondansatörler zarar görür. Ayrıca besleme şalterleri belirsiz zamanlarda açma yaparak işletmeyi durdurur. Harmonikler nedeniyle sayaçlar yanlış değer okur. Harmoniklerin zararlı etkilerinden cihazları korumak için harmonik filtreli kompanzasyon sistemleri kurulmalıdır. Böylece rezonans ihtimali ortadan kalkar, harmonik akımlarının artışı engellenir ve kondansatörler ile yardımcı ekipmanların arızalanması önlenerek ömürleri uzatılır.

Elektrik dağıtım şebekelerinde çoğunlukla karşılaşılan harmonikler 3., 5. ve 7. gibi tek katsayılı olanlardır; çift katsayılı harmoniklere pek rastlanmaz. Bunun sebebi dağıtım sistemlerindeki dalga şekillerinin noktasal simetriye sahip olmasıdır. Bu nedenle harmonikler söz konusu olduğunda yalnızca tek sayılı harmonikleri göz önüne almak yeterli olacaktır. Frekansı 50 Hz olan Türkiye elektrik dağıtım şebekesinde çoğunlukla karşılaşılan harmonikler ve bunların frekansları Tablo 1.2'de verildiği gibidir:

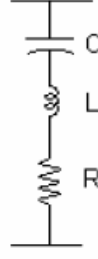
Tablo 1.2: Ülkemizde karşılaşılan başlıca harmonikler ve frekansları

Frekans (Hz)	Açıklama
50	Temel bileşen
150	3. Harmonik
250	5. Harmonik
350	7. Harmonik
450	9. Harmonik
550	11. Harmonik

Harmoniklerin engellenmesi için sadece tasarıma yönelik tedbirler almak yeterli değildir. Bu tedbirlere ek olarak harmonik akımlarının şebekeye ve diğer tüketicilere geçmesinin engellenmesi gerekir. Bu amaçla sisteme bir takım devreler eklenir. Sisteme eklenen ve istenen harmonik akımlarının süzülmesini sağlayan bu devrelere harmonik filtreleri denir[7]. Harmonik filtrelerinin kullanım amacı, sistemde bulunan farklı frekanslardaki akımların etkisini yani harmonik seviyesini kabul edilebilir değerlere çekmek veya tamamen yok etmektir. Akım harmonikleri yok edilirse bunlardan dolayı oluşan gerilim bozunumu da görülmeyecektir. Akım harmoniklerini sınırlamaktaki amaç, sisteme verilen harmonik frekanslarının herhangi birinde büyük bir paralel rezonans oluşmadan en büyük tekil harmonik bozunumunu temel frekansın % 3'ünde ve toplam harmonik bozunumunu ise % 5'te tutmaktır[8].

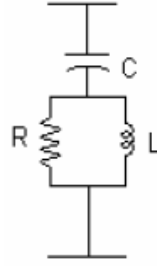
Temel yapı itibariyle harmonik filtreler, pasif ve aktif olarak ikiye ayrılır. Pasif filtrelerde direnç, endüktans ve kondansatör gibi pasif elemanlar bulunur. Aktif filtrelerde ise kontrollü akım veya gerilim kaynakları ile tristör tabanlı anahtarlama elemanları bulunur. Devreye bağlanması bakımından ise harmonik filtreler, seri ve paralel olarak ikiye ayrılırlar.

Pasif filtreler, kaynak ile tüketici arasına bağlanan ve temel frekans dışındaki bileşenleri yok eden seri bağlı kondansatör ve bobinden oluşan devrelerdir. Bazı durumlarda filtreye omik direnç de eklenebilir. Pasif filtrelerde amaç, yok edilmesi istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelen L ve C değerlerini belirlemektir. Şekil 1.1'de tek ayarlı bir pasif filtre devresi görülmektedir[7].



Şekil 1.1: Tek ayarlı filtre devresi (alçak geçiren)

Pasif filtrelerin kalite faktörü Q , rezonans frekansındaki reaktansın filtrenin direncine oranı olarak tanımlanır ve filtrenin ayar keskinliğini belirtir. Pasif filtreler ya yüksek Q (30 ila 60 arasında değerler alır) ya da düşük Q (0,5 ila 5 arasında değerler alır) tipindedir. Yüksek Q filtresi düşük dereceli harmonik frekanslardan birine ayarlanır. Düşük Q filtresi ise geniş bir frekans aralığında düşük bir empedansa sahiptir ve yüksek dereceli harmonikleri süzmek için kullanıldığında yüksek geçiren filtre olarak da düşünülür. Şekil 1.1’de verilen filtre devresi, yüksek Q tipinde bir filtredir; düşük Q tipi bir filtre ise Şekil 1.2’de gösterilmiştir[7].



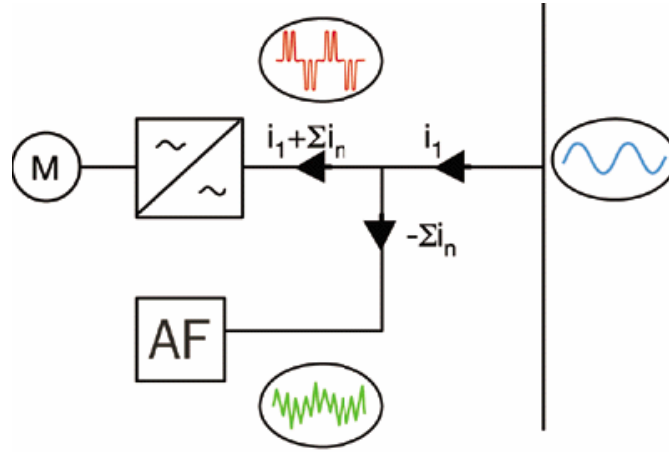
Şekil 1.2: Düşük Q tipi pasif filtre (yüksek geçiren)

Birden çok harmonik frekansına ayarlanan pasif filtreler, sürekli devrede olabilir veya anahtarlamalı olarak yüklerle birlikte devreye alınıp devreden çıkarılabilir. Bu tip filtrelerde harmonik frekans aralığı mevcut olduğu için tek bir harmonik frekans yerine birden çok harmonik bileşen yok edilir. Örneğin, beşinci harmonik için oluşturulan bir filtre yalnızca beşinci harmoniği yok etmekle kalmaz, aynı zamanda yedinci harmoniği de bir miktar azaltır[9].

Harmoniklerin filtrenmesi için pasif filtrelerin kullanımında karşılaşılan en önemli iki problem, bunların mevcut dağıtım sistemine özel olması sebebiyle sisteme eklentilerin gelmesi veya yüklerin değişmesi durumunda ilk yatırımı geçersiz kılması ve sisteme montajlarının zor olmasıdır. Bu dezavantajlarından ötürü son yıllarda

özellikle büyük işletmeler tarafından çoğunlukla aktif filtreler tercih edilmeye başlanmıştır. Aktif filtreler pasif filtreler göre pahalı olmakla birlikte çok sayıda harmonik frekansı için ayarlanabilirler. Ayrıca aktif filtreler, mevcut sistemde değişiklik yapıldığı zaman bile harmonikleri yok etmeye devam ederler ki bu, onların en önemli üstünlükleridir[7].

Aktif filtrelerin çalışma prensibi, doğrusal olmayan yükün çekeceği temel bileşen dışındaki akımları karşılamak esasına dayanır. Buna göre aktif filtreler, yükteki harmonikleri analiz ederek aynı harmonik bileşenleri ters fazda yüke enjekte eder. Böylece yükün, temel bileşenle birlikte çektiği harmonikli akımlar süzülür ve şebeke akımı saf sinüzoidal hale gelir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3: Aktif harmonik filtrenin çalışma prensibi

Pasif ve aktif filtrelerin çeşitli durumlardaki özellikleri aşağıda Tablo 1.3 ile gösterilmiştir[7].

Tablo 1.3: Pasif ve aktif filtrelerin karşılaştırılması

Durum	Pasif Filtre	Aktif Filtre
Ayarlandığı frekans	Bir veya iki frekansa ayarlıdır	Birden fazla frekansa ayarlanabilir
Harmonik değerlerindeki değişimler	Yeni filtre gerektirir	Etkilenmez
Empedansın etkisi	Rezonansa girebilir	Etkilemez
Temel frekans değişmesi	Etkinliğini azaltır	Etkilenmez
Akım yükselmesi	Problem yaratabilir	Aşırı yüklenme yaşanmaz
Harmonik sırasının kontrolü	Oldukça zor	Ayar ile mümkün

2. ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE KOMPANZASYON

2.1 Elektrik Dağıtım Sisteminin Genel Yapısı

Sosyal, ekonomik ve kültürel hayatın neredeyse tamamen elektrik enerjisine bağlı hale gelmesiyle tüketiciler, güvenli ve kaliteli enerjiyi uygun bir fiyatla kullanmayı her zamankinden daha fazla talep etmektedirler. Elektrik enerjisinin en büyük özelliği güvenilirliği olsa da bu talebin sürekli olarak karşılanması hem teknik hem de ekonomik sebeplerden ötürü imkânsızdır. Burada önemli olan nokta, elektrikteki kesinti, çökme ve istenmeyen oluşumlar gibi kaliteyi bozan etkenleri mümkün olduğu kadar azaltmaktır[3].

Elektrik enerjisinin üretim yeri tüketim bölgelerinden çok uzakta ise iletim kayıplarını azaltmak için, mesafeye ve iletilecek güce bağlı olarak 300, 400, 500 ve 765 kV gibi çeşitli gerilim değerlerinde iletim yapılır. Ülkemizde iletim sisteminin nominal gerilimleri 380 kV, 154 kV ve 66 kV'tur. İletim sisteminin planlanan gerilim sınırları 380 kV için 370 kV ile 420 kV, 154 kV için 146 kV ile 162 kV ve 66 kV için 62 kV ile 70 kV arasındadır. 380 kV'luk sistemin mevcut olmadığı bölgelerde 154 kV'luk sistem için bu limitlerin 140 ile 170 kV olduğu kabul edilir. Normal işletme koşullarında ise 380 kV'luk iletim sistemi 340 kV ile 420 kV, 154 kV'luk iletim sistemi 140 kV ile 170 kV aralıklarında çalıştırılır. 66 kV ve altındaki iletim sistemi için gerilim değişim aralığı $\pm \%10$ 'dur. Ayrıca iletim sistemi içerisindeki mevcut dağıtım seviyesi ve iç ihtiyaçlar için gerilim seviyeleri 34,5 kV, 33 kV, 31,5 kV, 15,8 kV, 10,5 kV ve 6,3 kV'tur[2].

Sistemin nominal frekansı TEİAŞ tarafından 50 Hz etrafında 49,8 – 50,2 Hz aralığında kontrol edilir. Ancak olağanüstü durumlarda sistem frekansının 52 Hz'e çıkabileceği veya 47 Hz'e düşebileceği göz önünde bulundurularak TEİAŞ ve kullanıcıların tesis ve/veya teçhizatının 47,5 – 52 Hz aralığında sürekli, 47,0 – 47,5 Hz aralığına her girişinde ise en az 20 saniye süre ile çalışacak şekilde tasarlanması zorunludur[10].

2.2 Elektrik Dağıtım Sistemlerinin Şekilleri

Elektrik dağıtım sistemleri, elektriği iletim tesislerinden alarak gerilim dönüşümü ile tüketicilerin ihtiyaç duyduğu gerilim seviyesinde dağıtırlar. Dağıtım sistemleri; gerilim seviyesine, yükün tipine, talebin büyüklüğüne ve önemine, bölgenin gelişimine ve arazinin yapısına bağlı olarak çeşitli şekillerde oluşturulabilir. Buna göre hem alçak hem de orta gerilim dağıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılan şebeke tipleri dallı (radyal) şebeke ve halka (ring) şebekedir.

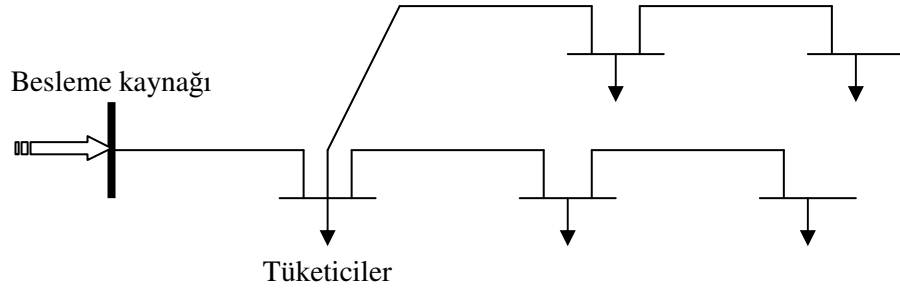
Elektrik dağıtım şirketleri için sistem planlama esasları, Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği'nde belirlenmiştir. Buna göre dağıtım şirketi; ilgili mevzuat kapsamında bölgesel talep tahminlerini hazırlar ve TEİAŞ'a sunar. TEİAŞ'ın sonuçlandırdığı talep tahminleri kurul onayına sunulur. Dağıtım şirketi, kurulun onayladığı talep tahminleri doğrultusunda yatırım planını hazırlar[11].

Dağıtım sistemi planı şu koşullar dikkate alınarak hazırlanır:

- talep tahminleri esas alınarak talebin karşılanması,
- teknolojik gelişmelere ve talepteki değişimlere karşı esneklik,
- hizmetin kalitesi,
- düşük maliyetle yüksek hizmet kalitesinin sağlanması,
- teknik kayıp, kaçak ve bedelsiz tüketim oranları,
- iletim sistemi yatırım planı ile eşgüdümün sağlanması[11].

2.2.1 Dallı (Radyal) Şebeke

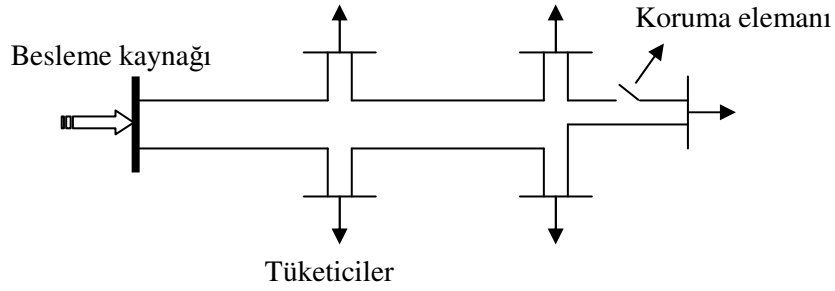
Şekil 2.1'de gösterilen dallı şebekelerin tesisi ve işletmesi kolay olup genellikle gelişime açık olan bölgelerde ve işletmelerde kurulurlar[3]. Ancak bu şebekenin dezavantajı, arıza oluştuğunda o noktadan ilerideki bütün tüketicilerin de bu arızadan etkilenmesidir. Bu nedenle dallı şebekenin elektrik enerjisini sağlama konusunda yeterince güvenilir olmadığı açıktır. Bu tür şebekeden beslenen tüketicilerde enerji kalitesini sağlamak için kesintisiz enerji kaynakları veya küçük generatörler kullanılmalıdır.



Şekil 2.1: Dallı şebeke

2.2.2 Halka (Ring) Şebeke

Bu şebeke tipinde tüketiciler dallı şebekedeki gibi tek kaynaktan ancak iki farklı iletim hattından beslenir. Burada enerji, daha güvenilir bir şekilde sağlanır. Arıza oluşması halinde en yakın baradaki koruma elemanları çalışarak ilgili hattı devre dışı bırakırlar. Bu durumda normalde kapalı olan bir anahtar açılır ve sistem, aynı kaynaktan beslenen iki bağımsız dallı şebeke gibi çalışır[3]. Şekil 2.2’de halka şebeke görülmektedir.



Şekil 2.2: Halka (ring) şebeke

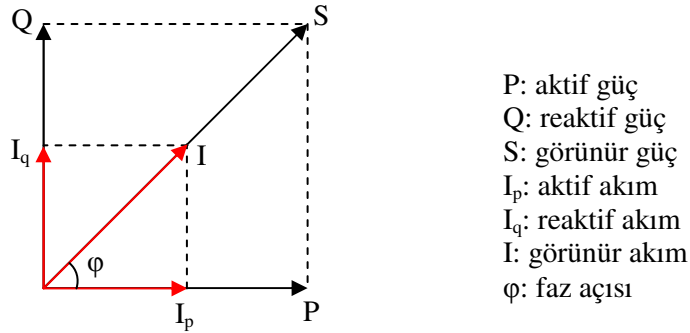
2.3 Temel Tanım ve Matematiksel Esaslar

Alternatif gerilimle beslenen tüketicilerinin şebekeden çektikleri akım da alternatif akımdır. Bu akım, aktif ve reaktif akım denen iki bileşenden meydana gelir. Aktif akım tüketicilerde faydalı güce dönüşür; reaktif akım ise faydalı güce çevrilemez. Fakat reaktif akım doğrudan bir iş yapmasa da pek çok elektrikli cihazın çalışabilmesi için kaçınılmaz bir şekilde gereklidir. Generatör, motor, transformatör gibi bir manyetik alanın varlığı ile çalışan araçlar için gerekli olan manyetik alan reaktif akım tarafından oluşturulur. Bu araçlarda manyetik alanın oluşturulması için mıknatıslanma akımı gereklidir. Bu mıknatıslanma akımı ise reaktif akımdır[12].

Reaktif akım ya da reaktif enerji, önceleri santralde aktif enerji ile birlikte üretilir ve dağıtım hatlarından yine birlikte dağıtırdı. Ancak özellikle 1940'lardan sonra sanayileşmenin artması ile bu durum problem olmaya başladı[1]. Çünkü reaktif enerjinin sistemden karşılanması, sistemden alınabilecek aktif enerjinin azalmasına neden oluyordu. Ayrıca iletim hatlarından akan reaktif akım nedeniyle görünür akım artar ve hat kayıpları da büyür.

Bu sorunu çözmek için gerektiği kadar reaktif enerjinin ihtiyaç duyulan yerde üretilmesi uygulamasına geçilmiştir. Transformatörlere, motorlara ve ihtiyaç duyulan diğer tüketicilere paralel kondansatör bağlanarak reaktif enerji ihtiyacı giderilebilir. Böylece hem iletim hatları hem de transformatörler fazla yüklenmekten kurtulmuş olur[1].

Şekil 2.3'de akımların ve güçlerin birbirlerine göre durumları fazör diyagramda görülmektedir.



Şekil 2.3: Akım, gerilim ve güçlerin fazör diyagramında gösterilmesi

Aktif güç ile görünür güç veya aktif akım ile görünür akım arasındaki ϕ açısına faz açısı ve bunun kosinüsüne de güç katsayısı denir ve $\cos\phi$ ile gösterilir.

Şekil 2.3'e göre aşağıdaki temel denklemler rahatlıkla elde edilebilir:

$$S = P + jQ \quad (2.1)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.2)$$

$$P = S \cdot \cos\phi \quad (2.3)$$

$$Q = S \cdot \sin\phi \quad (2.4)$$

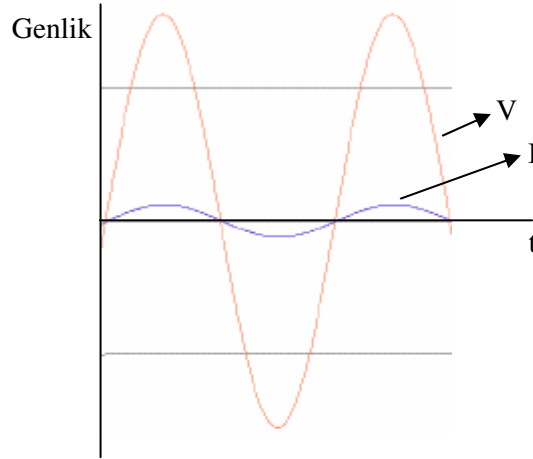
$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (2.5)$$

$$I_p = I \cdot \cos\varphi \quad (2.6)$$

$$I_q = I \cdot \sin\varphi \quad (2.7)$$

2.4 Kompanzasyonun Amacı

Elektrik dağıtım sistemlerinde aktif güçle birlikte sistemin ihtiyacının karşılanması için reaktif güç akışı da olmaktadır. Aktif gücün santrallerde üretilip tüketicilere kadar iletilmesi zorunlu olsa da reaktif güç için böyle bir zorunluluk yoktur. Reaktif güç, ihtiyaç duyulan noktalarda çeşitli yardımcı sistemlerle üretilebilir. Böylece elektrik dağıtım sisteminin çalışması için Şekil 2.4'teki gibi ideal koşullar yaratılmış olur[1].



Şekil 2.4: İdeal sinüs şekilli akım ve gerilim dalgası

Tüketicilerin normal olarak şebekeden çektikleri endüktif reaktif gücün kapasitif güç vermek suretiyle özel bir reaktif güç üreticisi tarafından dengelenmesine reaktif güç kompanzasyonu denir. Reaktif güç kompanzasyonu ile tüketicinin güç faktörü düzeltilir. Ayrıca tüketicilerin reaktif güç için ceza ödemesi de önlenmiş olur.

Dağıtım şebekesine bağlı kompanze edilmemiş bir yükte meydana gelen ani reaktif güç değişimleri şebekedeki gerilimin değişmesine yol açar. Gerilimdeki bu dalgalanma aynı noktaya bağlı olan diğer tüketiciler kadar arızaya sebep olan asıl tüketiciyi de olumsuz etkiler. Kompanzasyonun bir amacı da bu gerilim değişimlerini en aza indirmektir.

2.5 Kompanzasyonun Faydaları

Kapasitif reaktif güç, endüktif reaktif güce göre 180° öndedir. Yani vektörel olarak her iki reaktif güç aynı doğrultuda fakat ters yöndedir. Böylece birarada kullanıldığında kapasitif güç, endüktif gücü azaltarak kompanzasyon etkisi yapar.

Kompanzasyonun faydalarını tüketici açısından ve üretici açısından olmak üzere iki kısımda inceleyebiliriz.

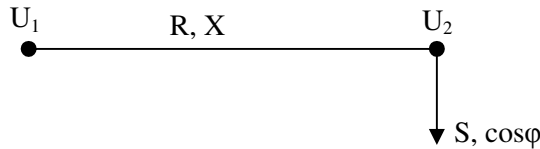
Bir tesiste reaktif güç kompanzasyonu yapılmamışsa, tüketilen reaktif enerji için elektrik dağıtım şirketine bir bedel ödenir. Tüketici açısından kompanzasyonun en önemli faydası, faydalı işe dönüşmeyen bu reaktif enerjinin faturasından tüketiciyi kurtarmasıdır. Ayrıca kompanzasyon ile sistem elemanları fazla yüklenmekten kurtulacağı için sistemin boyutları küçültülebilir ya da kapasitesi artırılabilir. Bu sayede tüketici gereksiz yatırım yapmaktan kurtulur.

Üretici açısından kompanzasyonun faydaları genel olarak üç ana başlık altında toplanır. Bunlar; sistemin kapasitesinin artması ve ısı kayıpları ile gerilim düşümünün azalmasıdır.

2.5.1 Sistemin Kapasitesinin Artması

Reaktif gücün kompanze edilmesi ile dağıtım hatlarından akan reaktif akım kompanzator tarafından karşılanacağından görünür akım azalır. Böylece sistemdeki aşırı yüklenmelerin önüne geçilebileceği gibi istek halinde ek kapasite de sağlanmış olur[1].

Bu durumu matematiksel olarak ifade etmek için sembolik bir dağıtım hattı ile bu hattan beslenen bir tüketiciyi ele alalım (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Bir dağıtım hattından beslenen tüketici

Bu şekilde U_1 ve U_2 sırasıyla hattın başındaki ve sonundaki faz-nötr gerilimleri; R ve X , hattın aktif ve reaktif dirençleri; S , tüketicinin çektiği görünür güç ve $\cos\phi$ ise

tüketicinin güç faktörüdür. Burada ilk koşul olarak P aktif gücünün sabit kalması istensin. Bu durumda kompanzasyondan önce çekilen görünür güç

$$S_1 = P / \cos\varphi_1 \quad (2.8)$$

ve kompanzasyondan sonra çekilen görünür güç

$$S_2 = P / \cos\varphi_2 \quad (2.9)$$

olur. Buna göre iki güç arasındaki fark aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (2.10)$$

Bu değeri kompanzasyon öncesi değere oranlarsak

$$\% \Delta S = (\Delta S / S_1) \times 100 = 100 (1 - \cos\varphi_1 / \cos\varphi_2) \quad (2.11)$$

elde edilir. Şu halde kompanzasyon sayesinde tesisin yükü $\% \Delta S$ oranında azalır veya gerektiği takdirde tesis aşırı yüklenmeden $\% \Delta S$ oranında kapasite artırılabilir.

İkinci koşul olarak S görünür gücünün sabit kalması istensin. Bu durumda yine benzer hesapları yaparsak, kompanzasyon sayesinde aktif güç

$$\% \Delta P = 100 (\cos\varphi_2 / \cos\varphi_1 - 1) \quad (2.12)$$

oranında artar.

2.5.2 Isı Kayıplarının Azalması

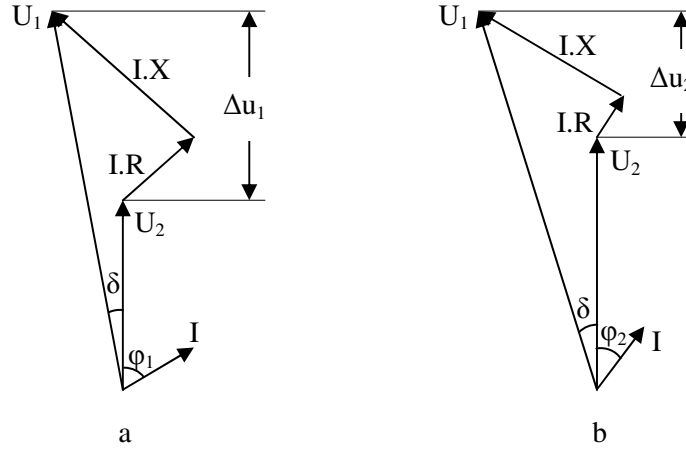
Elektrik tesislerinde I^2R enerji kayıpları; puant ve minimum yük saatlerine, iletken kesitlerine ve uzunluklarına bağlı olarak değişmekle birlikte genellikle toplam enerjinin %5'i kadar bir değer tutmaktadır. Kayıp ifadesinden de görüldüğü gibi kayıplar akımın karesiyle orantılıdır. Akım da güç faktörü ile değiştiğinden ötürü ısı kayıpları güç faktörünün karesinin tersi ile orantılıdır[12]. Kompanzasyon ile hattın çekilen toplam akım azaldığı için buna bağlı olarak ısı kayıpları da azalır. Bu ifade aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\text{kW kayıplar} \sim (\text{orijinal güç faktörü} / \text{düzeltilmiş güç faktörü})^2$$

2.5.3 Gerilim Düşümünün Azalması

Enerji dağıtım sistemlerinde gerilim kontrolü öncelikle generatörleri ve trafoların kademelerini ayarlayarak yapılmalıdır. Bu ayarlar yetersiz kalırsa güç faktörünün iyileştirilmesi yoluna gidilmelidir. Bu amaçla, kompanzasyonda kullanılan kondansatörlerin gerilimi yükseltici etkisinden faydalanılabilir[1].

Bilindiği gibi endüktif bir direnç üzerinden kapasitif bir akım geçerse çıkış gerilimi, giriş geriliminden daha yüksek olur. Güç katsayısının gerilim düşümü üzerindeki etkisinin fazör diyagramları ile gösterilmesi istenirse, Şekil 2.6'daki diyagramlar kullanılabilir[12]. Burada kondansatör kullanımının gerilimi yükselttiği açıkça görülmektedir.



Şekil 2.6: Güç katsayısının gerilim düşümü üzerindeki etkisi

Bu şekilde a, kompanzasyon öncesi durum; b, kompanzasyon sonrası durum; R ve X, hattın aktif ve reaktif dirençleri; U_1 , hattın başındaki gerilim; U_2 , hattın sonundaki gerilim; Δu , boyuna gerilim düşümü ve ϕ faz açısıdır.

2.6 Reaktif Güç İhtiyacının Belirlenmesi

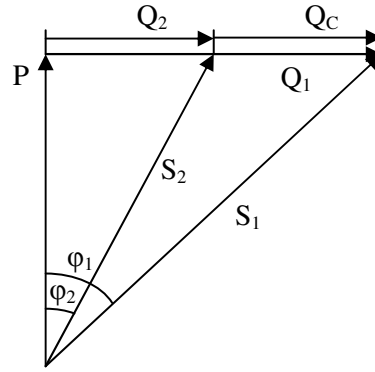
Bir tüketicinin veya bir elektrik tesisinin ihtiyaç duyduğu reaktif enerjinin belirlenmesi için öncelikle o tüketici veya tesisin şebekeden çektiği görünür gücün ve güç katsayısının ($\cos\phi_1$) bilinmesi gerekir; bunlarla birlikte güç katsayısının artırılmak istendiği değer ($\cos\phi_2$) de belirtilmelidir. Bundan sonra bağlanması gereken reaktif gücü belirlemek için iki yöntem vardır; bunlar aktif gücün veya

görünür gücün sabit tutulması halleridir[12]. Elbette bu seçeneklerden hangisinin kullanılacağı tüketicinin veya tesisin ihtiyacına göre belirlenmelidir.

Genel olarak bir tesiste kurulacak kompanzasyon sisteminin tipi sistemdeki yüklerin dağılımına, reaktif güç ihtiyacının değişimine ve tesisteki harmoniklerin miktarına bağlıdır.

2.6.1 Aktif Gücün Sabit Olması Hali

Bu durumda $\cos\phi_1$ güç katsayısı altında çekilen P aktif gücü sabit tutularak S_1 görünür gücü S_2 gibi daha düşük bir değere geriler. Bu durum fazör diyagramı ile Şekil 2.7’de olduğu gibi ifade edilebilir:



Şekil 2.7: Aktif gücün sabit olması halinde reaktif güç ihtiyacının belirlenmesi

Şekle göre kompanzasyon yapılmadan önceki reaktif güç

$$Q_1 = P \cdot \tan\phi_1 \quad (2.13)$$

kompanzasyon yapıldıktan sonraki reaktif güç ise

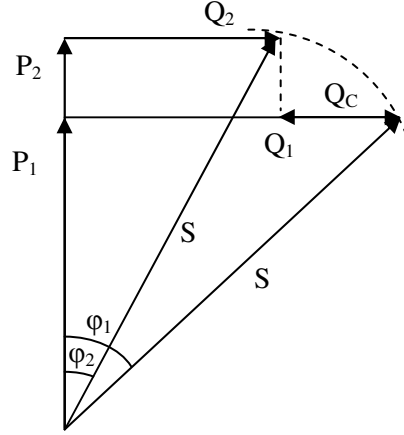
$$Q_2 = P \cdot \tan\phi_2 \quad (2.14)$$

olur. Buna göre kompanzasyon için gereken reaktif güç değeri bunların farkıdır:

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = P(\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \quad (2.15)$$

2.6.2 Görünür Gücün Sabit Olması Hali

Bu durumda sistemin görünür gücü kompanzasyon sonrasında da sabit tutularak şebekeden çekilebilecek aktif güç artırılır. Bunu fazör diyagramı ile Şekil 2.8’deki gibi ifade edebiliriz.



Şekil 2.8: Görünür gücün sabit olması halinde reaktif güç ihtiyacının belirlenmesi

Burada kompanzasyon öncesi reaktif güç şu şekildedir:

$$Q_1 = S \cdot \sin\phi_1 \quad (2.16)$$

Kompanzasyondan sonraki Q_2 değeri ise

$$Q_2 = S \cdot \sin\phi_2 \quad (2.17)$$

dir. Buna göre gerekli kondansatör gücü bu iki değer farkına eşittir:

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = S \cdot (\sin\phi_1 - \sin\phi_2) \quad (2.18)$$

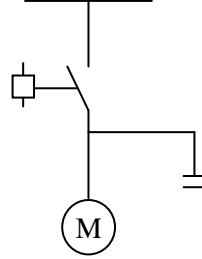
2.7 Kompanzasyon Tesisinin Düzenlenmesi

Kondansatörlerin bağlanma şekilleri, reaktif güç kompanzasyonunda büyük önem taşır. En büyük faydayı sağlamak amacıyla tesis yerinin ve bağlama şeklinin amaca en uygun şekilde yapılması gerekir. Kompanzasyon tesisleri, ihtiyaca ve yüklerin durumuna göre belirlenerek bireysel, grup ve merkezi kompanzasyon olmak üzere üç farklı şekilde oluşturulabilir.

2.7.1 Bireysel Kompanzasyon

Devamlı olarak işletmede bulunan sabit güçlü tüketicilerin reaktif güç ihtiyacını karşılamak amacıyla tüketicinin uçlarına paralel bir kondansatör bağlanmasıyla bireysel kompanzasyon yapılır. Bu tür kompanzasyonda her bir tüketici eleman, kendine bağlı olan belli güçteki kondansatörle tek tek kompanze edilir. Bu kondansatörler, ortak bir anahtar yardımıyla yüklerle birlikte devreye alınır. Dolayısıyla ayrı bir açıcı cihaza gerek yoktur[12].

Bireysel kompanzasyonun maliyeti yüksektir ve ayara elverişli değildir. Ancak sabit güçle sürekli çalışan tüketiciler için uygun ve ekonomik olabilir. Bireysel kompanzasyon, sembolik olarak Şekil 2.9'daki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.9: Bireysel kompanzasyon

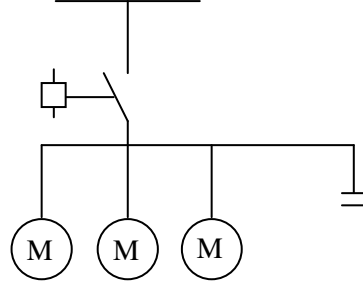
Bireysel kompanzasyonda yüke bağlanacak kondansatör gücü aşağıdaki denklemle bulunabilir[1]. Burada Q_c , kondansatör gücünü, I_0 yükün boşa çektiği akımı ve U_N ise yükün nominal gerilimini gösterir.

$$Q_c = 0,9 \cdot I_0 \cdot U_N \quad (2.19)$$

Kondansatör bir motora sürekli olarak bağlandığında, motorun besleme kaynağından ayrılmasından sonra bazı güçlüklerle karşılaşılabilir. Motor dönmeye devam ederken kendini uyararak bir jeneratör gibi hareket edebilir ve sistem gerilimini aşan gerilim yükselmelerine neden olabilir. Bununla birlikte bu durum, kondansatör akımının, motorun baştaki mıknatıslanma akımından daha küçük olması sağlanarak önlenabilir. Kondansatör akımı olarak yaklaşık % 90'lık bir değer önerilir[13].

2.7.2 Grup Kompanzasyon

Benzer türden birçok tüketicinin bulunduğu bir tesiste her bir tüketicinin ayrı ayrı kondansatörle donatılması yerine ortak bir kompanzasyon tesisi tarafından beslenmesi daha kolay ve ekonomik olur. Beraber ve aynı kontaktör üzerinden devreye girip devreden çıkan cihazlar, beraber kompanze edilirler. Bu durumda kondansatörler özel anahtarlar üzerinden ve gerektiğinde kademeli olarak şebekeye bağlanır. Şekil 2.10'da grup kompanzasyonun bağlantı şekli görülmektedir.

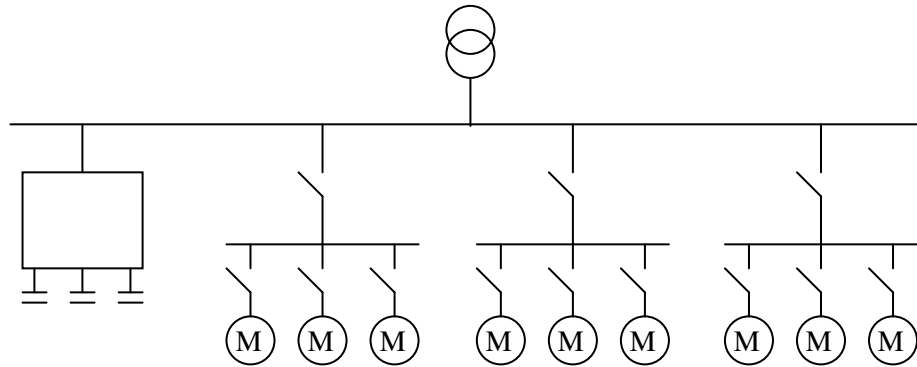


Şekil 2.10: Grup kompanzasyon

2.7.3 Merkezi Kompanzasyon

Grup kompanzasyonun kapsam olarak biraz daha genişletilmesi ile merkezi kompanzasyon elde edilir. Örneğin, bir fabrika veya işletme genelinde bütün yükler için tek bir noktadan yapılan kompanzasyon, merkezi kompanzasyon olarak adlandırılır. Merkezi kompanzasyonda genellikle bir otomatik ayar düzeneği gereklidir; çünkü burada fazla sayıda tüketici olduğundan ve bunların hepsinin sabit güçle sürekli olarak devrede bulunması söz konusu olmadığından kondansatör gücü, değişen kompanzasyon ihtiyacına uyum sağlamalıdır.

Merkezi kompanzasyon, alçak gerilim transformatörünün sekonder barasında yüke paralel olarak uygulanır. Merkezi kompanzasyonda bulunan ayar düzeneği, ayar için gerekli olan bilgileri genellikle cosφ metre denen bir cihazdan alır. Cosφ metreden gelen ölçüm değerleri ile gerekli sayıda kondansatör grubu devreye alınarak güç faktörünün istenen değerde kalması sağlanır. Böylece hem düşük hem de aşırı kompanzasyondan kurtulmak mümkün olur. Şekil 2.11’de merkezi kompanzasyon sistemi görülmektedir.

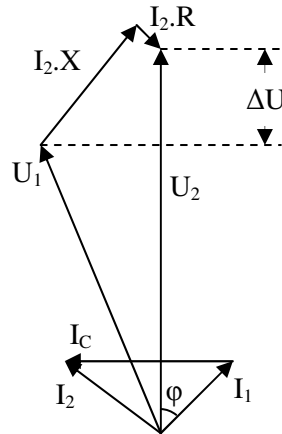


Şekil 2.11: Merkezi kompanzasyon

Bireysel kompanzasyonda kondansatör, tüketicinin ihtiyacını tam olarak karşılayacak şekilde seçildiğinden ve tüketiciye paralel bağlanıp onunla birlikte devreye alınıp devreden çıkarıldığından dolayı reaktif güç ihtiyacı ile üretim birbirini tam olarak karşılar ve güç katsayısı daima istenen değerde kalır. Buna karşın grup ve merkezi kompanzasyonda durum farklıdır; reaktif güç ihtiyacı devamlı olarak değişir. Eğer kompanzasyon için kurulan kondansatör gücü sabit seçilirse, reaktif güç ihtiyacı arttığında kondansatörler ihtiyacı karşılayamaz, eksik kalan reaktif güç şebekeden çekilir; bunun sonucunda güç katsayısı düşer. Düşük yükte çalışıldığı zamanlarda ise kondansatör gücü ihtiyacı karşılamamanın üstüne çıkar ve aşırı kompanzasyon durumu baş gösterir. Bu durumda şebekeye reaktif güç verilir ve tüketicinin bağlı olduğu transformatörde gerilim yükselir.

Bu konuda aşırı kompanzasyon kavramının da açıklanması gerekmektedir.

Bir transformatör istasyonunun beslediği tüketicilere kompanzasyon için büyük ve sabit güçlü bir kondansatör grubu paralel bağlanırsa, tüketici gücünde azalma olması halinde transformatörün yüksek gerilim tarafı kondansatörden dolayı reaktif güçle beslenir. Buna aşırı kompanzasyon denir[12]. Bu durumda tüketici geriliminde önemli bir artış meydana gelir. Bu artış o kadar yüksek değerlere çıkar ki tesisler ve kullanılan cihazlar bundan zarar görebilir. Aşırı kompanzasyon sonucunda oluşan gerilim artışı, Şekil 2.12’de fazör diyagramıyla gösterilmiştir.



Şekil 2.12: Aşırı kompanzasyon sonucunda gerilim yükselmesi[12]

Şekil 2.12’de I_1 , yük akımı; I_2 , şebeke akımı; I_C , kondansatör akımı; U_1 , şebeke gerilimi; U_2 , tüketici gerilimi; R ve X , hattın ve transformatörün direnci ve reaktansı; ΔU ise tüketici tarafında meydana gelen gerilim yükselmesidir.

Gerilim değişimine bağlı bir reaktif güç ayarı tavsiye edilmez. Bununla birlikte kondansatörlerin gerilimi düzeltici etki yaptıkları zaten bilinmektedir. Örneğin, reaktif güç ihtiyacında büyük bir artma olmaksızın aktif gücün çok artması, gerilimde azalmaya sebep olabilir. Bu gibi durumlarda, gerilime bağlı olarak yapılan kontrolde, reaktif güçte bir artışa ihtiyaç olmamasına rağmen, devreye ilave kondansatörler sokulur. Böyle bir davranış aşırı kompanzasyona yol açar. Bir yükün gerilim değişimi ile kondansatör gücü arasında doğrudan bir bağlantı yoktur[12].

2.7.4 Reaktif Gücün Otomatik Ayarı

Reaktif gücün ayarlanabilir olması, esas itibariyle iki ana sebepten dolayı zorunludur. Bunlardan birincisi ve en önemlisi aşırı gerilimi önlemek, ikincisi ise bara gerilimini sabit tutmaktır. Reaktif gücün ayarlanması için otomatik kompanzasyon sistemleri tercih edilir. Bunun için tüketiciye paralel bağlanan kondansatör gücü, tüketici gücündeki değişmeye göre, bir reaktif güç kontrol rölesi ile otomatik olarak ayarlanır[1, 12].

Otomatik kompanzasyon ayar düzeni, bir otomatik reaktif güç regülatöründen ve kondansatör gruplarına kumanda eden kontaktörlerden oluşur. Otomatik reaktif güç regülatöründe her biri bir gruba kumanda edecek şekilde düzenlenmiş çok sayıda reaktif güç rölesi ile zaman rölesi gibi yardımcı elemanlar mevcuttur. Ayrıca regülatörde, reaktif akımı ölçüp değerlendiren akım devreleri de bulunur. Reaktif akımla doğru orantılı olan gerilim düşümü, bir karşılaştırma devresinde C/k değerine uygun olarak ayarlanır. Akımın endüktif veya kapasitif karakterli olmasının belirlenmesinin ardından çıkış kontaktörleri, kondansatörleri devreye alır veya devreden çıkarır[12]. Buna kondansatörlerin otomatik ayarı denir. Bu sayede güç katsayısı yüksek bir değerde tutulurken tüketiciler aşırı kompanzasyondan korunmuş olur.

Kompanzasyon üniteleri, atölyeler ve fabrikalar gibi tesislerde kompanzasyon panelleri şeklinde tesise monte edilir. Bu panellerde istenen kompanzasyon güçleri, modüler şekilde kurulmuştur (Şekil 2.13). Böylece yükte değişiklikler yapıldığında panele yeni parçalar eklenerek istenen kompanzasyon değeri sağlanabilir.



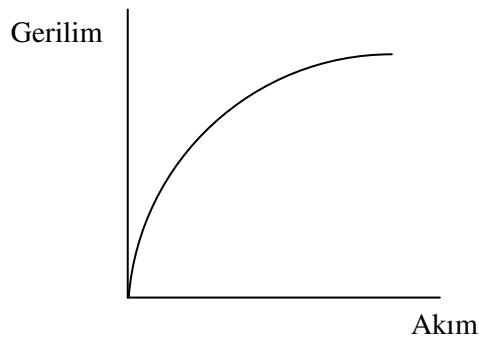
Şekil 2.13: Modüler yapılı bir kapanzasyon paneli[14]

3. KOMPANZASYON TESİSLERİNDE HARMONİKLER

3.1 Temel Tanım ve Matematiksel Kavramlar

Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği'nde harmoniklerin tanımı şu şekilde verilmektedir: Doğrusal olmayan yükler veya gerilim dalga şekli ideal olmayan jeneratörlerden dolayı bozulmaya uğramış bir alternatif akım veya gerilimde ana bileşen frekansının tam katları frekanslarda oluşan sinüzoidal bileşenlerin her biri[11].

Alternatif akım tesislerinde akım ve gerilim dalga şekillerinin tam sinüs fonksiyonu şeklinde olması istenir. Bu koşul, elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir. Bunun için enerji sistemi sinüzoidal bir kaynakla beslenmeli ve doğrusal yüklerle yüklenmelidir. Buna ideal durum adı verilir. Ancak sisteme bağlanan ve sayıları gün geçtikçe artan dönüştürücüler, ark fırınları ve güç elektroniği elemanları gibi doğrusal olmayan yüklerin akım-gerilim karakteristikleri de doğrusal olmadığı için (Şekil 3.1) bu elemanlar, üzerlerindeki akımın ve gerilimin dalga şeklini sinüs şeklinden uzaklaştırırlar; ayrıca şebekeyi ve yakındaki diğer tüketicileri de olumsuz etkilerler. Bu sebeplerden dolayı, temel frekanstan farklı frekans değerlerine sahip akım ve gerilim sinyallerinin elektrik dağıtım sistemlerinde oluşmasına harmonik bozunma adı verilir[15].



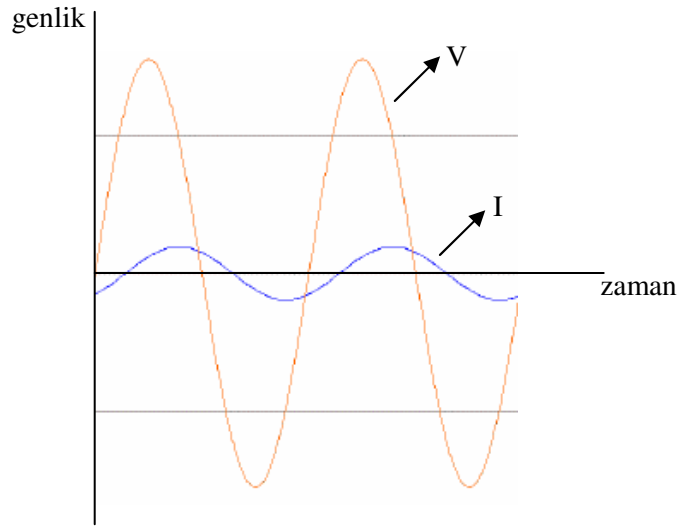
Şekil 3.1: Doğrusal olmayan bir elemanın akım-gerilim eğrisi

Sinüs şeklinde olan periyodik gerilim ve akım fonksiyonları zamana bağlı olarak sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$v(t) = V \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

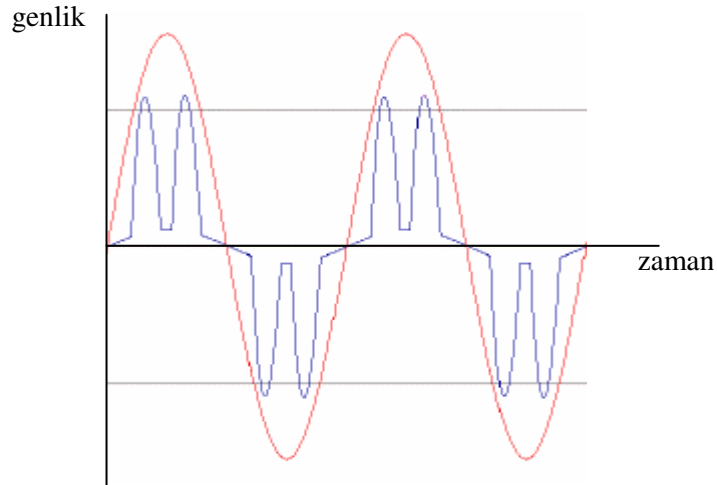
$$i(t) = I \sin(\omega t \pm \phi) \quad (3.2)$$

Burada ω , periyodik dalganın açısal hızı, ϕ ise akım ve gerilim dalgalarının arasındaki faz farkıdır. Denklem 3.1 ve 3.2’de verilen saf sinüs şekilli fonksiyonlar Şekil 3.2’deki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.2: Sinüs şekilli gerilim ve akım fonksiyonları

Harmonik bozunma sonucunda Şekil 3.2’deki gibi ifade edilen bir akım veya gerilim fonksiyonunun şeklinde değişiklikler meydana gelir (Şekil 3.3); yine de fonksiyon periyodik olma özelliğini kaybetmez.



Şekil 3.3: Harmonikli ve harmoniksiz sinüs eğrileri

Şekil 3.3’teki bozulmuş fonksiyonu Denklem 3.1’deki gibi ifade edemeyiz. Bu amaçla Fransız matematikçi Jean Fourier’in bulduğu Fourier serisi açılımını

kullanmalıyız. Fourier açılımına göre, sinüs şekilli olmayan periyodik bir fonksiyon, ayrı ayrı sinüs fonksiyonlarının toplamı olarak ifade edilebilir. Yani bozulmuş bir dalga, sinüs şekilli bileşenlerinin toplamı olarak yazılabilir. Bu özellikten ötürü, harmonik problemlerinin analizinde sıklıkla Fourier serisi ile çözüm yoluna gidilir. Böylece sistemdeki her bir harmonik bileşen bireysel olarak analiz edilebilir.

Şekil 3.3'teki örnek fonksiyon Fourier serisi ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir[6]:

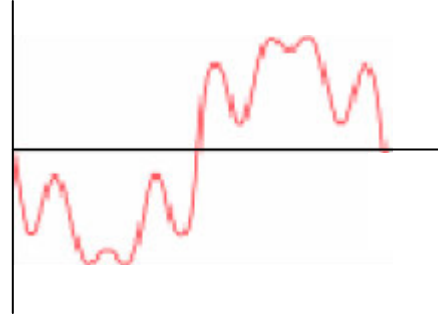
$$v(t) = V_0 + V_1\sin(\omega t) + V_2\sin(2\omega t) + V_3\sin(3\omega t) + \dots + V_n\sin(n\omega t) + \dots \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'te V_0 , dalganın DC bileşeni ve V_1, V_2, \dots, V_n ise denklemde birbirini izleyen bileşenlerin tepe değerleridir. Bu ifadeler periyodik dalganın harmonikleri olarak da anılır. Temel bileşen (veya 1. harmonik) frekansı f ise, 2. harmoniğin frekansı $2f$, 3. harmoniğin frekansı $3f$ ve n . harmoniğin frekansı ise nf olur[6]. Örnek vermek gerekirse, temel frekans 50 Hz alındığında 2. harmonik 100 Hz, 3. harmonik ise 150 Hz vb. frekansta olur. Buna göre, temel bileşen bir tam periyot yaparken aynı sürede 2. harmonik iki tam periyot, 3. harmonik ise üç tam periyot yapar.

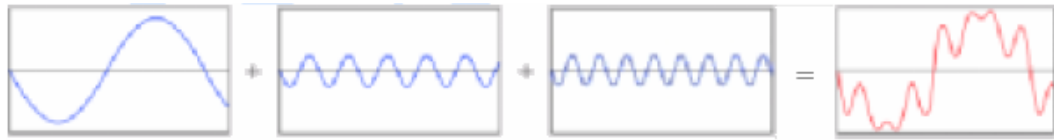
Harmonik frekansları, numaraları ile isimlendirilirler. Buna göre sistemin nominal frekansına temel bileşen, temel bileşenin iki katı frekanstaki harmoniğe ikinci harmonik, üç katı frekanstaki harmoniğe üçüncü harmonik vb. isimler verilir. Harmonikler genel olarak çift sayılı harmonikler ve tek sayılı harmonikler olarak iki grupta incelenir. İsimlerinden de anlaşıldığı gibi çift sayılı harmonikler, temel bileşenin 2., 4., 6., ... katlarıdır; tek sayılı harmonikler ise temel bileşenin 3., 5., 7., ... katlarıdır. 0 numaralı harmonik ise periyodik dalganın sabiti veya DC düzeyi olarak anılır[6].

Harmoniklerle çalışırken frekansların yerine harmonik numaraları üzerinden gitmek bize büyük kolaylıklar sağlayabilir. Çünkü frekans, ülkeye ve yapılan uygulamaya göre değişiklik gösterebilir. Örneğin ABD'nde temel frekans 60 Hz iken Avrupa ülkeleri ve Türkiye'de 50 Hz'tir.

Sinüzoidal olmayan bir gerilim veya akımın elektriksel ekipmana olan etkilerini incelemek için, her bir harmoniğin etkilerini tek tek incelemek sonra da bunları vektörel olarak toplamak yeterlidir. Şekil 3.4 a'da sinüzoidal harmoniklerin bir araya gelerek sinüzoidal olmayan bir dalga oluşturmaları ve 3.4 b'de ise bu dalgayı oluşturan bileşenler görülmektedir.



a)



Temel bileşen

5. harmonik

7. harmonik

b)

Şekil 3.4: Bozulmuş bir dalga (a) ve bu dalgayı oluşturan bileşenler (b)

Denklem 3.3'te belirtilen ifade, aşağıdaki gibi daha basit olarak yazılabilir:

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'te a_k ve b_k ile belirtilen katsayılar, her bir harmonik frekansın tepe değerini ifade eder ve $k = 1, 2, 3, \dots, n$ olmak üzere aşağıdaki şekilde hesaplanır[6]:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(t) \cdot \cos(kt) dt \quad (3.5)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(t) \sin(kt) dt \quad (3.6)$$

Harmonik büyüklüklerin sınırlanmasını amaçlayan standartlarda çok yaygın olarak kullanılan toplam harmonik distorsiyonu, gerilim ve akım için sırasıyla

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.7)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.8)$$

ifadelerinden yararlanılarak bulunur. Görüldüğü gibi THD, alternatif akım veya gerilimdeki harmoniklerin etkin değerleri kareleri toplamının karekökünün, ana bileşenin etkin değerine oranı olan ve dalga şeklindeki bozulmayı ifade eden değerdir[11]. THD genellikle % olarak ifade edilir. Bu değer, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin, tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını belirlemek için kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga şekli için THD sıfırdır. Benzer şekilde n. harmonik mertebesindeki gerilim ve akım için tekil harmonik bozunumları ise sırasıyla şöyle tanımlanır[7]:

$$IHD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad (3.9)$$

$$IHD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (3.10)$$

Harmonik bozunumlarını belirlemek için çoğunlukla kullanılan iki yöntem vardır. Bunlardan biri temel frekansın harmonik bozunumunu % 100 olarak kabul eden IEEE standardıdır. Diğer yöntem olan IEC standardında ise dalga şeklinin toplam etkin değeri dikkate alınır. Harmonik hesaplamalarında baştan sona kadar aynı yöntemi kullanmak şartıyla bu iki yöntemden hangisinin kullanıldığının bir önemi yoktur. Her iki hesap şekli de yaklaşık aynı sonuçları verir[6].

Örnek 3.1: Temel dalga gerilimi 114 V, 3. harmoniği 4 V, 5. harmoniği 2 V, 7. harmoniği 1,5 V ve 9. harmoniği 1 V olan bir dalganın THD değerini bulalım[6].

1. Yol: harmoniklerin RMS değeri hesaplanarak

$$V_H = \sqrt{4^2 + 2^2 + 1,5^2 + 1^2} = 4,82 \text{ V}$$

$$THD = \frac{4,82}{114} \times 100 \cong \% 4,23$$

2. Yol: Tekil harmonik bozunumları hesaplanarak

$$IHD_3 = \frac{4}{114} \times 100 = \% 3,51$$

$$IHD_5 = \frac{2}{114} \times 100 = \% 1,75$$

$$IHD_7 = \frac{1,5}{114} \times 100 = \% 1,32$$

$$IHD_9 = \frac{1}{114} \times 100 = \% 0,88$$

$$THD = \sqrt{3,51^2 + 1,75^2 + 1,32^2 + 0,88^2} \cong \% 4,23$$

Bir gerilim veya akım fonksiyonunun pozitif ve negatif kısımları benzer özellikteyse (noktasal simetri varsa), o fonksiyonun yalnızca tek sayılı harmonikleri oluşabilir. Enerji sistemlerinde görülen dalgalar da bu özellikte olduğundan dolayı, dağıtım şebekelerinde çift sayılı harmoniklere pek rastlanmaz; çoğunlukla tek sayılı harmonikler görülür.

Harmonikler çoğu zaman yalnızca tamsayı olarak düşünülse de bazı durumlarda tamsayı olmayan harmonik akımları ve gerilimleri de meydana gelebilir. Bunlara İnterharmonikler denir. İndüksiyon fırınları, ark ocakları ve kaynak makineleri bu duruma iyi birer örnektir. Bu cihazlar, yol alma süresince ondalıkli harmonikler üretirler, ancak normal çalışma rejimine geçtiklerinde ondalıkli harmonikler kaybolur, yalnızca tamsayıli harmonikler kalır. Ayrıca motorların hız kontrolünde kullanılan sürücülerdeki inverter de akım interharmonikleri üretebilir[6, 12, 15].

3.2 Harmoniklerin Oluşması

Enerji sistemlerinde harmonikler yeni karşılaşılan bir durum değildir. Özellikle 1970'lerin sonlarından itibaren yarı iletken elemanların ve büyük güçlü doğrusal olmayan elemanların kullanımının yaygınlaşması ile dağıtım sistemlerinde karşılaşılan harmonik bileşenlerin hem sayısı hem de büyüklükleri artmıştır. Bunun da öncesinde 1930'lu ve 1940'lı yıllardaki literatürde, transformatörlerden yayılan harmoniklerin sebep olduğu problemlere ilişkin çok sayıda makaleye rastlamak mümkündür[15].

Bir elektrik dağıtım sisteminin harmonik bileşenlerinin ortaya konması ve analizinin yapılabilmesi için sistemdeki harmonik kaynakları aşağıdaki gibi üç genel gruba ayrılabilir[7]:

1. Sisteme dağılmış çok sayıda küçük güçlü doğrusal olmayan elemanlar
2. Büyük güçlü, karakteristiği sürekli ancak düzensiz olarak değişen doğrusal olmayan yükler
3. Büyük güçlü statik konvertörler ve enerji sistemlerindeki güç elektroniği devreleri

Birinci gruptaki harmonik kaynakları, çoğu alçak gerilim cihazının (televizyon, bilgisayar vb.) besleme kaynağı durumundaki bir fazlı köprü diyotlu doğrultuculardır. Gazın deşarjı prensibiyle çalışan lambalar da bu gruba dahil edilebilir. Tek tek ele alındıkları zaman her birinin gücü düşük olmasına rağmen bu tip bir fazlı elemanların sistemde çok sayıda bulunmalarından ötürü tümünün harmonik etkisi önemli olabilmekte ve toplam harmonik bozunumunun artmasına neden olabilmektedirler.

İkinci gruptaki harmonik kaynaklarının başlıca örneği, yüksek gerilimli şebekeye doğrudan bağlanan, ancak gücü MW mertebesinde olan ve genellikle yeterli bir filtre sistemi ile donatılmayan ark fırınlarıdır. Bu fırınların empedansı dengesiz olup zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durumda sisteme enjekte edilen harmonik akımları da dengesiz olmakta ve incelenmesi zorlaşmaktadır.

Üçüncü gruptaki büyük güçlü konverterlerin ve güç elektroniği devrelerinin gerek kontrol sistemlerinin çok karmaşık olması gerekse güçlerinin büyük olması nedeniyle incelenmeleri zordur. Ayrıca konverterlerin çalışması sırasında üretilen harmonik bileşenleri güç kaynağını olumsuz etkilemektedir.

Buna göre, elektrik dağıtım sistemlerinde harmoniklere sebep olan doğrusal olmayan elemanlar, genel olarak şu şekilde verilebilir:

- Bilgisayarlar, konverterler, kontrol devreleri, elektronik balastlar ve kesintisiz güç kaynakları gibi yarı iletken elemanların kullanıldığı cihazlar
- Generatörler, motorlar ve transformatörler gibi demir çekirdeği olan cihazlar
- Gaz deşarjı prensibiyle çalışan lambalar
- Anahtarlama güç kaynakları
- Kaynak makineleri, ark fırınları

Bu harmonik kaynaklarından başlıcaları aşağıda açıklanmıştır[7].

3.2.1 Konvertörler (Kontrollü Doğrultucular)

Enerji sistemlerindeki başlıca harmonik kaynaklarından biri, üç ve bir fazlı hat komütasyonlu konverterlerdir. Doğru gerilimli iletim sistemleri, aküler ve fotovoltaik sistemler, hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenirler. Üç fazlı ideal (dengeli) konverterler, bir fazlı olanlara göre daha avantajlıdır, çünkü üç fazlı konverterlerde 3 ve 3'ün katı olan harmonikler (3, 9, 15, ...) üretilmez.

Üç fazlı konverterler, konverter transformatörünün Primer tarafından, şebekeden çekilen akımın dalga şeklinin içerdiği darbe sayısı ile tanınır. Genel olarak konverterlerin ürettikleri harmonik bileşenler $n = k.p \pm 1$ ile ifade edilir. Burada k 1, 2, 3, ... gibi tamsayıları p ise 6, 12, 18, ... şeklinde darbe sayısını belirtmektedir. Konverterin darbe sayısı arttıkça düşük dereceli harmonik bileşenlerin ortaya çıkması önlenir.

3.2.2 Transformatörler

Demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmamasından ötürü, transformatörler ve bobinler gibi demir çekirdeği bulunan sargılar, dağıtım sistemlerindeki en önemli harmonik üreteçleridir. Bunun sebebi, manyetik devredeki doymadan dolayı manyetik devreden geçen akım ile oluşan akı arasında lineer bir bağıntı bulunmamasıdır. Doyma sebebiyle akım ne kadar artarsa artsın akı artmayacaktır. Transformatörler sürekli olarak enerji altında olduklarından sistemde harmonik akımlarının dolaşmasına sebep olarak harmonik bozunumuna yol açarlar.

3.2.3 Generatörler

Sistemdeki en doğal harmonik üretici elemanlar generatörlerdir. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, manyetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşmasından, kaçak akımlardan ve sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Dönen makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretirler. Bunu önlemek için oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi kısımlarda uygun yapısal tedbirler alınır ve generatör amortisman sargısı ile donatılır.

Generatör sargılarının bağlantı şekli de harmoniklerin oluşmasında belirleyici bir özelliktir. Bunu önlemek için sargıların yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir. Ayrıca senkron generatörlerin oluşturduğu harmonikler, generatörün gücü 1 MVA'dan büyük olmadığı sürece dikkate alınmaz.

3.2.4 Ark Fırınları

Ark fırınları, geniş harmonik spektrumları ile enerji sistemine bağlanan en büyük harmonik kaynaklarından biridir. Bunlar, yüksek gerilim iletim şebekesine doğrudan bağlanan, ancak gücü MW mertebesinde olan ve elektriksel ark oluşumu esasına dayanan fırınlardır. Ark fırınlarında harmonik oluşumunun sebebi, elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin doğrusal olmamasıdır. Arkın başlamasının ardından ark gerilimi azalırken sadece sistemin eşdeğer empedansı ile sınırlandırılan ark akımı artar. Ark fırınlarının empedansı dengesiz olduğu için sisteme enjekte edilen harmonik akımları da dengesiz olur.

Ark fırınları üzerine yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, tipik bir ark fırınında çoğunlukla 2., 3., ..., 9. mertebeden akım harmoniklerine rastlanmış ve maksimum harmonik bileşenin, temel bileşenin % 30'u kadar olduğu tespit edilmiştir.

Aşağıdaki Tablo 3.1'de demir çelik sanayisinde kullanılan tipik bir ark fırınına ait harmonikler verilmiştir. Bu tabloda hem ilk eritme aşaması hem de kararlı haldeki çalışma durumlarına ait değerler görülmektedir[8].

Tablo 3.1: Bir ark fırınına ait harmonik akım değerleri (% temel bileşen)

Fırının Çalışma Durumu	Harmonik dereceleri				
	2	3	4	5	7
İlk eritme (aktif ark)	7,7	5,8	2,5	4,2	3,1
Aritma (kararlı ark)	0	2	0	2,1	0

3.2.5 Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları

Bir tüpün içinde bulunan gazın deşarj olması prensibine dayanarak geliştirilen aydınlatma elemanları (civa buharlı ve sodyum buharlı lambalar, florasan lambalar), doğrusal olmayan akım-gerilim karakteristiğine sahip olduklarından dolayı harmonik üretirler. Bina ve çevre aydınlatmasında sıkça kullanılan bu tip aydınlatma elemanlarında tek sayılı harmoniklerin seviyesi, sistemi önemli oranda etkiler.

Özellikle üçüncü harmonik ve katları, üç fazlı dört iletkenli aydınlatma devrelerinde nötr iletkeninden geçerek yüklenen iletkenin ısınmasına neden olur.

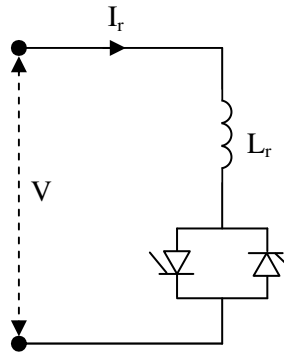
Bundan başka florasan lambalara bağlanan balastların da manyetik devreleri olması nedeniyle bu yardımcı elemanlar da harmonik üretirler. Ayrıca bu tip balastların verimleri de son derece düşüktür. Bundan ötürü son yıllarda eski tip manyetik balastların yerine yüksek verimli ve daha ekonomik olan elektronik balastlar kullanılmaktadır. Bu elemanlar da harmonik akımları üretseler de balastın içine monte edilen filtre devresi ile bu harmonikleri önlemek mümkündür. Tablo 3.2’de manyetik balastlı tipik bir florasan lamba akımının harmonik spektrumu verilmiştir.

Tablo 3.2: Manyetik balastlı bir florasan lambanın akım harmonik spektrumu

	Harmonik Sayısı (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

3.2.6 Statik VAR Kompanzatörler

Enerji sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanılan tristör kontrollü reaktör içeren statik VAR kompanzatörler, içerdikleri doğrusal olmayan elemanlar nedeniyle doğrusal olmayan uç karakteristiğine sahiptir. Bu sebeple sisteme harmonik bileşenleri verirler. Tipik bir tristör kontrollü reaktörün temel elemanları ve bağlantı şekli, Şekil 3.5’te görüldüğü gibidir.



Şekil 3.5: Bir tristör kontrollü reaktörün temel gösterimi

Tristör kontrollü reaktör içeren statik VAR kompanzatörler, ilk olarak 1970’li yıllarda kullanılmaya başlanmış olup günümüzde de enerji iletim hatlarında yaygın bir kullanım alanı bulunmaktadır. Sürekli ve hızlı bir reaktif güç ve gerilim kontrolü sağlayabilmesi nedeniyle bu cihazlar, enerji sisteminin performansını pek çok

yönden geliştirebilirler. Bunlar; aşırı gerilimlerin kontrolü, gerilim çökmesinin ve salınımların önlenmesi, geçici kararlılığın artırılması, dengesiz yükleri besleyen üç fazlı sistemlerin dengelenmesi olarak sıralanabilir. Dengeli yüklenmesi şartıyla tristör kontrollü reaktörler sadece tek sayılı harmonikleri üretirler. Eğer kendi içinde üçgen bağlantı yapılırsa 3 ve 3'ün katları olan harmonikler şebekeye verilmez, bağlantı içinde yok edilir.

3.2.7 Bilgisayarlar ve Elektronik Balastlar

Gün geçtikçe hayatımızın her alanında daha çok kullanım alanı bulan elektronik sanayi, dağıtım şebekelerinde harmoniklerin artmasına sebep olmaktadır. Elektronik cihazlarda kullanılan yarıiletken elemanların akım-gerilim karakteristiklerinin doğrusal olmamasından ötürü harmonik bozunması da söz konusu olmaktadır.

Bu tür yüklerden olan bilgisayar sistemleri, yalnızca sistemdeki bozucu etkenlerden etkilenmekle kalmayıp aynı zamanda kendi başlarına birer bozucu etki kaynağıdır. Bilgisayarların doğrusal olmayan yük karakteristikleri, sistemde anormal gerilim düşümleri, nötr iletkeninin aşırı yüklenmesi ve hat gerilim bozunmaları gibi bozucu etkilere neden olabilmektedir.

Aydınlatmada kullanılan elemanlardan elektronik balastlar da önemli birer harmonik üreticisidirler. Filtreli ve filtresiz olarak imal edilen bu balastların filtreli türlerinde harmonik etkinliği yok sayılır. Filtresiz balastlarda ise en çok görülen harmonikler 3., 5., 7. ve 9. bileşenlerdir. Bir tüketim barasına bağlı olan az sayıdaki filtresiz elektronik balastın harmonik etkinliği ihmal edilebilir, ancak büyük süpermarketler gibi çok sayıda elektronik balastın bulunduğu tesislerde harmonik seviyeleri sınır değerlerin üzerine çıkabilmektedir. Bu gibi tesislerde enerji kalitesini sağlamak için harmonik filtreli kompanzasyon sistemleri kurulmalıdır.

3.3 Harmoniklerin Kompanzasyon Tesislerine Etkileri

Günümüzde güç elektroniği ve doğrusal olmayan elemanların yaygın bir şekilde kullanılmasıyla elektrik dağıtım sistemine giderek artan miktarda harmonik akımları verilmektedir. Harmonik akımlar, yalnızca yüklerin dalga şeklini bozmakla kalmaz aynı zamanda sistemde ve sisteme bağlanan elemanlar üzerinde de pek çok olumsuz etkiler meydana getirir. Harmonikler; motorlar, generatörler, kondansatörler, transformatörler ve iletim hatlarında ek kayıplara neden olurlar. Bazı durumlarda

harmonikler, sistem elemanlarının zarar görmesine veya devre dışı kalmasına yol açabilirler. Ayrıca harmonikler sebebiyle sistemde çeşitli frekanslar bulunacağından rezonans olasılığı artacaktır. Rezonans sonucunda oluşabilecek aşırı durumlar, işletmede çalışan kişiler ve cihazlar açısından önemli zararlar doğurabilir.

Tüketicilerden sisteme verilen harmonik akımları, filtrelerle sınırlandırılmış olsa bile sistemde önemli oranda gerilim bozunumunun olduğu durumlarla karşılaşılabilir. Bunun sebebi, harmonik frekanslarından birinin sistemin rezonans frekansına yakın bir değerde olmasıdır. En yüksek gerilim bozunumu genellikle rezonansa sebep olan kondansatörde meydana gelir ki bu kondansatör harmonik kaynağından uzakta olabilir[15].

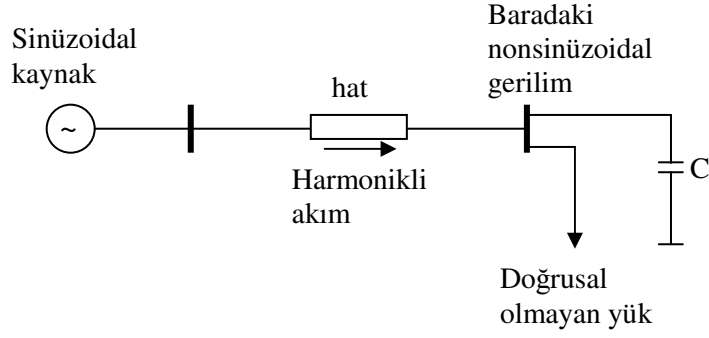
Harmoniklerin etkileri temel olarak şu şekilde sıralanabilir[7]:

- Sisteme bağlı elemanlarda ve yüklerde ek kayıpların oluşması,
- Gerilim düşümünün artması,
- Toprak kısa devre akımlarının daha büyük değerlere çıkması,
- Kompanzasyon tesislerinde kullanılan kondansatörlerin aşırı yüklenmeleri ve yalıtımlarının zarar görmesi,
- Lambalarda ve monitörlerde görüntü titreşimi oluşması,
- Motorların gürültülü çalışmaları,
- Rezonans olayının meydana gelmesi

Bu etkilerin her biri ayrı birer inceleme konusudur. Tezin bu bölümünde harmoniklerin yalnızca kompanzasyon tesislerine ve kondansatörlere ne şekilde etki ettiği incelenmiş ve kondansatörlerin sinüzoidal besleme durumu ile karşılaştırması yapılmıştır.

3.3.1 Kondansatörler

Normal şartlar altında, yani şebeke gerilim ve akımının tam sinüs şeklinde olması halinde, kompanzasyon tesislerinin ve kondansatörlerin işletilmesinde hiçbir zorlukla karşılaşılmaz. Ancak dağıtım sisteminde harmonikli büyüklüklerin olması durumunda doğrusal olmayan yükün bulunduğu baraya bağlanan kondansatörler ile diğer yükler harmonikli gerilimle beslenirler (Şekil 3.6). Bu durumda kondansatörün çalışma değerleri, sinüzoidal besleme haline göre farklı değerler olacaktır.



Şekil 3.6: Doğrusal olmayan yüklerle harmonikli gerilimin oluşması[7]

IEEE 18-2002 numaralı standarda göre kondansatörlerin anma gerilimlerinde veya anma geriliminin altında çalışabilmeleri beklenir. Kondansatörler, aşağıdaki çalışma durumları aşılmadığı sürece sürekli çalışma durumlarına devam edebilirler[9]:

- Anma geriliminin %10 fazlası
- Geçici olaylar hariç harmonikler dahil olmak üzere tepe geriliminin % 120'si
- Anma gücü ve gerilimine göre nominal akımının % 135'i
- Anma gücünün % 135'i

Bilindiği gibi frekans arttıkça kapasitif direnç küçülür. Bu yüzden harmoniksiz durumda X_C değerinde olan kapasitif bir direnç, n. harmonik derecesindeki bir akımda X_C/n değerini alır. Akım, en düşük direnci gösteren yol üzerinden akacağı için bunun sonucu olarak büyük harmonik frekanslarında kondansatörler daha büyük akım çekerler ve aşırı yüklenirler[12].

Sistemde reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanılan kondansatörlerin kendileri harmonik üretmez ancak sistemdeki harmonik seviyesi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Harmonikler kondansatörlerde aşırı gerilim ve akımlara ve bunların sonucunda aşırı reaktif yüklenmeye yol açarlar. Ayrıca harmonikler sebebiyle kondansatörlerde ısı artışı meydana gelir ki bu durumda kondansatörlerin ömrü kısalmır. Bir başka tehlike ise harmoniklerin sistemdeki kondansatörlerle bobinler arasında rezonansa sebep olarak işletmenin sürekliliğini etkilemesi ve çalışma güvenliğini tehlikeye sokmasıdır.

Yüksek seviyede harmonik etkileşim oluşan sistemlerde yapılacak kompanzasyon uygulamasında kondansatörlere seri olarak harmonik filtre reaktörlerinin kullanılması etkin bir çözümdür. Böylece harmonik akımlarına karşı kondansatörün empedansı artırılır. Ayrıca kondansatör ile şebeke empedansından kaynaklanan

rezonans frekansı kaydırılarak ana harmonik akımların oluşturduğu frekansların altında tutulabilir. Seri rezonans frekansının altındaki frekans noktalarında reaktör ve kondansatör seri devresi kapasite etkisi göstererek kompanzasyonu sağlar; seri rezonans frekansının üstündeki frekans noktalarında ise endüktans etkisi göstererek 3., 5., 7. ... harmonik frekanslarında paralel rezonans riskini ortadan kaldırır[14].

3.3.2 Aşırı Gerilim

Sistemde harmonik bozunumu söz konusu ise, reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan kondansatörlerin üzerindeki gerilim izin verilen değerlerin üzerine çıkabilir. Aşırı gerilimler, gerilimdeki harmonik bileşenleri nedeniyle oluşmaktadır. Elektrik sistemlerinde sadece tek sayılı harmonik bileşenleri bulunduğu için harmonikli bir gerilimin efektif değeri, harmonik bileşenlerine bağlı olarak

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + \dots} \quad (3.11)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada da görüldüğü gibi harmonikli durumda, sinüzoidal gerilimde tek başına bulunan temel bileşene, gerilimin harmonik bileşenleri eklenmektedir. Yüksek değerli harmonik bileşenli bir gerilim, kondansatörde aşırı gerilime ve bunun sonucunda da yalıtkan malzemenin zorlanmasına ve delinerek arızalanmasına sebep olabilir.

Aşırı gerilim sebebiyle kondansatörlerin delinmesini önlemek için kondansatörler kendini yenileyebilen özel polipropilen film ile kaplanırlar. Bu sayede aşırı gerilim oluştuğunda yalıtım delinir, oluşan kısa devre deşarjlara dolayısıyla etraftaki metalin buharlaşmasına neden olur. Bunun sonucunda elektriksel yalıtım anında yenilenir[14].

3.3.3 Aşırı Akım

Kondansatörlerde aşırı akımlar, gerilim harmoniklerinin her birinin devreden akıtacakları harmonik akımlar nedeniyle ortaya çıkar. Açıl frekansı ω olan akım veya gerilimin dolaştığı harmonik içermeyen bir devrede kondansatörün reaktansı X_c olmak üzere harmonik derecesi n olan harmonik bileşen için aynı kondansatörün reaktansı,

$$X_{Cn} = X_C / n = 1 / (n.\omega.C) \quad (3.12)$$

eşitliği ile belirlenir. Görüldüğü gibi harmonik derecesi arttıkça kapasitif reaktans azalır. Buradan n. harmoniğe ait kondansatör akımı

$$I_n = V_n / X_{Cn} = n.w.C.V_n \quad (3.13)$$

olacaktır. Bu eşitliğe göre harmonik bozunumu, kondansatör akımında gerilimden daha fazla olur. Kondansatörlerin n. harmonik için kapasitif reaktansları 1/n katsayısı ile azalacağından n. harmonik için akım harmonik bileşeni yüzdesi, gerilim harmonik bileşeni yüzdesinden daha büyük olur[7]. Başka bir deyişle, kondansatöre uygulanan harmonikli gerilim, harmonikli akımın oluşmasına sebep olur; bu akım bozunumu ise gerilim bozunumundan daha büyük olur. Kondansatörden geçen harmonikli bir akımın efektif değeri,

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (n.w.C.V_n)^2} \quad (3.14)$$

formülü ile bulunur. Tek dereceli harmonikler için kondansatör akımı,

$$I = \omega C \sqrt{(V_1^2 + 9V_3^2 + 25V_5^2 + \dots)} \quad (3.15)$$

şeklinde olur. Bu eşitlik, temel bileşene eklenen harmonik gerilimleriyle kondansatör akımının arttığını göstermektedir[7]. TS EN 60871-1 standardına göre bu artış sonucunda, kondansatörün nominal akımın en az 1,3 katına eşit efektif akıma dayanabilmesi istenmektedir[13].

Kondansatörlerin akımları, aynı efektif değerdeki sinüzoidal ve nonsinüzoidal gerilimde farklı değerler almakta, nonsinüzoidal durumda daha büyük akım geçişi olmaktadır. Örneğin, harmonik bileşenlere sahip olan bir gerilim uygulanması halinde akacak kondansatör akımı (3.15) denklemi ile ifade edilebilir. Nonsinüzoidal gerilimle efektif değeri aynı olan

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + \dots} \quad (3.16)$$

değerindeki sinüzoidal bir gerilim sonucunda akan kondansatör akımı

$$I = w.C.V \quad (3.17)$$

değerinde olacaktır. Bu iki akımın ortalamasından

$$\frac{I_{non\ sin}}{I} = \frac{\sqrt{V_1^2 + 9V_3^2 + 25V_5^2 + \dots}}{\sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + \dots}} \quad (3.18)$$

ifadesi elde edilebilir. Bu orana göre pay değeri paydadandan büyük olduğundan kondansatör için aynı efektif değere sahip nonsinüzoidal gerilimin akımı, sinüzoidal gerilimin akımından daha büyük olacaktır[7].

3.3.4 Aşırı Reaktif Yük

Aşırı reaktif yüklenme, kondansatörün çeşitli nedenlerle etiket değerlerinde belirtilen güçlerin üzerinde çalışması demektir. Kondansatörler nominal reaktif güç değeri (Q) ile anılırlar. Bu değer C kondansatör kapasitesine ve V sinüzoidal gerilimine sahip bir kondansatör için

$$Q = \omega.C.V^2 \quad (3.19)$$

formülü ile tanımlanır. Buna göre gerilimdeki artışın karesi ile orantılı olarak reaktif güç de artmaktadır. Harmonik bileşenlere sahip bir gerilimde her bir harmonik bileşen gerilimi için oluşan reaktif güç ise

$$Q_n = n.\omega.C.V_n^2 \quad (3.20)$$

eşitliği ile bulunur. Sinüzoidal olmayan gerilimle beslendikleri zaman kondansatörlerin reaktif güçleri, her bir harmonik bileşenin reaktif güçlerinin toplamından elde edilir[7]. İdeal kondansatörde kondansatörün reaktif gücü artar ve toplam reaktif güç,

$$Q_T = \sum_{n=1}^N Q_n = Q + \sum_{n=2}^N Q_n \quad (3.21)$$

değerine ulaşır. Son eşitlikten de görüldüğü gibi kondansatör, ikinci terimle belirlenen ilave güç ile aşırı reaktif yüklenmiş olacaktır.

Kondansatörlerin aynı efektif değerdeki sinüzoidal ve nonsinüzoidal gerilimde farklı reaktif güçlere sahip olacağı kolayca görülmektedir. Buna göre nonsinüzoidal durumda kondansatörün, aşırı reaktif yükleneceği bellidir. Sinüzoidal olmayan gerilim sonucunda kondansatör gücü,

$$Q_{non\ sin} = \omega.C.(V_1^2 + 3V_3^2 + 5V_5^2 + \dots) \quad (3.22)$$

olacaktır. Bu ifadeyi Denklem 3.19 ile oranlayarak

$$\frac{Q_{non\ sin}}{Q} = \frac{V_1^2 + 3V_3^2 + 5V_5^2 + \dots}{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + \dots} \quad (3.23)$$

ifadesi elde edilebilir[7]. Bu eşitlikten anlaşıldığı gibi pay değeri paydadandan büyük olduğundan dolayı aynı efektif değere sahip nonsinüzoidal gerilimli kondansatör gücü sinüzoidal gerilimli güçten büyük olur.

3.3.5 Kayıp Güç

Kondansatörler ideal kabul edildiklerinde hiçbir güç kayıpları olmaz; Oysa gerçekte kondansatörler küçük bir kayıpla çalışır. Kondansatör için tanımlanan kayıp faktörü, başka bir deyişle kayıp açısının tanjantı,

$$\tan\delta = 1 / \omega.R.C = P / Q \quad (3.24)$$

formülü ile belirlenir[7]. Buradaki P, kondansatörün aktif kayıplarını göstermektedir. Kondansatör uçlarında harmonikli gerilim bulunduğunda aktif kayıp güç değeri şöyle verilir:

$$P = R \sum_{n=1}^N I_{Rn}^2 \quad (3.25)$$

Burada I_{Rn} , n. harmoniğe ait direnç akımıdır. Akımda harmonik bileşenleri bulunursa aktif kayıp güç,

$$P = R.(I_{R1}^2 + I_{R3}^2 + I_{R5}^2 + \dots) \quad (3.26)$$

ile belirlenebilir[7]. Görüldüğü gibi akımdaki harmonik bozunum değeri arttıkça kayıp değeri de artacak ve kondansatörde sıcaklık artışı olacaktır. Bu sıcaklık artışının kondansatörün ömrü üzerine olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Yapılan bir deneysel çalışmada, harmonik akımlarının sebep olduğu %10'luk bir gerilim yükselmesinin, bir kondansatör grubunun çalışma sıcaklığını %7 oranında arttırdığı, bunun da kondansatör ömrünü %30 oranında azalttığı bulunmuştur[7].

3.4 Kompanzasyon Tesislerinde Rezonans Olayları

Rezonans olayı, elektrik dağıtım sistemlerinde enerji kalitesini düşüren, sistemin sürekliliği ve güvenliği bakımından risk oluşturan ve oluşmaması için önlem alınması gereken bir durumdur.

Devredeki endüktif reaktans ile kapasitif reaktansın birbirine eşit olması sonucunda rezonans durumu meydana gelir. Telsiz, televizyon ve radyo gibi pek çok elektronik devrenin çalışma prensibi rezonansa dayalı olsa da elektrik dağıtım sistemlerinde rezonans, istenmeyen ve çok tehlikeli sonuçlara yol açabilecek bir durumdur çünkü aşırı akımların ve gerilimlerin oluşmasına ve enerji akışının kesilmesine yol açarak sistemin güvenilirliğini ve kalitesini azaltır[7]. Bu nedenle sistem elemanları seçilirken birbirleriyle rezonans oluşturmamalarına dikkat edilmelidir.

3.4.1 Harmoniksiz Durumda Rezonans Oluşumu

Bir elektrik devresinde kaynağın verdiği gerilim ile devrenin çektiği akım aynı fazda ise yani devrede bobin ve kapasite varken bile devre omik yüklü ise bu devredeki bobin ve kapasite elemanları rezonans halindedir; Bu durumda bobinin direnci ile kapasitenin direnci birbirlerini sıfırlayarak devrede sadece omik direncin kalmasına sebep olur.

Elektrik devrelerinde seri ve paralel rezonans olmak üzere iki çeşit rezonans durumu görülür.

3.4.1.1 Seri Rezonans

Seri bağlı RLC elemanlarından oluşan devrede meydana gelen rezonansa seri rezonans denir. Böyle bir devrede endüktif reaktans ile kapasitif reaktans birbirine eşittir. Bu durumda devre empedansı düşük olacağından dolayı devreden yüksek miktarda rezonans akımı çekilecektir.

Normal çalışma durumunda seri RLC elemanlarından oluşan bir devrede empedans ifadesi

$$Z = R + j.(X_L - X_C) \quad (3.27)$$

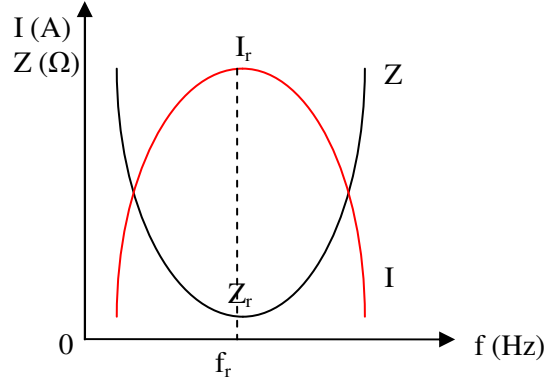
şeklinindedir. Seri rezonansın tanımına göre endüktif ve kapasitif dirençler birbirine eşitlenerek aşağıdaki şekilde f_r rezonans frekansı bulunabilir:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (3.28)$$

Bulunan bu rezonans frekansı hem seri rezonansa hem de paralel rezonansa geçerlidir. n. harmonik frekansında rezonans oluşması halinde $n = f_r / f$ olacağı için son eşitlik, harmonik derecesine göre aşağıdaki şekilde ifade edilebilir[7]:

$$n_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (3.29)$$

Rezonans durumunda $X_L = X_C$ olduğu için devre empedansı saf omik olur. Bu durumda empedans minimum olduğu için akım maksimum değer alır. Bu durum aşağıda Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

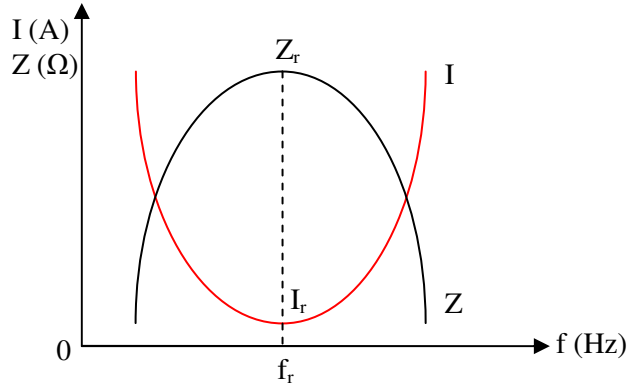


Şekil 3.7: Seri rezonansa akım ve empedansın frekansa göre değişimi

Seri rezonansa büyük değerler alan kondansatör ve endüktans gerilimleri birbirine eşit fakat ters yönlü olduklarından toplamları sıfır olur. Bu nedenle seri rezonansa gerilim rezonansı da denir[7].

3.4.1.2 Paralel Rezonans

Tıpkı seri rezonansa olduğu gibi paralel rezonansa da paralel bir RLC devresinde endüktif ve kapasitif reaktansların birbirine eşit olması sonucunda rezonans durumu oluşur. Ancak bu durumda devrenin admitansı küçük olduğundan küçük bir rezonans akımı büyük bir gerilimde meydana gelir (Şekil 3.8). Başka bir deyişle, rezonans durumunda empedans maksimum değer alır ve bu nedenle özellikle sistemde harmoniklerin mevcut olması halinde devreden küçük bir akım geçse bile devre elemanlarının uçlarında yüksek genlikli, tehlikeli rezonans gerilimleri oluşabilir.



Şekil 3.8: Paralel rezonansa akım ve empedansın frekansa göre değişimi

Paralel rezonansa endüktansın ve kondansatörün büyük değerlerde olan akımları birbirine eşit ve toplamları sıfırdır. Bu nedenle paralel rezonansa akım rezonansı da denir[7].

3.4.2 Harmonikli Durumda Rezonans Oluşumu

Genel olarak elektrik dağıtım sistemleri temel frekansta rezonansa girmeyecek şekilde yapılır. Ancak sistemde harmonikler varsa, bu durumda sistemin normal çalışması etkilenebilir. Temel frekans dışındaki harmonik frekanslarında da rezonans meydana gelebilir. Bu durumda sistemdeki endüktans ve kapasite değerlerine bağlı olarak sistem herhangi bir frekansta rezonansa girebilir.

Daha önce de ifade edildiği gibi, endüktif reaktans kapasitif reaktansa eşit olursa sistemde rezonans durumu oluşacaktır. Sistem rezonansı harmonik frekanslarından birine yakın bir değerde oluşursa, aşırı seviyede harmonikli akım ve gerilimler ortaya çıkar. Dağıtım sistemlerinde gerek reaktif güç kompanzasyonu gerekse gerilim düzenlenmesi amacıyla kullanılan kondansatörlerin, belli koşullarda sistemdeki harmoniklerin etkilerini artırma özellikleri vardır[7]. Aslında kondansatörün kendisi harmonik üretmez fakat rezonans frekansını düşürerek sistemin rezonansa girmesini kolaylaştırabilir.

Sistem kaynağının empedansı, sisteme bağlı olan yüklerin oluşturduğu paralel empedanslardan çok daha düşük olduğu için harmonik akımları, doğrusal olmayan yüklerden (harmonik kaynaklarından) çoğunlukla sistemin kaynağına doğru akar. Ancak harmonik akımları empedanslar oranında bölünecektir. Yüksek dereceli harmonikler, bu frekanslara karşı düşük empedans gösteren kondansatörlere doğru akacaktır[8].

Devre elemanlarının seri veya paralel bağı olmasına göre çeşitli şekillerde rezonans oluşabilir. Seri bağı RLC elemanlarından oluşan bir devreye V_n gibi harmonik içeren bir kaynaktan gerilim verildiğinde devreden harmonikli bir akım geçer. Burada n. harmonik için devre elemanlarının dirençleri şu şekilde gösterilebilir:

$$R_n = R \quad (3.30)$$

$$X_{Ln} = n.X_L \quad (3.31)$$

$$X_{Cn} = X_C / n \quad (3.32)$$

Seri RLC devresi için harmonikli durumda eşdeğer empedans aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Z_n = R_n + j.(X_{Ln} - X_{Cn}) = R + j(nX_L - X_C/n) \quad (3.33)$$

Yine aynı devrede rezonansın hangi harmonik frekansında oluşacağı Denklem 3.34 yardımıyla hesaplanabilir:

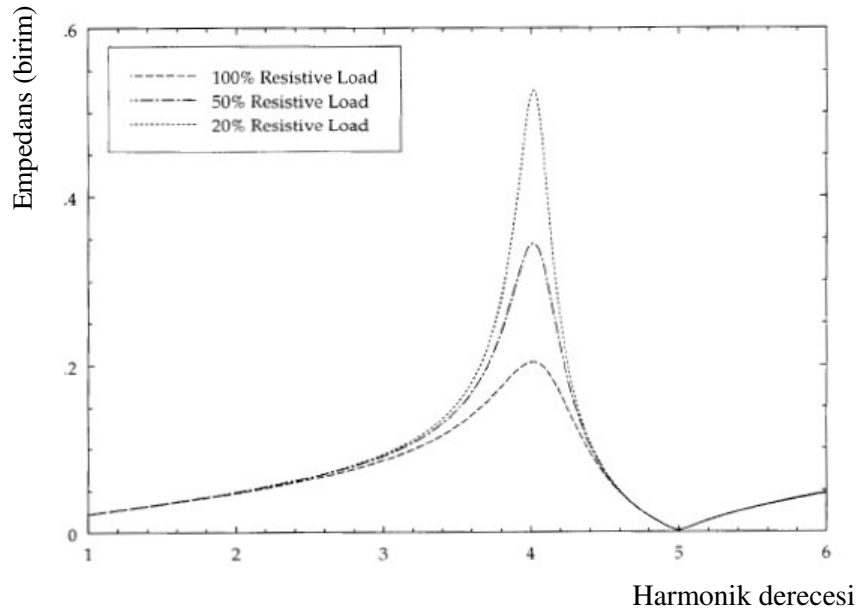
$$n_r = \frac{1}{\omega\sqrt{LC}} \quad (3.34)$$

X_r reaktansı, rezonansa giren endüktans ve kondansatöre ait reaktans olur. Seri rezonans devresinin empedansı $Z_r = R$ olup sadece dirençten oluşur. Ayrıca seri rezonans devresi belli frekanstaki bir harmoniğin filtrelenmesi için de kullanılabilir. Rezonans durumunda devreden geçen akımın yükselmesi sonucunda endüktans ve kapasite elemanlarının gerilimi yükselir ancak vektörel toplamları hala sıfırdır. Akımın yükselmesi sonucunda devredeki kondansatör aşırı yüklenir ve ısınarak yalıtımı zarar görür[7].

Elemanların paralel bağı olduğu bir devre ise, harmonikli bir gerilim kaynağından beslenirse, devreden çeşitli harmonikleri içeren bir akım geçer. Bu devrede pratik bakımdan en önemli büyüklük, kondansatörün üzerinden geçen akımdır. Çünkü harmonik frekansı yükseldikçe reaktansın azalması nedeniyle akım büyür ve kondansatör aşırı yüklenir. Kondansatörün harmonik bileşen akımı aşağıdaki Denklem 3.35 ile bulunabilir[7]:

$$I_{Cn} = jn \frac{V_{Cn}}{X_{C1}} \quad (3.35)$$

Yükün rezistif kısmı, rezonans durumunda çok önemlidir. Çünkü paralel rezonans harmonikler, daha düşük dirençli olduğu için rezistif yoldan akarlar. Bu nedenle paralel rezonans frekansının yakınlarında sistemde aşırı yüklenme durumu ortaya çıkar. Örneğin 4. harmonik yakınlarında oluşan bir paralel rezonans durumunda sistemin cevabı, yüklenme seviyesine göre aşağıdaki Şekil 3.9'da gösterilmiştir[8].



Şekil 3.9: Paralel rezonans durumunda rezistif yükün etkisi

Paralel rezonans olayı, doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik frekanslarından birinde, kondansatör grupları ile sistem endüktansı arasında oluşabilir. Bu olay, en sık görülen problemlerden biridir.

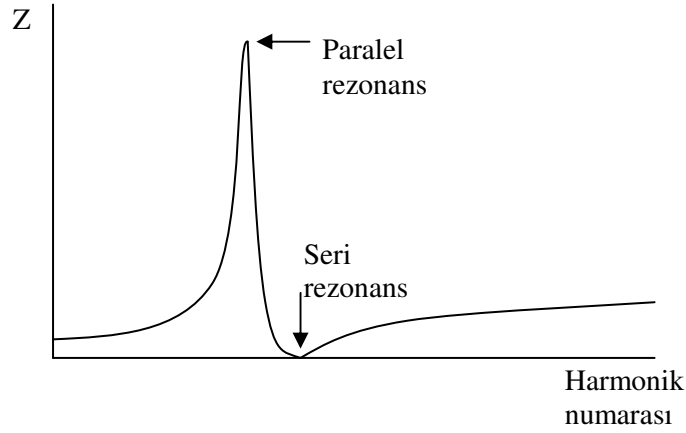
Dağıtım sistemlerinde harmonik rezonansı ile ilgilenen kişiler çoğu zaman gerçek endüktans ve kondansatör değerlerine ulaşamazlar; bunun yerine rezonans frekansını hesaplamak için 3.36 numaralı denklemde gösterildiği gibi mevcut sistem değerlerinden yararlanılır[15].

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_{SC}}} = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVA_{cap}}} \approx \sqrt{\frac{kVA_{tr} \cdot x100}{kVA_{cap} \cdot xZ_{tr} (\%)}} \quad (3.36)$$

Bu denklemde h_r , rezonans harmoniği; X_C , kondansatör reaktansı; X_{SC} , sistemin kısa devre reaktansı; MVA_{SC} , sistemin kısa devre gücü; MVA_{cap} ve kVA_{cap} ,

kondansatör bankının gücü; kVA_{tr} ve Z_{tr} , düşürücü transformatörün sırasıyla görünür gücü ve empedansdır.

Seri ve paralel rezonans durumlarında sistem cevabı genel olarak Şekil 3.10'da gösterildiği gibi olur.



Şekil 3.10: Seri ve paralel rezonanslarda sistem cevabı

3.4.3 Rezonansın Etkileri

Rezonans oluşumu, elektrik dağıtım sistemlerinde ciddi arıza ve hasarlar oluşturabilir. Harmonik rezonansının etkisi, sistemdeki yüklerin az olduğu zamanlarda daha fazladır[7]. Genel olarak rezonansa aşağıdaki istenmeyen durumlar meydana gelir:

- Endüktans ve kondansatörün gerilimleri yükselir, aşırı akım geçer.
- Devredeki elemanların yalıtımlarında zorlanmalar, özellikle kondansatörlerin yalıtkan malzemelerinde delinmeler ve aşırı ısınmadan ötürü kalıcı hasarlar oluşabilir ya da devre elemanlarının ömrü kısalmıştır.
- Harmonik gerilimleri yükselir. Harmonik bozunumunun artmasıyla tüketicideki gerilimin dalga şekli bozulur.

Dağıtım sistemlerinde rezistif yükler, harmonikleri azaltmaya önemli ölçüde katkı sağlayabilirler. Bu sayede çok ciddi sorunlara yol açabilecek rezonans durumları da önlenmiş olur. Buna karşın endüstriyel şebekelerde durum farklıdır; sistemin frekans cevabı büyük kondansatör bankları ve kısa devre endüktansı ile belirlenir. Harmonik kaynaklarının (doğrultucular, motor sürücüler, ark fırınları vb.) oranı, endüstriyel şebekelerde daha fazladır. Ayrıca rezonans frekansında harmonikleri bastırarak

rezistif yük sayısı da daha azdır. Bu nedenle sistemde aşırı miktarda harmonik bozunumu meydana gelebilir[8].

Seri rezonans, harmonik akımının devredeki düşük empedanslı hattı izlemesiyle, endüktans ve kondansatör arasında yüksek gerilim distorsiyonlarına sebep olabilir. Enerji sistemlerinde seri rezonans çok sık görülmez. Ancak oluştuğunda devre elemanları üzerinden büyük akımların akmasına neden olur. Ayrıca devre bağlantı iletkenlerinde özellikle kondansatör bağlantılarında aşırı ısınmalara ve kısa devrelere yol açabilir. Ayrıca kondansatörlerin zarar görme olasılıkları artar.

Paralel rezonans ise empedans çok büyük değerler aldığından dolayı harmonik akımları, gerilim harmoniklerine neden olur. Gerilim harmonikleri hem kondansatörde hem de sistem reaktansında yüksek harmonik akımları doğurur. Böylece paralel rezonans, doğrusal olmayan yükün oluşturduğu harmonik akımlarını büyütmüş olur. Ayrıca kondansatör uçlarındaki gerilim aşırı yükseldiği için kondansatör bundan zarar görebilir. Yüksek harmonik frekansları ile orantılı olarak şebeke reaktansı da büyüdüğünden büyük harmonikli gerilim düşümleri oluşur[7].

Dağıtım sistemine çeşitli yerlerden bağlanmış çok sayıda kondansatör, çeşitli rezonans frekanslarının doğmasına sebep olur. Bu kondansatörler devreye alındığında ise sistemin rezonans karakteristiğini belirlemek zorlaşır. Diğer yandan sistemde bir yerine çok sayıda rezonans frekansının olması, bunların büyüklüklerinin küçük olmasına yol açar. Bu nedenle kondansatörleri sistemin çeşitli noktalarına dağıtmak, rezonansdan dolayı oluşacak sorunları azaltacaktır[8].

3.4.4 Rezonansın Önlenmesi

Dağıtım sistemi yeni yapılan bir sistemse, henüz planlama aşamasında gerekli analizler yapılarak sistemde rezonans durumlarının oluşması önlenabilir.

Mevcut bir sistemde değişiklikler yapılması durumunda, harmonik rezonansının zararlı etkilerine karşı sistem harmonik filtrelerle korunmalıdır. Ayrıca sistemdeki doğrultucular yüksek darbeli seçilerek harmonik üretmeleri önlenabilir. Örneğin 6 yerine 12 veya daha yüksek darbeli doğrultucuların kullanılması ile oluşan harmoniklerin dereceleri yükselir ve genlikleri azalır. Ayrıca kompanzasyon tesislerinin bulunduğu yerlerdeki transformatörler üçgen sargılı seçilir. Bu sayede en büyük genliğe sahip olan 3 ve üçün katı harmonikler şebekeye geçemez[7].

Kompanzasyon tesislerinde aşırı kompanzasyondan kaçınılması gerekir. Bu durum, kompanzasyon sistemlerinin tekil (bireysel) hale getirilmesiyle veya benzer yükler için gruplaştırılmasıyla önlenabilir. Ayrıca kurulacak kompanzasyon tesisinin rezonans frekansı, sistemde bulunan harmonik frekanslarının değerinde olmamalıdır. Bunların dışında kondansatöre seri olarak bir bobin yerleştirilmesi de harmonik akımlarının etkisini azaltacaktır.

Sistemde harmonik üreten bir elemandan dolayı oluşan rezonans, her zaman endişe edilecek bir durum değildir. Sistemin empedansı sayesinde tehlikeli olabilecek gerilim ve akım artışları önlenir. Örneğin kondansatöre paralel yerleştirilen % 10'luk bir direnç ile önemli oranda fayda sağlanabilir. Benzer şekilde kondansatörle bir üst seviyedeki transformatör arasındaki kabloların uzunluğu fazla ise, yine rezonans bastırılabilir. Çünkü kablolar, devrenin direncine büyük katkı sağlarlar[15].

Elektrik dağıtım sistemlerinde kondansatörlerden kaynaklanan harmonik problemlerinin çok ender görülmesinin sebebi, kablo dirençlerinin katkısıdır. Bu, harmonik kaynaklı rezonans problemleri hiç olmayacak anlamına gelmez; bu problemler, ekipman üzerinde genellikle fiziksel bir hasara sebep olmayacak demektir. Ancak transformatör merkezlerine kurulan kondansatörler tehlikeli rezonanslara sebep olabilir çünkü transformatörler yüksek X/R oranına sahip olduklarından sistem empedansını bastırıp paralel rezonansa yol açabilirler[15].

3.5 Harmonik Filtreli Kompanzasyon Sistemleri

Harmonik bozunum değerleri yüksek olan sistemlerde kullanıcıların karşılaştıkları iki ana problem, reaktif güç kompanzasyonu yaparken kondansatörleri harmonik akımlarına karşı korumak ve gerilim bozunum değerlerini makul seviyelere çekmektir.

Günümüze kadar kullanılagelen ancak harmonik filtrelerin bir parçası olmayan şönt kondansatörler gibi pasif harmonik filtreler, bağlantı noktasından itibaren güç faktörünün düzeltilmesini sağlar; böylece temel frekanstaki görünür akımla birlikte kayıplar azaltılır ve dağıtım sistemine reaktif güç verilir. Ancak kondansatörler, istenmeyen rezonans durumlarına sebep olup harmonik akımlarını arttırabilirler. Aksine harmonik filtreler rezonans frekanslarını kontrol eder ve harmonik akımlarını sistemin dışında tutar. Böylece kayıplar azaltılarak gerilimde kalite sağlanır[9].

Aşağıdaki Şekil 3.11’de modüler yapıli bir harmonik filtreli kompanzasyon paneli ve bu panelde kullanılan filtre kaseti görülmektedir[14].



Şekil 3.11: Modüler yapıli harmonik filtreli kompanzasyon paneli

Harmoniklerden kaynaklanan enerji kalitesi problemlerini gidermek için harmonik filtreleri kullanılır. Harmonik filtrelerde amaç, harmonik akım ve gerilim bozunumlarını standartlarla belirlenen sınırlar içinde tutmaktır. IEEE 519-1992 numaralı standarda göre en büyük harmonik akım bozunum değerleri, temel frekanstaki akımın yüzdesi olarak aşağıdaki Tablo 3.3’te verildiği gibidir. Bu tablodaki harmonik akımı sınırları, yüke ve yükün beslendiği enerji sisteminin boyutuna göre verilmiştir. Tabloda ölçüt olarak belirtilen I_{sc}/I_L oranı, bağlantı noktasındaki kısa devre akımının bu noktadan çekilen en yüksek yük akımına oranıdır. Buna göre tüketicinin yükü azalırken sisteme akıtmasına izin verilen harmonik akımlarının sınır değerleri artar. Böylece aynı baradan beslenen diğer tüketicilerin ve şebekenin yüksek harmonik kirliliğe maruz kalması önlenir[8].

Tablo 3.3: Dağıtım sistemleri için harmonik akım bozunum sınırları

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TTD
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 ~ 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 ~ 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 ~ 1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Tablo 3.3'te belirtilen h , harmonik derecesi, TTD (toplam talep distorsiyonu) ise en yüksek yük akımının yüzdesi olarak verilen harmonik akım bozunumudur. Bu tabloda çift sayılı harmonikler verilmemiş olup bunlar, kendinden sonraki tek sayılı harmoniklerin % 25'i ile sınırlandırılmıştır[8].

3.6 Kompanzasyon Uygulamalarında Dikkat Edilmesi Gereken Konular

Sistemdeki harmonik değerleri, Tablo 3.3'te verilen sınırlar içinde olsa bile, bu durum, sistemde problemler çıkmasına tam olarak engel olamaz. Özellikle söz konusu sınır değerlere yaklaşılan durumlar tehlikelidir. Sistemin davranışını ve ekipmanın performansını belirlemek için düzenli aralıklarla ölçümler yapılmalı ve şu noktalara özellikle dikkat edilmelidir:

- Güç faktörünü düzeltmek için kullanılan kondansatörler veya harmonik filtreler aşırı harmoniğe maruz kalmamalıdır.
- Tehlikeli olabilecek seri veya paralel rezonans durumları oluşmamalıdır.
- Bağlantı noktasındaki harmonik seviyeleri aşılmamalıdır[8].

Harmonik filtrelerde bulunan kondansatörler, dağıtım sistemine reaktif güç verirler. Bu nedenle harmonikler filtrelenirken aynı zamanda reaktif güç kompanzasyonu da sağlanmış olur. Sistem maliyetlerini en uygun değerde tutabilmek için harmoniklerin miktarları ile ne kadar reaktif güce ihtiyaç duyulduğu ölçümlerle belirlenmelidir[9].

Harmonik filtrenin normal koşulları da kompanzasyon uygulamalarında önemlidir. Harmonik filtreler nadiren tam bir değere ayarlanır. Filtrenin performansı belirlenirken eleman değerlerine ait toleranslara, (kapasitans ve rezistans sıcaklıkla değiştiği için) ortam sıcaklığındaki değişimlere ve kondansatörlerde oluşabilecek hatalara dikkat edilmelidir[9].

Harmonik filtre uygulamalarında kondansatör üzerinde bir gerilim artışı meydana gelebilir. Bu durumda, örneğin, 400 Volt gerilimli şebekede uygulanacak filtreli kompanzasyon sistemlerinde kullanılan kondansatörlerin nominal gerilimlerinin 440 Volt seçilmesi gerekir. Kondansatörler etiketlerindeki gerilim değerinden daha düşük bir gerilimde kullanılırsa, kondansatörlerden elde edilecek reaktif güç, gerilimlerin karesi ile orantılı olarak azalır. Bu nedenle kondansatörün etiketindeki gerilim değeri arttıkça şebeke gerilimindeki etkin reaktif gücü düşmekte ve daha büyük güçte kompanzasyona ihtiyaç duymaktadır[14].

Öte yandan endüktans bobinleri seçilen frekans değerinde tasarlanırken iyi bir sonuç alabilmek için ayar frekansı, harmoniğin olduğu frekansa olabildiğince yakın seçilmelidir. Ayrıca her fazda endüktans değerindeki sapma % 3'ten büyük olmamalıdır. I_{max} değeri minimum $2xI_n$ olmalı ve bu değerde bile endüktans değerindeki sapma % 5'i geçmemelidir[14].

Kullanıcılar tarafından yapılacak her türlü kompanzasyon ve/veya reaktör uygulamaları dağıtım şirketinin onayı ile gerçekleştirilebilir. Dağıtım şirketi, bir kompanzasyon tesisini; kontrol ve anahtarlama donanımının kompanzasyon için uygun akım kapasitesine sahip olması ve dağıtım sisteminin ve diğer kullanıcıların işletme şartlarını olumsuz yönde etkilememesi için inceleyerek onaylar[11].

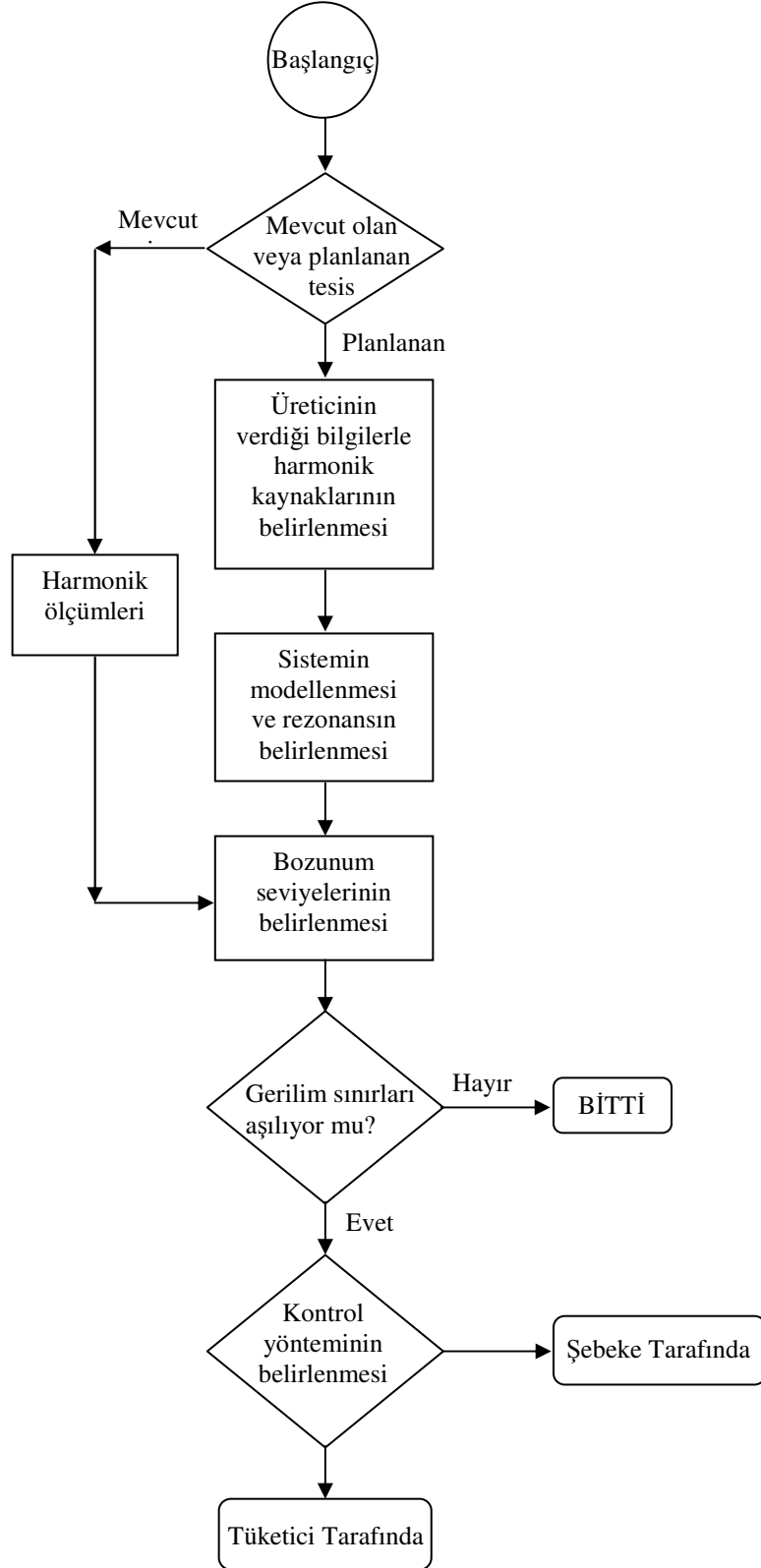
3.7 Harmonik Filtre Tasarım Prosedürü

Harmonik filtre tasarımı için enerji sistemi ile beraber filtrenin kullanılacağı ortam hakkında da bilgi toplamak gerekir. Bunun için sistemin nominal faz-faz gerilimi, temel frekans ve gerilimdeki izolasyon seviyeleri gibi sistem karakteristikleri ile ortam sıcaklığı, rüzgar yükü vb. gibi ortam bilgilerinin bilinmesi gerekir. Ayrıca tasarımı doğrudan etkilediği için filtrenin kurulacağı yer de (kapalı ortam veya açık hava) müşteri tarafından belirtilmelidir[9].

Harmonik filtre tasarımı, enerji sisteminin temel özelliklerinin yanında lokal harmonik üretimine ait bilgilerin de bilinmesini gerektirir. Bunlar; sistem konfigürasyonu, eleman empedansları, nominal ve maksimum gerilim, yükün gücü ile güç faktörü ve harmonik üretimidir. Sistemdeki yükler kurulu ise, harmonikleri belirlemek için ölçüm yapmak en doğru sonuçları sağlar; yükler kurulu değilse, üretici firma gerekli harmonik bilgilerini vermelidir[9].

Dağıtım sisteminin empedansı harmonik akımlarının geçmesi için en düşük empedans olduğu için harmonik akımları, genellikle harmoniğin meydana geldiği kaynaktan üretece doğru akma eğilimindedir. Ancak sistemde reaktif gücü kompanze etmek için kullanılan kondansatörler, harmonik akımlarını üzerlerine çeker. Bu sebeple kondansatörün bağlı olduğu hatta harmonik ölçümü yapmak, doğru sonuçlar vermeyecektir. Bunu önlemek için harmonik kaynaklarının yerlerini belirlerken yapılan ölçümlerin öncesinde bütün kondansatörler sistemden çıkarılmalıdır[15].

Şekil 3.12’de bir dağıtım sisteminde harmoniklerden dolayı meydana gelen gerilim bozunumu seviyesinin belirlenmesi için izlenecek yöntem gösterilmiştir. Bu yöntem hem planlama aşamasında hem de hâlihazırda çalışan tesisler için geçerlidir[15]. Aşağıdaki bölümlerde ise bir harmonik filtre tasarımı için yapılması gerekenler anlatılmaktadır[9].



Şekil 3.12: Harmonik Gerilim bozunumunu belirlemek için izlenecek yöntem

3.7.1 Filtrenin Reaktif Gücünün Belirlenmesi

Harmonik filtre, asıl görevi olan harmonikleri filtrelemenin yanında sisteme kompanzasyon için gereken ve ağır yüklerde gerilimin dengelenmesini sağlayan kapasitif reaktif gücü de verir. Bu nedenle öncelikle sistemin ihtiyaç duyduğu reaktif güç miktarı belirlenmelidir. Bu kapasitif reaktif güç, filtrenin efektif gücünün de bilinmesini sağlar. Harmonik filtreler, yapılarındaki kondansatörlerin gücü ile değerlendirilir.

3.7.2 Filtre Ayarının Seçilmesi

Sistemdeki akım ve gerilim harmonik bozunumlarının istenen değerlere çekilmesi için filtrenin harmonik frekansına göre ayarı yapılır. Bunu sağlamak için filtre, sistemde görülen büyük genlikli harmonik frekanslarından en düşük olanına ayarlanır.

Harmonik filtreler genellikle bir harmonik frekansına tam olarak ayarlanmaz; bunun yerine filtreyi, istenen frekansın % 3 ila % 15 altına ayarlamak daha avantajlıdır. Böylece paralel rezonans ihtimali de önlenmiş olur. Örneğin 5. harmonik filtreleri tam olarak 250 Hz'e değil genellikle 4,7. harmoniğe göre yani 235 Hz'e ayarlanır.

Filtrede bulunan kondansatörlerin reaktansı, filtrenin reaktif güç değeri ile belirlenir. Buna göre istenen frekansta kondansatörle seri rezonansa girecek endüktif reaktans değeri seçilir. Böylece istenen harmoniklerin süzülmesi için düşük empedanslı bir yol sağlanmış olur.

Harmonik mertebesi h olan frekansa ayarlanmış bir harmonik filtrenin kapasitif reaktansını belirlemek için aşağıdaki Denklem 3.37 kullanılabilir:

$$X_c = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) X_{eff} \quad (3.37)$$

Bu denklemde X_{eff} değeri Denklem 3.38 yardımıyla şöyle hesaplanır:

$$X_{eff} = \frac{kV_{ff}^2}{Q_{eff} (M \text{ var})} \quad (3.38)$$

Endüktif reaktansın bulunması ise Denklem 3.39 ile verilmiştir:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (3.39)$$

Son üç denklemden kullanılan X_{eff} , harmonik filtrenin efektif reaktansını; Q_{eff} , filtrenin efektif reaktif gücünü; V_{ff} , sistemin nominal faz-faz gerilimini; X_C ve X_L sırasıyla temel frekanstaki kondansatör ve reaktörün reaktanslarını; h ise harmonik sayısını ifade eder.

Filtrenin ayarı, anlatıldığı şekilde tam frekanstan biraz aşağıda olacak şekilde seçilirse, Denklem 3.39'da h ile gösterilen harmonik derecesi tam sayı değil ondalık sayı olur.

3.7.3 Filtrenin Optimizasyonu

Sistemdeki harmoniklerin analiz çalışmalarının yapılmasıyla standartlara göre ne kadar filtre kullanılacağı, filtrelerin ayarlanması ve kurulum yerlerinin seçimi tamamlanır. Bu çalışmalar sırasında dikkat edilmesi gereken faktörler şu şekilde özetlenebilir:

- anahtarlanacak harmonik filtre sayısı
- çok sayıda filtre kullanılıyorsa, bir filtrenin devreden çıkma durumu
- sistem geriliminin salınım aralığı
- yükün salınım aralığı
- sistem konfigürasyonu
- sistem frekansının değişmesi, ekipman değerlerinin sabit olmaması, aşırı sıcaklık değişimleri ile kapasitansın değişmesi ve kondansatör birimlerinin devreden çıkması nedeniyle filtre ayarının değişmesi
- göz önüne alınmayan harmonikler

Bu çalışmaların ardından sistemde hala aşırı harmonik gözleniyorsa, bunun sebebi eklenen filtrenin, düşük harmoniklerden birinde sistemle paralel rezonansa girmesi olabilir. Bu durumda filtrenin ayarının daha düşük bir harmonik frekansına çekilmesi genellikle yeterli olur.

Analiz çalışması ile filtrenin ayarlanacağı frekans değerleri, kapasitans, endüktans ve rezistans değerleri ile filtrenin ayarlanan frekanstaki güç değeri ve sürekli haldeki enerji harcama değerleri belirlenebilir.

3.7.4 Eleman Değerlerinin Belirlenmesi

Filtrenin optimizasyonu yapıldıktan sonra filtrede kullanılacak elemanların değerleri belirlenir. Öncelikle kapasitör değerleri, ardından reaktör, direnç ve kumanda elemanlarının değerleri belirlenir.

Kondansatörleri seçerken filtrenin üzerinden akan akım değeri, kondansatörün anma gücü ve geriliminde çalışma durumuna göre % 135'ten az olmalıdır. Ayrıca akım, filtreye bağlı sigortaların kaldırabileceği miktarda olmalıdır. Pratikte düşük değerli harmonikler söz konusu olduğunda akım, sınırlayıcı bir unsur değildir.

Son olarak filtrede kullanılan kondansatörlerin dielektrik ısınmaları göz önüne alınır. Dielektrik ısınma miktarı aşağıdaki Eşitsizlik 3.40 ile belirtilir:

$$\left| \sum_h (V_{(h)} I_{(h)}) \right| \leq |1,35 Q_{anma}| \quad (3.40)$$

Bu eşitsizlikte $V_{(h)}$, h. harmonikte filtrenin kondansatörü üzerinde oluşan gerilim düşümü; $I_{(h)}$, h. harmonikte kondansatörden akan akımı ve Q_{anma} ise kondansatör bankının anma gücünü ifade eder.

Harmonik filtrede kullanılan reaktörün yeri belirlenirken oluşabilecek ısınma problemleri de dikkate alınmalıdır. Bu durum özellikle metal muhafazalı filtrelerde önemlidir. Ayrıca geçici durumlar ve dinamik gerilim yükselmeleri de gerektiğinde hesaba katılmalıdır. Birden çok harmonik frekansının anahtarlama yapılıması, kondansatörlerde olduğu gibi reaktörlerde de baskı yaratır. Gerilim yükselmelerinin belirlenmesi için geçici durum analizlerinin yapılması gerekir. Bunlardan başka reaktör için kısa devre akımının da hesaplanması gerekir.

Harmonik filtrede kullanılan direnç, anahtar, kesici gibi elemanların da tasarımı ve belirlenmesi kondansatör ve reaktör için anlatılanlar ile hemen hemen aynıdır. Burada da yine en yüklü duruma göre ısınma problemleri, gerilimdeki dalgalanmalar, nominal akım ve kısa devre akımlarının incelenmesi gerekmektedir.

3.8 Bilgisayar Çalışması

Tez çalışmasında teorik olarak anlatılan konuların uygulaması, simülasyon yazılımında oluşturulan model üzerinde yapılmıştır. Bu model için İsdemir'de

kurulmakta olan sıcak haddehane örnek alınarak bu ünitenin elektrik dağıtım sistemindeki değerlerden yararlanılmıştır.

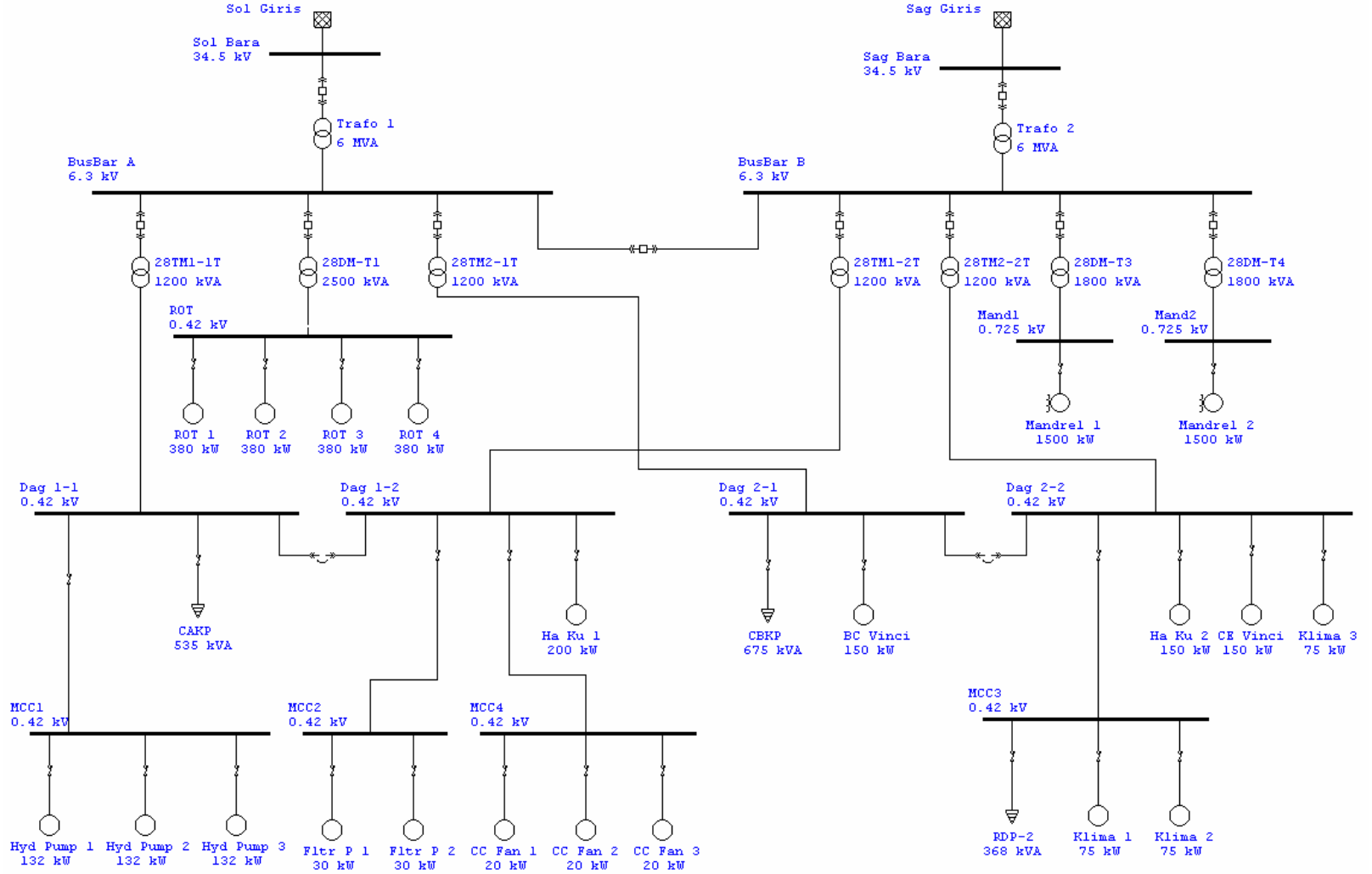
Şekil 3.13'te görüldüğü gibi örnek dağıtım sistemi iki ayrı girişten 34,5 kV gerilimle beslenmektedir. Giriş gerilimi iki adet 6 MVA'lık transformatör ile 6,3 kV'a düşürülmekte ve birbirine kuplaj kesicisi ile bağlı olan basbar A ve basbar B adlı iki barayı beslemektedir. Basbar A ve B'den dağıtım baralarına kesintisiz enerji akışı amacıyla çapraz besleme yapılmıştır.

Basbar A'dan iki ayrı transformatör ile birinci ve ikinci dağıtım baraları beslenmektedir. Ayrıca toplamda 1520 kW gücünde olan malzeme çıkış masası motorları da basbar A'dan beslenmektedir. Basbar B'den ise malzeme sarıcı kısmında bulunan 1500'er kW gücünde iki adet senkron motor beslenmektedir. Benzer şekilde basbar B'den de dağıtım baralarına besleme alınmıştır. Şekil 3.13'te sarı ile gösterilen dağıtım baralarında 420 V kademesinde gerilim vardır. Her bir dağıtım barası 1200 kVA'lık birer transformatör ile beslenmektedir.

Birinci dağıtım barasından 400 kW gücünde aydınlatma ve priz yükleri, 200 kW gücünde hava kurutucu ünitesi, 132'şer kW gücünde üç adet hidrolik pompa motoru, 30'ar kW gücünde iki adet filtre motoru ve 20'şer kW gücünde üç adet fan motoru beslenmektedir.

İkinci dağıtım barasından beslenen yükler 550 kW ve 300 kW gücünde iki farklı aydınlatma ve priz yükü, 150'şer kW gücünde iki adet tavan vinci, 150 kW hava kurutucu ünitesi ve 75'er kW gücünde üç adet klima şeklindedir.

Şekil 3.13'te verilen model sistem yük akışı ve harmonik analizleri yapılarak incelenecektir.



Şekil 3.13: Bilgisayar simülasyonu için oluşturulan örnek dağıtım sistemi

1. Durum: Sistemde Reaktif Güç Kompanzasyonu Yapılması

Model sistem üzerinde yük akışı analizi yapıldığında dağıtım baralarına aktarılan değerler aşağıdaki Tablo 3.4'te gösterilmiştir.

Tablo 3.4: Kondansatörsüz yük akışı değerleri

Bara	Yük Akışı					
	ID	ID	MW	Mvar	Amp	%PF
BusBar A		ROT	1.74	1.61	223	73.3
		Dag 1-1	0.60	0.37	66	85.0
		Dag 2-1	0.77	0.48	84	84.9
		Sol Bara	-3.75	-1.73	388	90.8
		BusBar B	0.64	-0.73	91	-66.0
BusBar B		Mand1	1.51	0.08	142	99.9
		Mand2	1.51	0.08	142	99.9
		Dag 1-2	0.60	0.37	66	85.0
		Dag 2-2	0.77	0.48	84	84.9
		Sag Bara	-3.75	-1.73	388	90.8
		BusBar A	-0.64	0.73	91	-66.0
Dag 1-1		BusBar A	-0.60	-0.35	998	86.4
		Dag 1-2	-0.23	-0.18	418	79.3
		MCC1	0.47	0.20	732	91.7
Dag 1-2		BusBar B	-0.60	-0.35	998	86.4
		Dag 1-1	0.23	0.18	418	79.3
		MCC2	0.08	0.04	124	88.2
		MCC4	0.08	0.04	124	88.9
Dag 2-1		BusBar A	-0.76	-0.44	1271	86.7
		Dag 2-2	0.10	0.02	153	99.0
Dag 2-2		BusBar B	-0.76	-0.44	1271	86.7
		Dag 2-1	-0.10	-0.02	153	99.0
		MCC3	0.45	0.27	764	85.6
Mand1		BusBar B	-1.50	0.00	1235	100.0
Mand2		BusBar B	-1.50	0.00	1235	100.0
MCC1		Dag 1-1	-0.47	-0.20	732	91.7
MCC2		Dag 1-2	-0.08	-0.04	124	88.2
MCC3		Dag 2-2	-0.45	-0.27	764	85.6
MCC4		Dag 1-2	-0.08	-0.04	124	88.9
ROT		BusBar A	-1.73	-1.48	3345	76.0
* Sag Bara		BusBar B	3.76	1.94	70	88.9
* Sol Bara		BusBar A	3.76	1.94	70	88.9

Kompanzasyon yapılmadan önceki duruma ait kayıp değerleri ise aşağıda Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5: Kompanzasyon öncesi kayıplar

CKT / Branch ID	From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop in Vmag
	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	Kvar	From	To	
28DM-T1	1.740	1.613	-1.727	-1.477	12.7	135.6	97.5	93.4	4.10
28TM1-1T	0.602	0.374	-0.598	-0.349	3.5	25.1	97.5	95.3	2.19
28TM2-1T	0.766	0.477	-0.760	-0.436	5.7	40.6	97.5	94.7	2.78
Trafo 1	-3.748	-1.733	3.764	1.942	16.2	208.7	97.5	100.0	2.51
28DM-T3	1.511	0.076	-1.500	0.000	10.7	76.2	97.5	96.7	0.81
28DM-T4	1.511	0.076	-1.500	0.000	10.7	76.2	97.5	96.7	0.81
28TM1-2T	0.602	0.374	-0.598	-0.349	3.5	25.1	97.5	95.3	2.19
28TM2-2T	0.766	0.477	-0.760	-0.436	5.7	40.6	97.5	94.7	2.78
Trafo 2	-3.748	-1.733	3.764	1.942	16.2	208.7	97.5	100.0	2.51
					85.1	836.6			

Sistemin her girişten 3764 kW ve 1942 kVAr değerlerinde güç çektiği görülmektedir. Reaktif gücün aktif güce oranı % 51 olduğu için mevcut reaktif güç değerinin azaltılması gerekmektedir. Bu amaçla dağıtım sistemindeki her baraya kondansatör bağlayarak güç katsayısını % 98'e yükseltmek için bireysel kompanzasyonu gerçekleyelim.

MCC4 barası için gereken kondansatör gücünü hesaplayalım. Denklem 2.15 kullanılarak kompanzasyon için gereken kondansatör gücü 24 kVAr olarak bulunur. Kapasite değeri ise 433,8 mikrofarad ve reaktansı 7,34 ohm olur. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, programda yüklerin çalışma koşulları değerlerinin göz önüne alınmasıdır. Bunun anlamı 20 kW değerindeki bir motorun çalışırken harcayacağı güç değeri yaklaşık 25 kW olur demektir. Bazı baralarda kondansatörün kendi kayıplarını karşılamak için de % 5 ila % 10 kadar daha fazla bir güç değeri seçilmesi uygun olmaktadır.

Buna göre ROT barasına 1260 kVAr, dağıtım barası 1'e 350 kVAr, dağıtım barası 2'ye 460 kVAr ve MCC baralarına sırasıyla 115 kVAr, 22 kVAr, 200 kVAr ve 26 kVAr güçlerinde kondansatörler bağlanması durumunda yeni yük akışı değerleri ile kayıplar aşağıda sırasıyla Tablo 3.6 ve 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.6: Kondansatörlü yük akışı değerleri

ID	kV	ID	MW	Mvar	Amp	% PF
BusBar A	6.300	ROT	1.734	0.344	163	98.08
		Dag 1-1	0.607	0.126	57	97.90
		Dag 2-1	0.789	0.169	74	97.79
		Sol Bara	-3.773	-0.541	353	98.99
		BusBar B	0.643	-0.098	60	-98.85
BusBar B	6.300	Mand1	1.510	0.074	140	99.88
		Mand2	1.510	0.074	140	99.88
		Dag 1-2	0.607	0.126	57	97.90
		Dag 2-2	0.789	0.169	74	97.79
		Sag Bara	-3.773	-0.541	353	98.99
		BusBar A	-0.643	0.098	60	-98.85
Dag 1-1	0.420	BusBar A	-0.604	-0.108	860	98.45
		Dag 1-2	-0.245	-0.326	572	60.16
		MCC1	0.465	0.093	665	98.07
Dag 1-2	0.420	BusBar B	-0.604	-0.108	860	98.45
		Dag 1-1	0.245	0.326	572	60.16
		MCC2	0.067	0.012	95	98.51
		MCC4	0.077	0.015	109	98.25
Dag 2-1	0.420	BusBar A	-0.785	-0.137	1121	98.50
		Dag 2-2	0.098	-0.306	452	-30.65
Dag 2-2	0.420	BusBar B	-0.785	-0.137	1121	98.50
		Dag 2-1	-0.098	0.306	452	-30.65
		MCC3	0.470	0.091	673	98.18
Mand1	0.725	BusBar B	-1.500	0.000	1217	100.00
Mand2	0.725	BusBar B	-1.500	0.000	1217	100.00
MCC1	0.420	Dag 1-1	-0.465	-0.093	665	98.07
MCC2	0.420	Dag 1-2	-0.067	-0.012	95	98.51
MCC3	0.420	Dag 2-2	-0.470	-0.091	673	98.18
MCC4	0.420	Dag 1-2	-0.077	-0.015	109	98.25
ROT	0.420	BusBar A	-1.727	-0.271	2456	98.79
* Sag Bara	34.500	BusBar B	3.787	0.714	64	98.27
* Sol Bara	34.500	BusBar A	3.787	0.714	64	98.27

Tablo 3.7: Kondansatörlü durumda sistemdeki kayıplar

CKT / Branch	From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop in Vmag
	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	Kvar	From	To	
28DM-T1	1.734	0.344	-1.727	-0.271	6.9	73.1	98.9	97.8	1.09
28TM1-1T	0.607	0.126	-0.604	-0.108	2.6	18.6	98.9	97.9	0.97
28TM2-1T	0.789	0.169	-0.785	-0.137	4.4	31.6	98.9	97.6	1.27
Trafo 1	-3.773	-0.541	3.787	0.714	13.4	172.7	98.9	100.0	1.08
28DM-T3	1.510	0.074	-1.500	0.000	10.4	73.9	98.9	98.1	0.80
28DM-T4	1.510	0.074	-1.500	0.000	10.4	73.9	98.9	98.1	0.80
28TM1-2T	0.607	0.126	-0.604	-0.108	2.6	18.6	98.9	97.9	0.97
28TM2-2T	0.789	0.169	-0.785	-0.137	4.4	31.6	98.9	97.6	1.27
Trafo 2	-3.773	-0.541	3.787	0.714	13.4	172.7	98.9	100.0	1.08
					68.7	666.8			

Analiz sonuçlarına göre kompanzasyon yapılarak sistemin çektiği reaktif gücün aktif güce oranı % 18'e düşürülmüştür ki bu değer tüketiciyi reaktif güç cezası ödemekten kurtaracaktır. Öte yandan kondansatörün gerilimi yükseltici özelliği sayesinde gerilim düşümü gözlenen baralarda gerilim artırılmıştır. Model sisteme göre örneğin basbar A'dan ROT barasına aktarılan akım 164 A'e düşmüş ve iletilen güç faktörü ise % 98'e çıkarılmıştır. Ayrıca ROT barasına aktarılan reaktif güç kaybı ilk durumda 135 kVAr iken 73 kVAr'a kadar azaltılmıştır. Benzer yorumların diğer baralar için de yapılması mümkündür.

Burada verilen kompanzasyon çalışması, bireysel kompanzasyona örnektir. Bunun yerine sistemin girişinde bulunan basbara merkezi kompanzasyon ünitesi bağlayarak da çözüm yoluna gidilebilir. Bu durumda sistemin güç katsayısını yine % 98 yapmak istersek, basbara reaktif güç ihtiyacı kadar yani 2350 kVAr gücünde bir kondansatör ünitesi bağlamamız gerekecektir. Bu durumda sistemin çektiği aktif ve reaktif güçler sırasıyla 3774 kW ve 759 kVAr olmaktadır. Buna göre reaktif gücün aktif güce oranı % 20,11 olduğu için reaktif güç cezası ödenir. Bunun yerine 2500 kVAr gücünde bir kondansatör ünitesi seçmek sorunu çözecektir. Buna göre yeni yük akışı değerleri Tablo 3.8'de gösterildiği gibi ve aynı durumda sistemdeki kayıplar ise Tablo 3.9 ile aşağıdaki gösterildiği gibi olur.

Tablo 3.8: Merkezi kompanzasyonda sistem değerleri

Bara		Yük Akışı				
ID	kV	ID	MW	Mvar	Amp	% PF
BusBar A	6.300	ROT	1.740	1.608	219	73.43
		Dag 1-1	0.603	0.374	65	84.97
		Dag 2-1	0.778	0.484	84	84.92
		Sol Bara	-3.761	-0.512	351	99.09
		BusBar B	0.641	-1.954	190	-31.15
BusBar B	6.300	Mand1	1.510	0.074	140	99.88
		Mand2	1.510	0.074	140	99.88
		Dag 1-2	0.603	0.374	65	84.97
		Dag 2-2	0.778	0.484	84	84.92
		Sag Bara	-3.761	-0.512	351	99.09
Dag 1-1	0.420	BusBar A	-0.641	1.954	190	-31.15
		BusBar A	-0.599	-0.350	985	86.37
		Dag 1-2	-0.241	-0.186	431	79.15
Dag 1-2	0.420	MCC1	0.465	0.203	721	91.66
		BusBar B	-0.599	-0.350	985	86.37
		Dag 1-1	0.241	0.186	431	79.15
Dag 2-1	0.420	MCC2	0.067	0.033	106	89.87
		MCC4	0.077	0.039	122	88.90
		BusBar A	-0.773	-0.443	1273	86.73
Dag 2-2	0.420	Dag 2-2	0.102	0.011	146	99.39
		BusBar B	-0.773	-0.443	1273	86.73
Mand1	0.725	Dag 2-1	-0.102	-0.011	146	99.39
		MCC3	0.461	0.275	767	85.84
Mand2	0.725	BusBar B	-1.500	0.000	1216	100.00
MCC1	0.420	BusBar B	-1.500	0.000	1216	100.00
MCC2	0.420	Dag 1-1	-0.465	-0.203	721	91.66
MCC3	0.420	Dag 1-2	-0.067	-0.033	106	89.87
MCC4	0.420	Dag 2-2	-0.461	-0.275	767	85.84
ROT	0.420	Dag 1-2	-0.077	-0.039	122	88.90
* Sag Bara	34.500	BusBar A	-1.727	-1.477	3291	76.00
* Sol Bara	34.500	BusBar B	3.775	0.683	64	98.40
		BusBar A	3.775	0.683	64	98.40

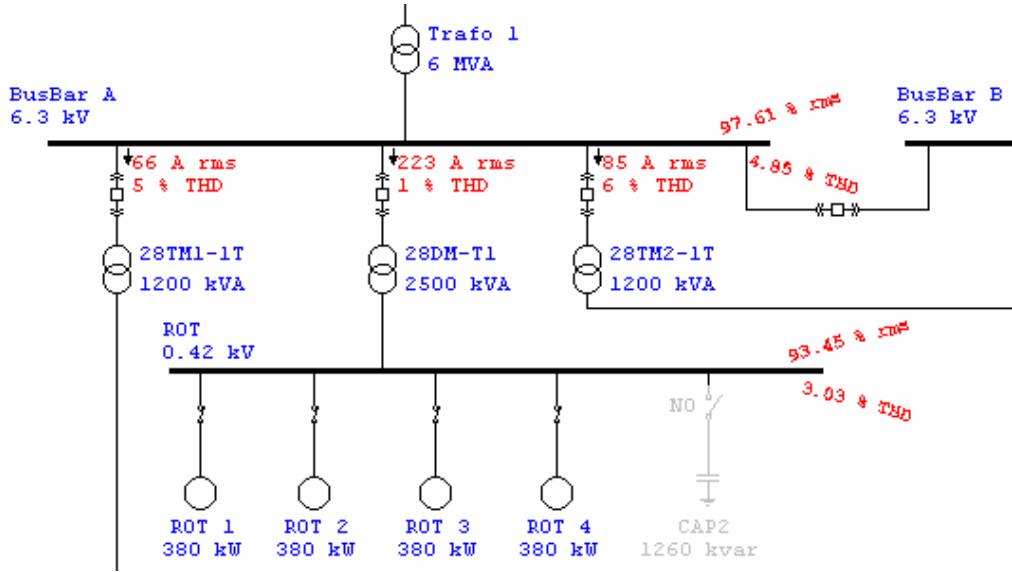
Tablo 3.9: Merkezi kompanzasyonda sistem kayıpları

CKT / Branch	From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop in Vmag
	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	Kvar	From	To	
28DM-T1	1.740	1.608	-1.727	-1.477	12.3	131.3	99.0	94.9	4.03
28TM1-1T	0.603	0.374	-0.599	-0.350	3.4	24.4	99.0	96.8	2.17
28TM2-1T	0.778	0.484	-0.773	-0.443	5.7	40.7	99.0	96.2	2.79
Trafo 1	-3.761	-0.512	3.775	0.683	13.3	171.2	99.0	100.0	1.04
28DM-T3	1.510	0.074	-1.500	0.000	10.4	73.9	99.0	98.2	0.80
28DM-T4	1.510	0.074	-1.500	0.000	10.4	73.9	99.0	98.2	0.80
28TM1-2T	0.603	0.374	-0.599	-0.350	3.4	24.4	99.0	96.8	2.17
28TM2-2T	0.778	0.484	-0.773	-0.443	5.7	40.7	99.0	96.2	2.79
Trafo 2	-3.761	-0.512	3.775	0.683	13.3	171.2	99.0	100.0	1.04
					78.1	751.5			

Merkezi kompanzasyon uygulanarak sistemden çekilen reaktif güç miktarı yaklaşık üçte bir oranında azaltılmıştır. Sistemin çektiği reaktif gücün aktif güce oranı ise % 18'dir. Reaktif kayıplar 751 kVAr olarak bulunmuştur. Ayrıca baralardaki gerilim düşümü değerleri de bireysel kompanzasyona göre daha fazladır.

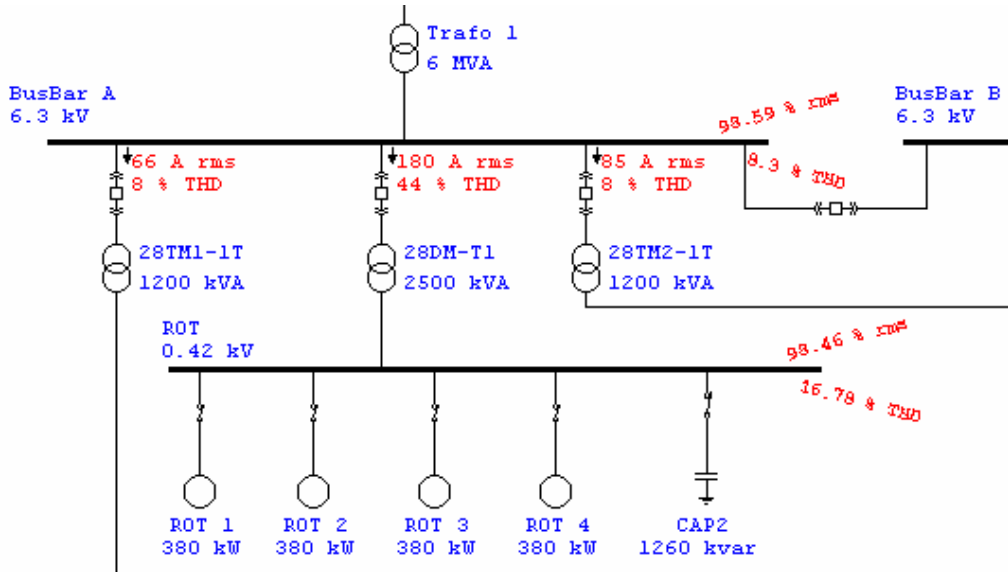
Buna göre bu örnekteki gibi çeşitli yüklerin bulunduğu bir tesiste bireysel kompanzasyon yapılmasının daha avantajlı olacağı açıktır. Elektrik dağıtım sisteminin çeşitli noktalarına kondansatörler bağlanarak sistemdeki her bir barada güç katsayısı artırılırken görünür güç ve akımla birlikte kayıplar da önemli miktarda azaltılabilir.

Reaktif güç kompanzasyonu amacıyla bir baraya kondansatör bağlanmasının, rezonans sebebiyle o baradaki ve barayı besleyen transformatördeki harmonik miktarlarını arttırabileceği söylenmişti. Bu durumu incelemek için ROT barasına bağlanan 1260 kVAr'lık kondansatörü ele alalım. Kondansatör bağlanmadan önce bu baradaki ve barayı besleyen 28DM-T1 transformatöründeki harmonik oranları aşağıdaki Şekil 3.14'te verildiği gibidir.



Şekil 3.14: ROT barasının kondansatör bağlanmadan önceki durumu

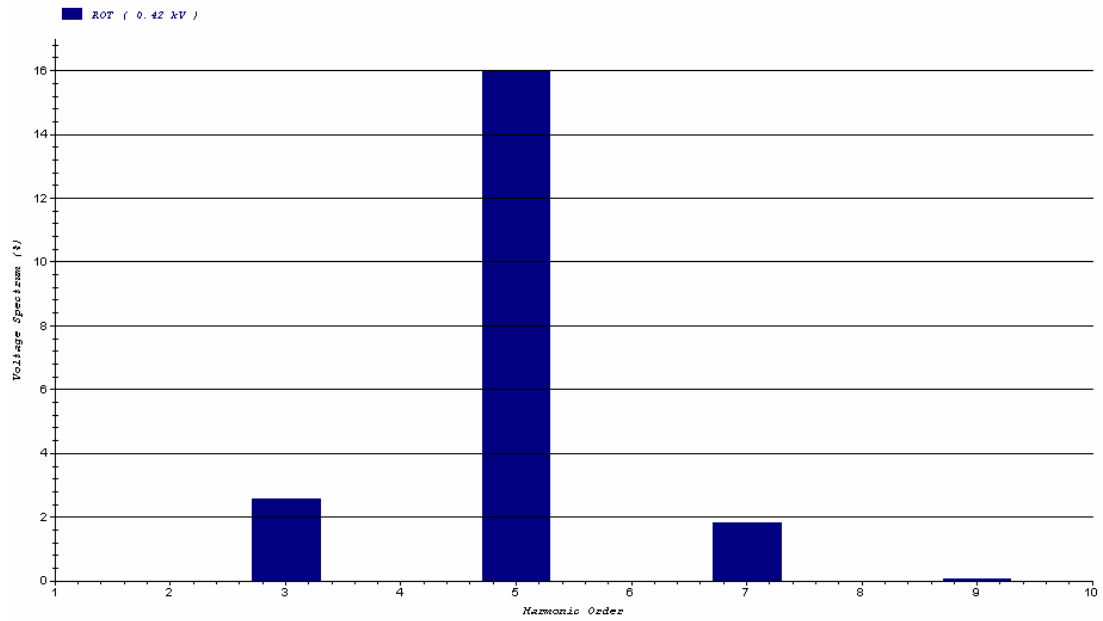
Bu baraya kompanzasyon amacıyla bağlanan kondansatörü devreye aldığımızda kondansatörün sistemle rezonansa girerek harmonikleri arttırıp arttırmadığını inceleyelim. Kondansatörün devreye alınması durumunda aynı baradaki harmonikler Şekil 3.15'te gösterildiği gibi olmaktadır.



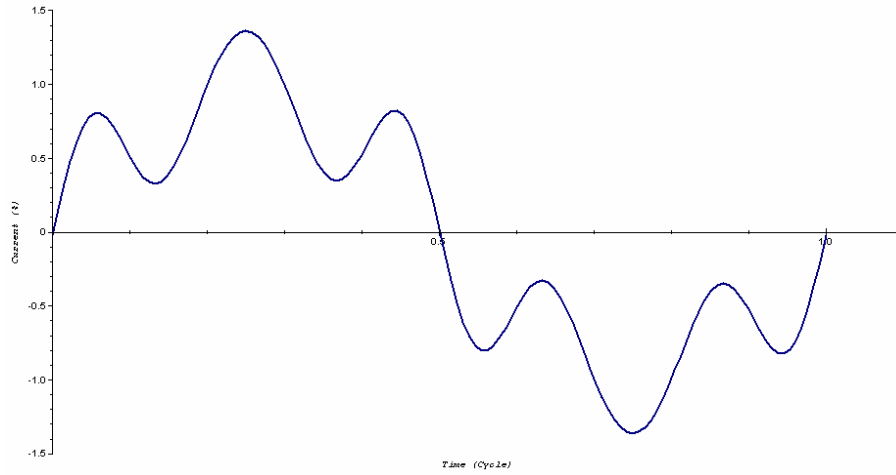
Şekil 3.15: ROT barasındaki kondansatörün devreye alınması durumu

Şekil 3.15'e göre bara gerilimindeki THD oranı % 16,78'e çıkmıştır. Barayı besleyen 28DM-T1 transformatöründeki harmonik akım değeri ise % 44 olmuştur. Buradan kondansatörün düşük değerli bir harmonik frekansında paralel rezonansa sebep olduğu söylenebilir. Bara gerilimindeki harmonik spektrumu ve transformatör akımının dalga şekli sırasıyla aşağıdaki Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

Buna göre kondansatör 5. harmonik yakınlarında rezonansa sebep olarak harmonik bozunumunu arttırmıştır.



Şekil 3.16: ROT barasındaki gerilim harmonikleri



Şekil 3.17: 28DM-T1 transformatöründeki akım

2. Durum: Harmoniklerin Filtrelenmesi

Model dağıtım sisteminde harmonik analizi yapmak için transformatörler ve aydınlatma yüklerinde bulunan floresan lambalar harmonik kaynağı olarak gösterilmiştir. Bunun sonucunda sistemde görülen harmonikler 3, 5, 7 ve 9'dur.

Harmonik filtreler devrede değilken sistemdeki harmonik değerleri Tablo 3.10'da gösterildiği gibidir.

Tablo 3.10: Dağıtım sistemindeki harmonikler

Bus		Voltage Distortion				Current Distortion					
ID	kV	Fund. %	RMS %	ASUM %	THD %	To Bus ID	Fund. Amp	RMS Amp	ASUM Amp	THD %	
#BusBar A	6.300	97.49	97.61	105.67	4.85	ROT	223.01	223.02	225.63	0.90	
						Dag1-1	66.65	66.73	70.54	4.96	
						Dag2-1	84.78	84.93	91.18	5.97	
						Sol Bara	388.22	388.40	404.09	3.08	
						BusBar B	91.32	114.43	168.81	75.50	
#BusBar B	6.300	97.49	97.61	105.67	4.85	Mand1	142.19	142.21	144.95	1.47	
						Mand2	142.19	142.25	147.59	2.81	
						Dag1-2	66.65	66.73	70.54	4.96	
						Dag2-2	84.78	84.93	91.18	5.97	
						Sag Bara	388.22	388.40	404.09	3.08	
Dag1-1	0.420	95.29	95.33	100.15	2.90	BusBar A	999.78	1001.01	1058.08	4.96	
						Dag1-2	417.83	449.99	594.67	39.98	
						MCC1	732.43	732.60	753.80	2.11	
						Dag1-2	BusBar B	999.78	1001.01	1058.08	4.96
							Dag1-1	417.83	449.99	594.67	39.98
Dag2-1	0.420	94.71	94.74	99.19	2.73	MCC2	124.87	124.88	127.48	1.51	
						MCC4	126.32	126.34	128.96	1.51	
						BusBar A	1271.65	1273.91	1367.68	5.97	
						Dag2-2	153.47	218.06	322.32	100.93	
						Dag2-2	0.420	94.71	94.74	99.19	2.73
Mand1	0.725	96.68	96.71	100.51	2.60	Dag2-1	153.47	218.06	322.32	100.93	
						MCC3	764.19	766.39	839.99	7.60	
						BusBar B	1235.59	1235.72	1259.57	1.47	
						BusBar B	1235.59	1236.08	1282.50	2.81	
						Dag1-1	732.43	732.60	753.80	2.11	
Mand2	0.725	96.68	96.71	101.43	2.81	Dag1-2	124.87	124.88	127.48	1.51	
MCC1	0.420	95.29	95.33	100.15	2.90	Dag2-2	764.19	766.39	839.99	7.60	
MCC2	0.420	95.29	95.33	100.15	2.90	Dag1-2	124.87	124.88	127.48	1.51	
MCC3	0.420	94.71	94.74	99.19	2.73	Dag1-2	126.32	126.34	128.96	1.51	
MCC4	0.420	95.29	95.33	100.15	2.90	BusBar A	3345.18	3345.32	3384.40	0.90	
ROT	0.420	93.39	93.44	98.29	3.03	BusBar B	70.89	70.93	73.79	3.08	
Sag Bara	34.500	100.00	100.02	102.62	1.90	BusBar A	70.89	70.93	73.79	3.08	
Sol Bara	34.500	100.00	100.02	102.62	1.90						

Baralardaki harmonik gerilim bozunumları ve transformatör akımlarındaki harmonik bozunumları aşağıda sırasıyla Tablo 3.11 ve Tablo 3.12’de gösterilmiştir.

Tablo 3.11: Baralardaki harmonik gerilim bozunumları

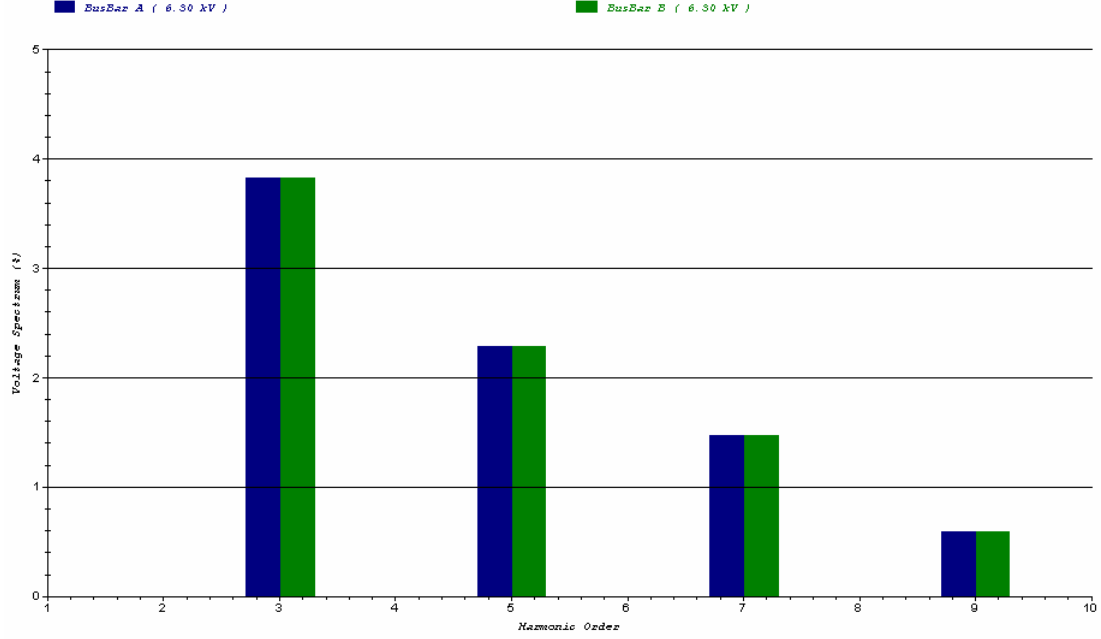
Bus		Harmonic Voltages (% of Fundamental Voltage)							
Fundamental									
ID	kV	2	3	4	5	6	7	8	9
BusBar A	6.142	0	3.92	0	2.34	0	1.51	0	0.61
BusBar B	6.142	0	3.92	0	2.34	0	1.51	0	0.61
Dag 1-1	0.400	0	1.20	0	1.95	0	1.76	0	0.19
Dag 1-2	0.400	0	1.20	0	1.95	0	1.76	0	0.19
Dag 2-1	0.398	0	1.20	0	1.25	0	2.10	0	0.19
Dag 2-2	0.398	0	1.20	0	1.25	0	2.10	0	0.19
Mand1	0.701	0	0.37	0	2.19	0	1.34	0	0.06
Mand2	0.701	0	1.53	0	2.09	0	1.06	0	0.24
MCC1	0.400	0	1.20	0	1.95	0	1.76	0	0.19
MCC2	0.400	0	1.20	0	1.95	0	1.76	0	0.19
MCC3	0.398	0	1.20	0	1.25	0	2.10	0	0.19
MCC4	0.400	0	1.20	0	1.95	0	1.76	0	0.19
ROT	0.392	0	1.27	0	2.33	0	1.45	0	0.20
Sag Bara	34.500	0	0	0	1.59	0	1.03	0	0
Sol Bara	34.500	0	0	0	1.59	0	1.03	0	0

Tablo 3.12: Transformatör akımlarındaki harmonik değerleri

Branch		% Harmonic Currents (% of Fundamental Current)							
Fundamental									
ID	A	2	3	4	5	6	7	8	9
28DM-T1	223.01	0	0	0	0.83	0	0.34	0	0
28DM-T3	142.19	0	0	0	1.35	0	0.59	0	0
28DM-T4	142.19	0	0	0	2.48	0	1.32	0	0
28TM1-1T	66.65	0	0	0	4.87	0	0.96	0	0
28TM1-2T	66.65	0	0	0	4.87	0	0.96	0	0
28TM2-1T	84.78	0	0	0	5.66	0	1.89	0	0
28TM2-2T	84.78	0	0	0	5.66	0	1.89	0	0
Trafo 1	70.89	0	0	0	2.80	0	1.29	0	0
Trafo 2	70.89	0	0	0	2.80	0	1.29	0	0

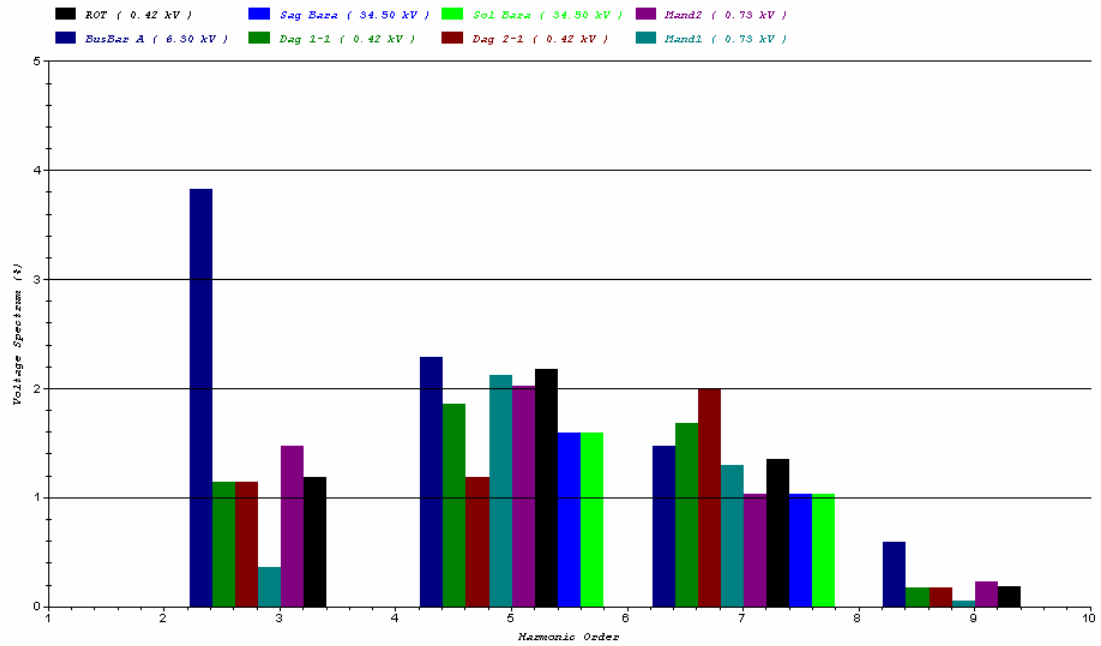
Buna göre THD ve IHD değerleri genel olarak IEEE 519 numaralı standartta belirtilen sınırlar içinde kalmaktadır. Bununla birlikte yalnızca basbar A ve B’de % 4’e yakın oranda 3. harmonik olduğu görülmüştür (Şekil 3.18). Aynı baralardaki

THD değeri ise % 4,85 olarak bulunmuştur. 1. dağıtım barasında % 2,9 oranında ve 2. dağıtım barasında % 2,73 oranında THD değerleri okunmuştur. Tablo 3.12'den görüldüğü gibi transformatör akımlarındaki en büyük THD oranları ise 28TM1-1T ve 28TM1-2T ile 28TM2-1T ve 28TM2-2T'de sırasıyla % 5 ve % 6 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.18: Basbar A ve B'ye ait harmonik spektrumu

Sistemdeki bütün baralara ait harmonik spektrumu Şekil 3.19'da verilmiştir.



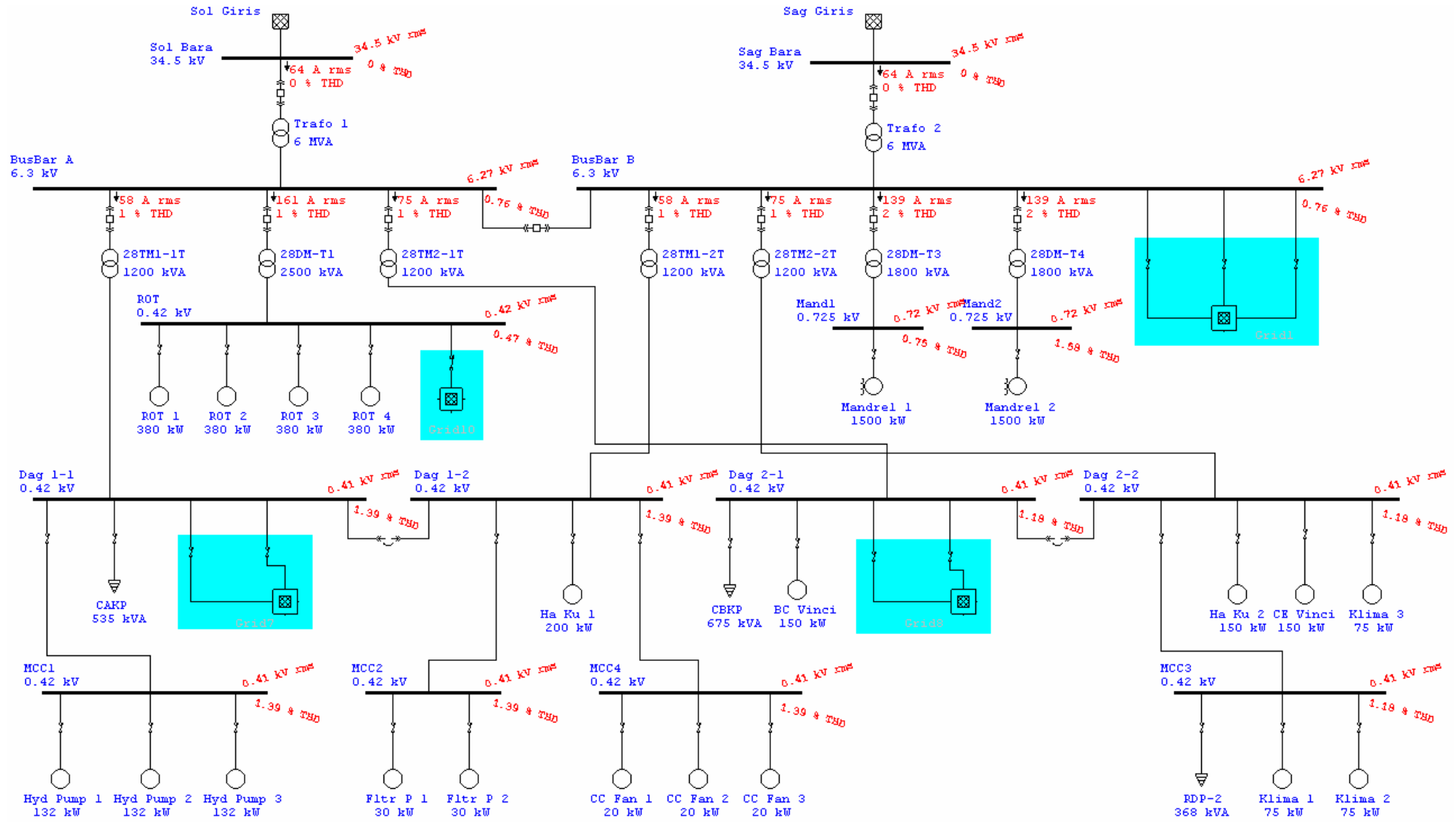
Şekil 3.19: Dağıtım sistemine ait harmonik spektrumu

Baralardaki ve transformatörlerdeki THD değerlerinin pek çok yerde sınır değerleri aşmamasına rağmen sistemde çeşitli noktalara pasif harmonik filtreler bağlanarak mevcut THD değerleri biraz daha azaltılabilir. Bu amaçla sistemde baskın olan 3., 5. ve 7. harmonikler için filtreler tasarlanmış ve bu filtreler basbara , ROT barasına ve dağıtım barası 1 ve 2'ye bağlanmıştır.

Filtre hesabı yapılırken öncelikle güç katsayısını 0,98'e yükseltmek için baraya bağlanması gereken kondansatör gücü belirlenmiştir. Bu değer ilk simülasyonda yapılan hesaplara aynıdır. Bunun ardından Denklem 3.39 kullanılarak filtre endüktansına ait reaktans değeri belirlenmiştir. Bu değer yardımıyla filtredeki endüktans değeri de $X_L = \omega L$ 'den L değeri çözülerek bulunabilir. Buna göre ROT barası için daha önce bulunan 1260 kVAr'lık kondansatöre reaktansı 0,0178 ohm olan bir reaktör bağlanarak barada gözlenen en düşük dereceli harmonik olan 3. harmonik için bir filtre tasarlanabilir.

Benzer şekilde 1. dağıtım barasına bağlanan 5. harmonik filtre değeri 250 kVAr ve $X_L = 0,028$ ohm olacak şekilde bulunmuştur. 7. harmonik filtre ise 250 kVAr ve 0,0143 ohm değerindedir. 2. dağıtım barasına bağlanan 5. ve 7. harmonik filtreler sırasıyla 320 kVAr ile 0,022 ohm ve 320 kVAr ile 0,0112 ohm şeklindedir. Basbara bağlanan 3. filtre 357 kVAr ve $X_L = 12,34$ ohm, 5. filtre 161 kVAr ve $X_L = 9,84$ ohm, 7. filtre ise 210 kVAr ve $X_L = 3,85$ ohm değerindedir.

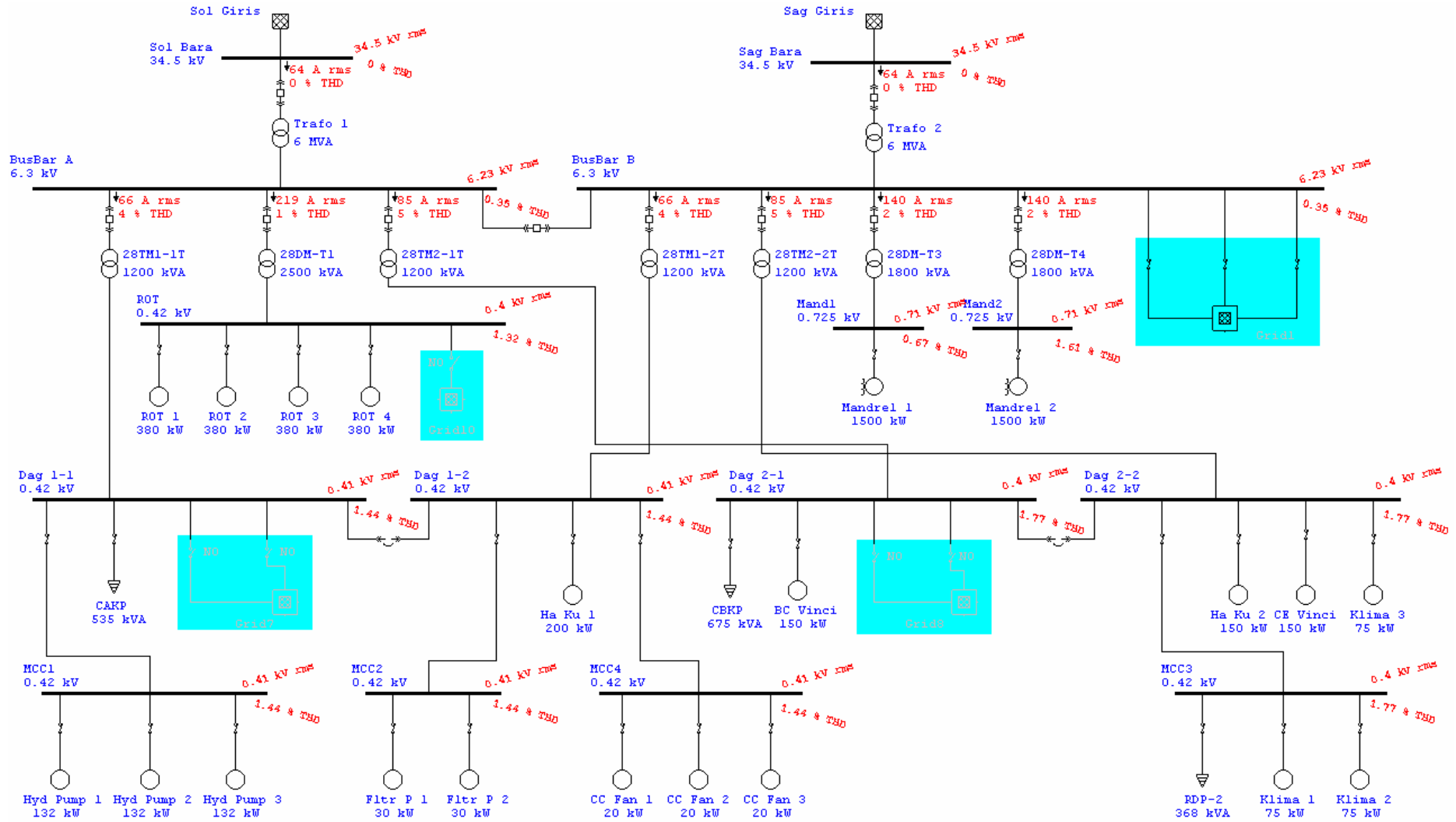
Filtreler devreye alındığında sistemdeki harmonik değerleri Şekil 3.20'de gösterildiği gibi olmaktadır.



Şekil 3.20: Filtreler devreye alındığında sistem değerleri

Şekil 3.20'ye göre şu yorumlarda bulunabiliriz: Filtreler devreye alınmadan önceki durumda basbardaki % 4,85 olan THD değeri % 0,76'ya düşürülmüştür. Bu baradaki 3. harmonik değeri de % 0,55'ye kadar gerilemiştir. 1. dağıtım barasında % 2,9 olan THD değeri 5. ve 7. filtreler yardımıyla % 1,39'a kadar düşmüştür. Filtre bağlamadan önce 28TM1-1T transformatörünün primerinden 67 A akım akmakta ve akımda % 5 THD olduğu görülmektedir. Filtreler devreye alınarak bu transformatörün primer akımı 58 A, THD değeri ise % 1'e çekilmiştir. Benzer şekilde % 6 THD olan 28TM2 transformatörlerinde filtre sonrası THD değeri % 1'e düşürülmüştür.

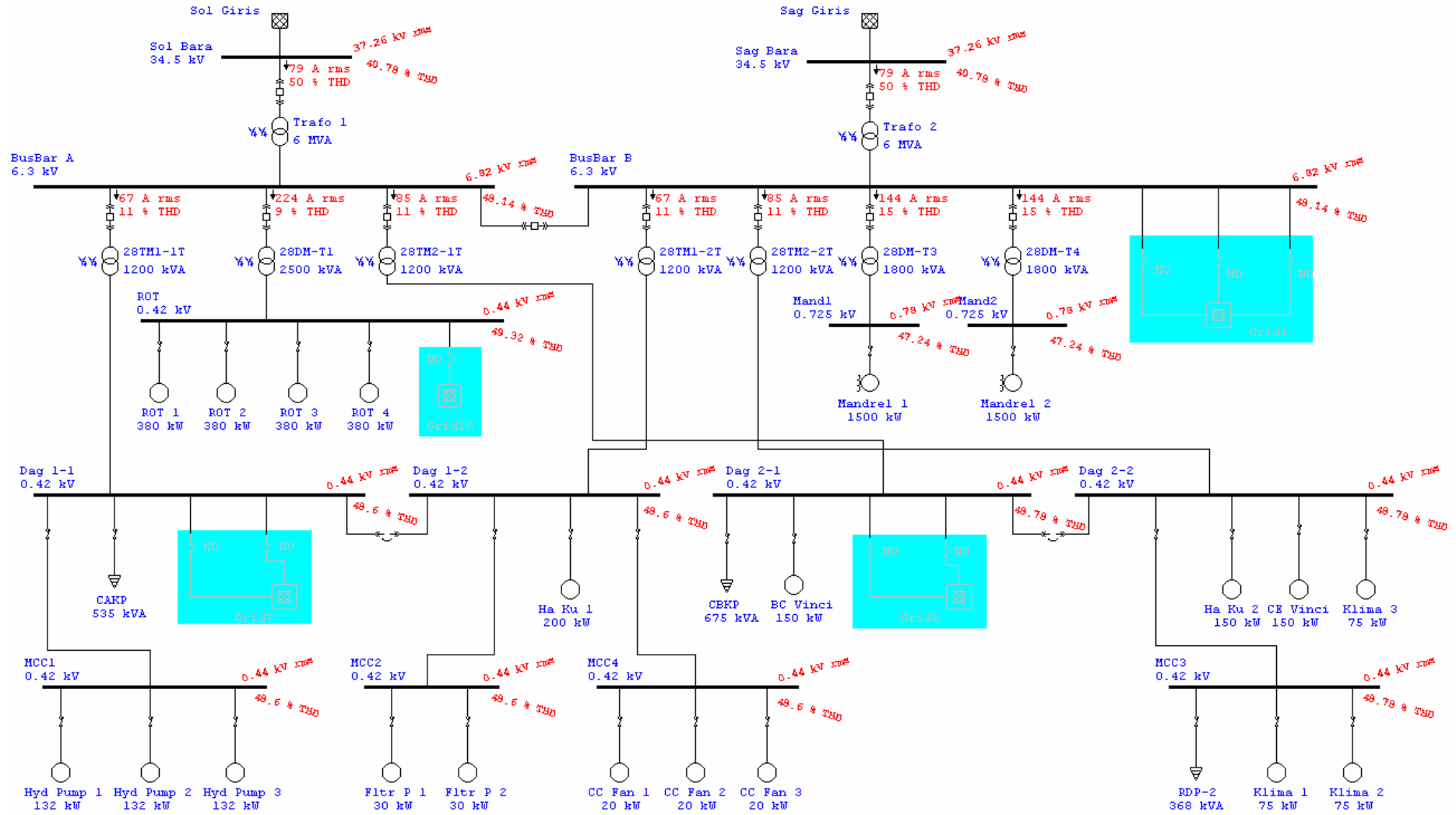
Burada yapıldığı gibi lokal filtreleme yerine sistemin girişindeki basbarda kurulacak harmonik filtreler yardımıyla merkezi filtreleme yapılması da mümkündür. Bu durumda basbar B'ye bağlanacak 3., 5. ve 7. harmonik filtrelerin her biri 783 kVAr ve X_L değerleri sırasıyla 5,63 ile 2,027 ve 1,034 ohm şeklindedir. Bu durumda sistemdeki harmonik değerleri aşağıdaki Şekil 3.21'de gösterildiği gibi olur.



Şekil 3.21: Merkezi filtreleme durumunda harmonikler

Şekil 3.21'e göre merkezi filtreleme yapılması halinde sistemdeki harmonik gerilimleri büyük oranda azaltılmakta ancak her harmonik akımı filtre üzerine çekilmektedir. Sistemde en altta yer alan baralardaki 3. harmonikler dışındaki harmonik akımları dağıtım sistemi üzerinden filtrelere kadar gittiği için transformatörlerde harmonik akımları görülmektedir. Pek çok SVC tesisinde yapılan da tam olarak budur. Maliyeti daha az olduğu için SVC tesisleri genellikle tesisin girişindeki baralarda kurulmaktadır. Ancak böyle bir durumda bütün tesiste üretilen harmonikler SVC üzerine çekildiği için kablolar ve dağıtım transformatörleri harmonik akımları ile yüklenmektedir.

Dağıtım sistemlerinde transformatör bağlantıları da harmoniklerin engellenmesi konusunda büyük rol oynar. Buraya kadar yapılan örneklerde sistemdeki transformatörler üçgen-yıldız topraklı şekilde bağlıydı. Bu nedenle dağıtım sistemlerinde en büyük genliğe sahip olan üçüncü harmonikler diğer baralara yayılmamıştır. Bunun sebebi üçüncü harmoniklerin üçgen sargının dışına çıkamamasıdır. Eğer transformatör sargıları üçgen yerine, örneğin, her iki tarafı da yıldız topraklı seçilseydi sistemde ciddi oranda harmonik bozunumları görülecekti (Şekil 3.22).



Şekil 3.22: Transformatörlerin yıldız topraklı bağlı olması durumu

Elektrik dağıtım sistemlerinde transformatör bağlantıları genellikle yüksek gerilim tarafı üçgen, alçak gerilim tarafı ise yıldız topraklı olacak şekilde yapılır. Bunun sebebi yük tarafında oluşan üçüncü harmoniklerin şebekeye geçmesinin engellenmesidir. Sekonder tarafta transformatörün nötr noktasında toplanan üçüncü harmonikler topraklama hattı üzerinden toprağa akar. Ayrıca bu bağlantı ile yükler için nötrlü dört iletkenli besleme yapılması da mümkündür.

Dağıtım transformatörü bağlantıları her zaman üçgen – yıldız topraklı şeklinde yapılmaz; bazı uygulamalarda değişik bağlantı şekilleri daha uygun olabilir. Bunun en iyi örneği ark fırınlarıdır. Ark fırınlarında arkın düzensizliğinden ötürü yüksek miktarda üçüncü harmonik meydana gelir. Bu harmoniğin üçgen sargı içinde kalması için ark fırını besleyen transformatörler genellikle üçgen – üçgen bağlanır. Böylece arktan dolayı oluşan üçüncü harmonikler şebekeye geçemez.

Üçüncü harmoniklerin şebekeye geçmesini önlemek için transformatörlerin üçgen – yıldız topraklı bağlanması şart değildir; örneğin yıldız – üçgen bağlantı şeklinde de üçüncü harmonik akımı sekonder üçgende çevrelenerek üçüncü harmonik gerilimi yok olur. Bu durumda primerin nötrü topraklanabilir. Bu tür bir bağlantı şekli genellikle büyük güçlü transformatörlerde yüksek gerilimin indirilmesinde kullanılır. Bu bağlantının dezavantajı ise sekonderden yardımcı bir eleman kullanmaksızın nötr hattı alınamamasıdır. Ayrıca tek fazdaki arıza bütün fazları devre dışı bırakır.

4. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONUNDA YENİ YÖNTEMLER

4.1 Giriş

Enerji iletiminin ilk yılları olan 19. yüzyılda reaktif güçteki dengesizliklerden dolayı iletilen gücün sınırlı olması ve gerilimde oluşan salınımlar gibi bir takım problemler görülmüyordu. Günümüzün küreselleşen dünyasında ise Elektrik iletim ve dağıtım sistemleri büyümüş ve çok daha karmaşık hale gelmiştir. Bu nedenle enerji kalitesindeki problemler, hem sistem hem de yükler üzerinde büyük tahribatlar yaratmaktadır[16].

Günümüzde enerji iletimi ve dağıtımında çoğunlukla reaktif enerjiden kaynaklanan problemleri yok etmek amacıyla statik var kompanzatörler gibi cihazlarla hızlı ve güvenilir güç elektroniği devreleri (tristör) içeren sistemler kullanılmaktadır. GTO, IGCT ve IECT gibi yarı iletken teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde son yıllarda enerji dağıtım sistemleri daha güvenli bir yapıya kavuşmuştur. Bu sayede statik var kompanzatör (SVC), tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC), tristör kontrollü faz açısı regülatörü (TCPAR), statik senkron seri kompanzatör (SSSC), statik senkron kompanzatör (STATCOM) ve dinamik gerilim yükseltici (DVR) gibi teknolojiler bugünkü yapılarına kavuşmuştur.

Yüksek gerilim güç elektroniği alanındaki gelişmelerle birlikte iletim hatlarında FACTS sistemleri denen enerji kalitesi düzenleyicileriyle beraber reaktif gücün ve harmoniklerin kontrolü için kullanılan teknikler de yıllar içinde ilerlemiş ve gelişmiştir. FACTS sistemleri, yalnızca reaktif güç ya da harmonik kompanzasyonu için değil aynı zamanda gerilim ve akımdaki salınımları gidermekte ve hata akımlarını sınırlamakta da kullanılmaktadır. Bundan ötürü artık tek bir amaca hitap eden kompanzasyon sistemleri yerine aynı anda birçok duruma hızlı bir şekilde cevap verebilen kontrol sistemlerinin kullanılması hem daha ekonomik hem de tesis ve işletme açısından çok daha güvenilir ve kolay olmaktadır.

Günümüzde modern kompanzasyon sistemlerinin pek çoğu tristör tabanlıdır. Bunların avantajı, hızlı değişen olaylara bir periyot gibi kısa bir sürede cevap

verebilmeleridir. Bu konuda ilk defa 1981 yılında deneysel amaçlı olarak 20 MVAR gücünde bir statik var kompanzatorde zorlanmış komütasyonlu tristör kullanılmıştır. Daha sonraları kapı sönümlü tristörlerin (GTO) yaygınlaşması ile kompanzasyon sistemlerinde kullanılan yarı iletken elemanların akım ve gerilim değerleri de artmıştır. Güç elektroniği alanındaki gelişmelerle birlikte tristörlerin çeşitleri ve güçleri de artmıştır. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) ve IECT (Integrated Enhanced Commutated Transistor) yarı iletken elemanları endüstriyel kontrol uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bunların cevap süresi kısa, anahtarlama kayıpları da son derece düşüktür. Ayrıca bu tipteki tristörleri kullanan konvertörlerin çıkışlarındaki güç katsayısı neredeyse bire eşittir ve gerilim kontrolü son derece etkin ve kolay bir şekilde yapılabilir. Bu nedenle yeni kurulan sistemler artık eski GTO tipindeki sistemlerin yerini almaktadır. Örneğin, Erdemir’de 10 MW’lık ezici motorların kontrolünde kullanılan konvertörler IECT tipindedir. Aynı motorların İsdemir’deki uygulamasında ise IGCT tip konvertör tercih edilmiştir. Her iki konvertörün de çıkışlarındaki güç katsayısı birdir ve dahili harmonik filtreler yardımıyla neredeyse kusursuz bir çıkış vermektedir. Erdemir’de enerji analizörü ile sürücü çıkışında yapılan ölçümlerde 5. ve 7. harmoniklerle birlikte çok kısa süreli ve değişken olarak 8. harmonik de görülmüştür. Ancak bu harmoniklerin miktarları yaklaşık olarak sırasıyla %1,5, %0,8 ve %0,2’dir. Buna göre sistemde oluşan harmoniklerin göz ardı edilmesi mümkündür[17].

Tezin bu bölümünde modern kompanzasyon sistemleri tanıtılmış, kontrol bölgeleri Tablo 4.1’de özetlenmiş ve başlıcaları konular halinde açıklanmıştır[18]. Bu kontrolörler sistemde farklı şekillerde kullanılır. Örneğin SVC ve STATCOM paralel bağlı olarak kullanılan kontrol sistemleridir. Bunlar hem geçici durumda hem de kararlı halde gerilim kontrolü sağlar, reaktif gücü kontrol edebilir, aktif güçteki salınımları azaltır ve sistem kararlılığını artırır. Seri kompanzatorler ise yükten kaynaklanan gerilim düşümlerini, sistem transfer empedansını ve iletim açısını azaltır, sistem kararlılığını artırır, yük akışını kontrol eder ve aktif güçteki salınımları bastırır[16].

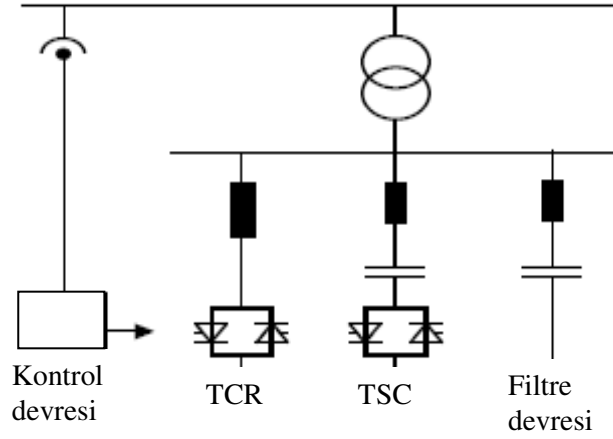
Tablo 4.1: Kompanzasyon sistemleri ve kontrol bölgeleri

Sistem	Kontrol Bölgesi
Statik var kompanzatör (SVC)	Gerilim kontrolü, reaktif güç kompanzasyonu, salınımların bastırılması, gerilim kararlılığı
Statik senkron kompanzatör (STATCOM)	Gerilim kontrolü, reaktif güç kompanzasyonu, salınımların bastırılması, gerilim kararlılığı
Statik senkron seri kompanzatör (SSSC)	Gerilim kontrolü, reaktif güç kompanzasyonu, hata akımının sınırlanması, salınımların bastırılması, gerilim kararlılığı
Tristör kontrollü seri kompanzatör (TCSC)	Akım kontrolü, hata akımının sınırlanması, salınımların bastırılması, gerilim kararlılığı
Tristör kontrollü seri reaktör (TCSR)	Akım kontrolü, hata akımının sınırlanması, salınımların bastırılması, gerilim kararlılığı
Birleştirilmiş güç akışı kontrolörü (UPFC)	Aktif ve reaktif güç akışı kontrolü, reaktif güç kompanzasyonu, salınımların bastırılması, hata akımının sınırlanması, gerilim kararlılığı, hat empedansı ve faz açısı kontrolü

4.2 Statik VAR Kompanzatör (SVC)

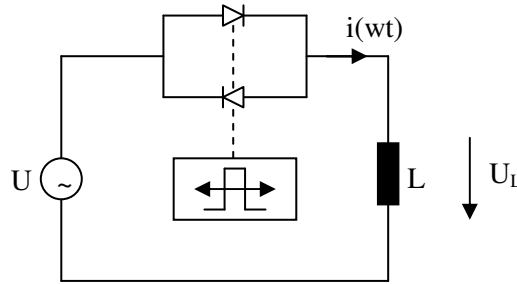
Statik VAR kompanzatörler, hem kararlı halde hem de dinamik durumda gerilim kontrolünü sağlamak için, yüklerin reaktif güç kontrolünde, aktif güçteki salınımları azaltmakta, sistem kararlılığını arttırmakta ve sistemdeki harmonikleri filtrelemekte kullanılabilir. Büyük ve ani değişen yükleri kompanze etmek, ancak statik reaktif kompanzatörler ile mümkündür. Bu cihazlarda hareketli kısım bulunmadığı için bunlara statik kompanzatörler adı verilir. Kompanzasyon işlevini gerçekleştiren kısımlar, cihazda bulunan alternatif akım kısıyıcıları, eviriciler ve doğrultuculardır[18].

Bir SVC, tristör kontrollü (TCR) ve tristör anahtarlama (TSC / TSR) kısımlardan oluşur; ayrıca bağlı olduğu sistemdeki harmonikleri yok etmek için harmonik filtre bölümü vardır (Şekil 4.1).



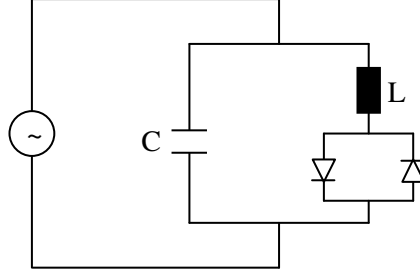
Şekil 4.1: Basit bir SVC'nin tek hat diyagramı

Statik kompanzasyon, 1960'ların sonlarında ark fırınları gibi düzensiz değişen büyük sanayi yüklerinde hızlı, devamlı veya kademeli gerilim kontrolü için geliştirilmiştir[18]. SVC'deki birbirine ters bağlı iki tristörden oluşan alternatif akım kıyıcısı, alternatif akım devrelerinde genel olarak bir anahtar görevi yapar. Tetikleme açısının uygun değerde seçilmesi ile çeşitli yüklerde yük akımının efektif değeri ayarlanabilir. Bu kıyıcıya seri olarak saf endüktif bir yük bağlanırsa, oluşan devreye tristör kontrollü reaktör (TCR) denir (Şekil 4.2)[19].



Şekil 4.2: Endüktif yüklü alternatif akım kıyıcısı (TCR)

Alternatif akım kıyıcısı ve seri bobinden oluşan tristör kontrollü reaktörde akım daima endüktif karakterlidir. Bu sisteme uygun boyutlarda paralel kapasite bağlanırsa, tetikleme açısına bağlı olarak, toplam sistem endüktif veya kapasitif karakterli yapılabilir (Şekil 4.3)[19].

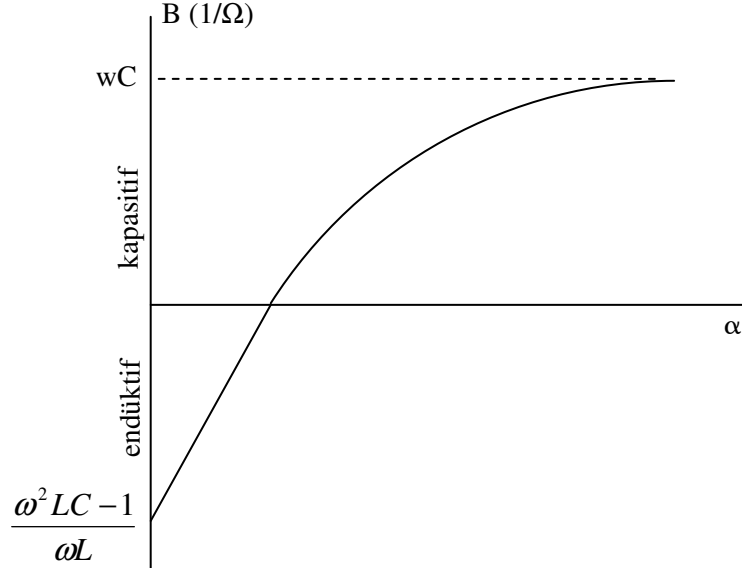


Şekil 4.3: Tristör kontrollü reaktör ve sabit kapasite

Buna göre devrenin toplam süseptansı şöyle verilir:

$$B_{(\alpha)} = \frac{\omega^2 LC - \pi + 2\alpha + \sin 2\alpha}{\omega L \pi} \quad (4.1)$$

Bu ifade kompanzatrörün kontrol karakteristiğini verdiğinden dolayı çok önemlidir. İstenen özellik, B süseptansının geniş bir aralıkta, hem endüktif hem de kapasitif bölgede değişmesini sağlamaktadır. Bunun için $\omega L < 1/\omega C$ veya $\omega^2 LC < 1$ koşulu Denklem 4.1'i sağlamalıdır. Aksi durumda, yani $\omega^2 LC = 1$ veya $\omega^2 LC > 1$ ise, kompanzatrör sadece kapasitif bölgede kalacak ve değişen bir kapasite gibi davranacaktır. Endüktif bölgede çalışmak için L endüktansının gücü C kapasitesinden büyük olmalıdır (Şekil 4.4)[19].



Şekil 4.4: B süseptansının endüktif ve kapasitif bölgede α 'ya göre değişimi

B süseptansı şekil 4.4'teki gibi değişirken devrenin tetikleme açısı α 'ya bağlı reaktif güç değişiminin bilinmesi yararlıdır. Buna göre reaktif güç aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Q_{(\alpha)} = -B_{(\alpha)}U_{\text{eff}}^2 \quad (4.2)$$

Bu ifade ile belirlenen ve şekil 4.4'te gösterilen karakteristik, reaktif güç referans alındığında kompanzatorün kontrolü için bir kontrol karakteristiği olarak kullanılabilir[19].

Şekil 4.5'te 500 kV'luk şebekede kullanılan 250 MVar'lık güce sahip bir SVC tesisi görülmektedir[16].



Şekil 4.5: 500 kV gerilimde ve 250 MVar gücünde bir SVC tesisi

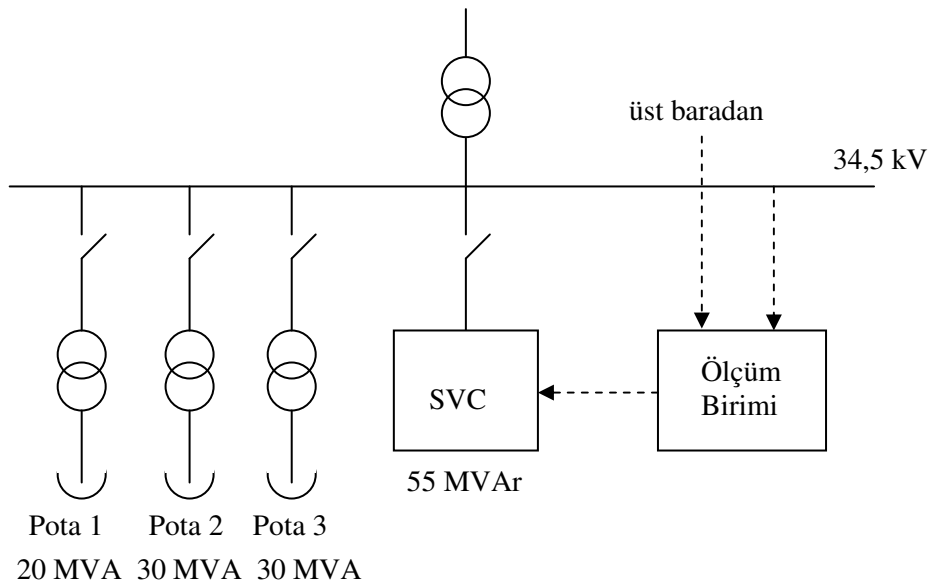
4.2.1 SVC Tesisinde İsdemir Örneği

İsdemir'deki SVC tesisi 2007 yılı başlarında fabrikanın çelikhane ünitesinde kullanılan eritme potalarındaki ısıtma dirençlerini beslemek için kurulmuştur (Şekil 4.6). 154/34,5 kV değerindeki şalt tesisinde kurulu olan SVC, toplam 55 MVar gücünde olup buradaki alçak gerilim barasından beslenen üç adet potanın hem güç faktörünü düzeltmekte hem de rezistanslardaki arttan dolayı oluşan harmonikleri filtrelemektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.6: İsdemir SVC tesisi

Şekil 4.7’deki bağlantı şemasından da görüldüğü gibi SVC sistemi 2., 3. ve 4. harmonikler için filtreler ve bir tristör kontrollü reaktörden (TKR) oluşmaktadır. 34,5 kV gerilimli baradan beslenen pota ısıtma dirençlerinin güç faktörü, yine aynı baraya bağlı olan SVC ile düzeltilmektedir (Şekil 4.8). SVC’nin ölçüm bilgileri, akım ve gerilim transformatörleri ile baradan alınmakta ve kompanzatörü kontrol eden sürücüye iletilmektedir.

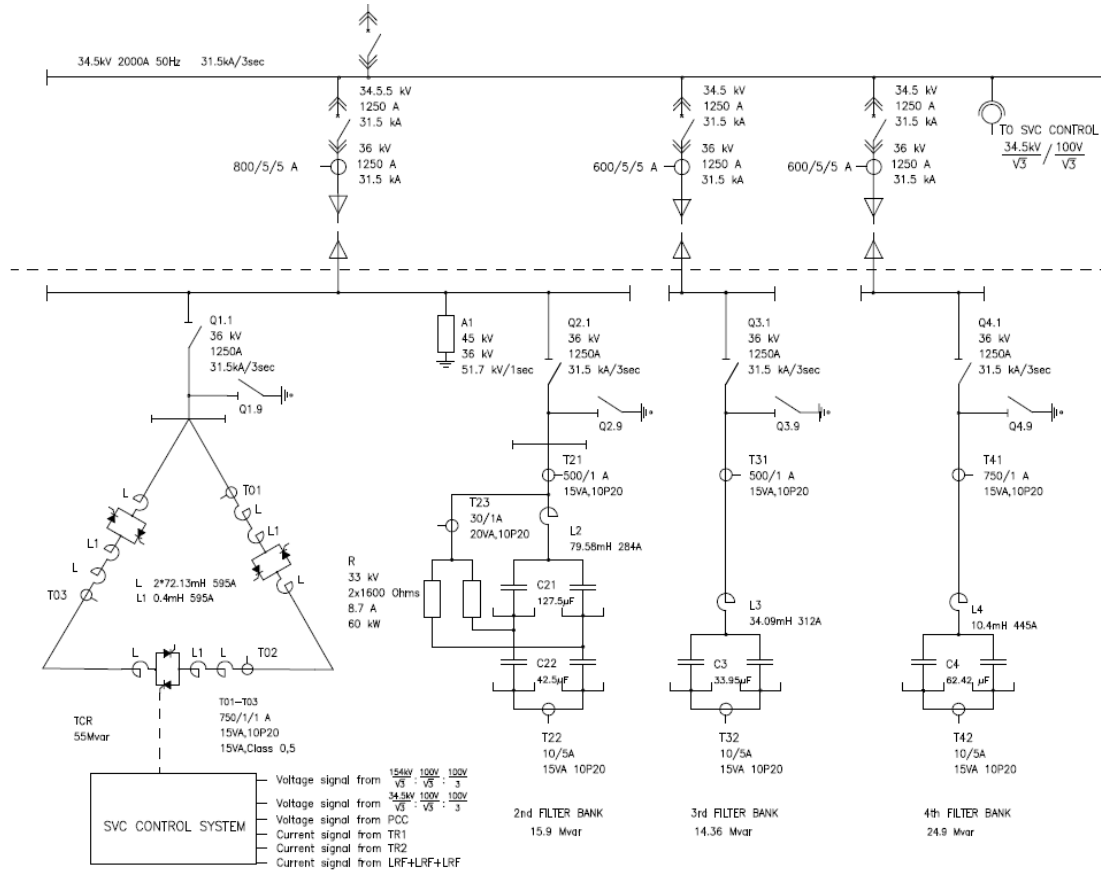


Şekil 4.7: İsdemir SVC tesisinin ve yüklerin bağlantısı



Şekil 4.8: Yükün çektiği akım ve güç faktörü

SVC'nin tek hat şeması Şekil 4.9'da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.9: SVC tesisi tek hat şeması

Normal çalışma durumunda yükler devrede değilken kompanzator enerjili ancak reaktif güç bakımından dengelidir. Yani TKR ünitesindeki reaktörler (Şekil 4.10 ve 4.11) ve harmonik filtrelerdeki kondansatörler (Şekil 4.12) birbirini dengeler. Pota ısıtma dirençleri devreye alındıkça sistemin güç faktörü düştüğü için SVC'deki reaktörlerden gerektiği kadarı devreden çıkarılarak kompanzatorün çalışma bölgesi kapasitif bölgeye yaklaştırılır. Böylece güç faktörünü yükseltmek için ihtiyaç duyulan kapasitif reaktif enerji sağlanmış olur.



Şekil 4.10: TKR ünitesi

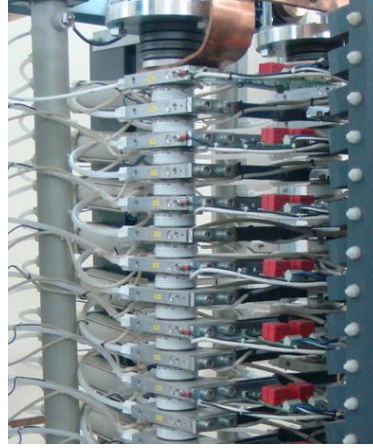


Şekil 4.11: TKR ünitesindeki reaktörler



Şekil 4.12: SVC içindeki harmonik filtre ünitesi

TKR ünitesindeki reaktörlerin devreye alınıp devreden çıkarılması, TKR kontrol ve kumanda odasında bulunan tristörler yardımıyla yapılmaktadır (Şekil 4.13 ve 4.14). Tristörler çalışırken yüksek ısı yaydığından dolayı soğutulmaları gerekir. Bunun için kumanda odasında tristörlerde kullanılan soğutma suyu ünitesi ve bir de klima bulunur.



Şekil 4.13: Reaktörleri kontrol eden tristörler



Şekil 4.14: Tristörler ve kontrol paneli

Pota ısıtma sisteminde yapılan harmonik ölçümlerine göre en yüksek genlikli 2., 3. ve 4. harmonikler bulunmuştur. Bu harmonikler SVC tesisindeki dahili pasif filtreler ile büyük oranda kontrol altına alınmıştır. Şekil 4.12’de görülen filtreler, yalnızca ayarlı oldukları harmoniklerde değil 11. harmoniğe kadar bir miktar filtreleme yapmaktadır. SVC tesisinin kontrol odasındaki panolarda her bir filtreye ait akımlar görülebilmektedir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15: Harmonik filtrelerin kontrol panosu

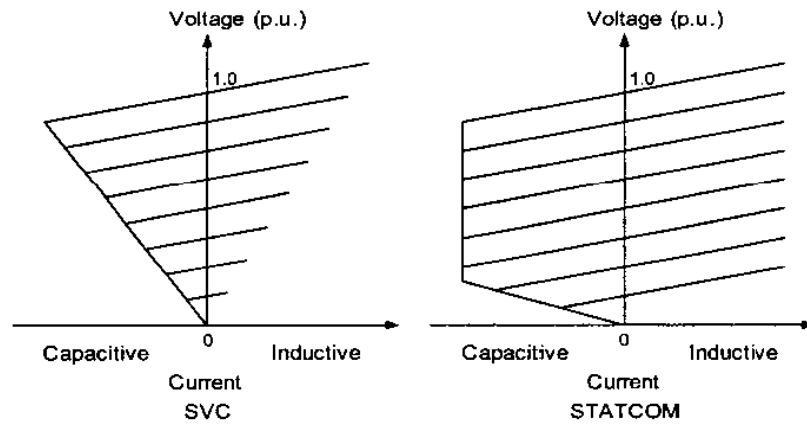
4.3 Statik Senkron Kompanzator (STATCOM)

Statik senkron kompanzator (STATCOM), dağıtım sistemlerinde kompanzasyon için kullanılan en modern yöntemlerden birisidir ve gelecekte de önemli rol oynayacağı düşünülmektedir[20]. STATCOM, sisteme kontrollü bir şekilde reaktif güç verebilen

ve gerilim kontrollü konvertör (VSC) temeline dayanan bir kompanzasyon cihazıdır. STATCOM, iletim sistemlerinde iletilen gücü arttırmak için bir gerilim düzenleyici olarak kullanılabilir. Düşük yüklerde gerilimin aşırı artışı önlediği gibi aşırı yüklerde de gerilim düşümünü önleyerek istenen sabit gerilimi elde edebilir.

Bir STATCOM basitçe bir transformatör, bir konvertör ve bir DC depolama kapasitöründen meydana gelir. Transformatör üzerinden bağlandığı sistemde kontrollü senkron gerilim kaynağı gibi davranır. DC kapasitör grubu sayesinde STATCOM, sisteme reaktif güç verebilir; böylece reaktif güç kontrolü de sağlanabilir. Kontrol edilen çıkış gerilimi, hat gerilimi ile aynı fazda tutulur ve sistemden kapasitif veya endüktif akım çekebilecek şekilde tasarlanır[18, 20].

STATCOM, sistemde oluşan değişimlere bir periyottan daha kısa bir sürede cevap verebilir. Bu yanı ile senkron kompanzasyondan üstündür. Ayrıca STATCOM sistem empedansını da fazla etkilemediği için SVC'ye göre tercih edilir. Geçici durumlarda salınımları önlemek için STATCOM, SVC'ye göre daha etkilidir çünkü düşük sistem geriliminde saf kapasitif akım verebilir. Araştırmalar göstermiştir ki 1,3 MVAR'lık SVC ile 1 MVAR'lık STATCOM, dinamik gerilim düzenlenmesinde benzer etkilere sahiptir. Ayrıca Şekil 4.16'daki akım – gerilim karakteristiğinden de görüldüğü gibi STATCOM'un çalışma aralığı SVC'ye göre daha geniştir[16, 20].

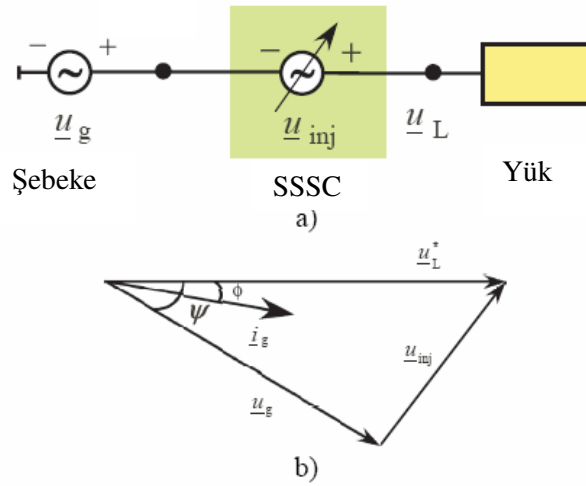


Şekil 4.16: SVC ve STATCOM çalışma bölgeleri

Aktif filtreleme, reaktif güç depolanması ve flicker düzeltme gibi yetenekleri olan STATCOM'un kullanımı, tüketiciler ve dağıtım şirketleri için oldukça caziptir. Kurulumu ve kullanılması basittir, ayrıca doğrudan şebekeye bağlanır. STATCOM, güç faktörünün düzeltilmesi ve gerçek zamanlı gerilim desteğiyle hatların limitlerini %50'den fazla arttırır.

4.4 Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC)

SSSC, istenen frekans ve genlikte gerilim üretebilen ideal bir senkron gerilim kaynağı olarak tanımlanabilir. Hassas yükler, gerilimdeki çökme veya dalgalanmalara karşı SSSC ile güvenli bir şekilde korunabilir. Bu kompanzatör orta gerilim dağıtım sistemine seri bağlıdır ve bu şekilde dinamik olarak sisteme enjeksiyon gerilimi ekler (Şekil 4.17)[21]. Burada u_g şebeke gerilimi, u_{inj} kompanzatörün sisteme verdiği gerilim ve u_L ise yük gerilimidir. Hatta verilen gerilim kapasitif veya endüktif reaktans oluşturmakta, böylece hattın toplam reaktansı değişmektedir. Bunun sonucunda hattın üzerinden iletilen güç kontrol edilmektedir.



Şekil 4.17: Statik senkron seri kompanzatörün çalışma diyagramı: a) şebeke, SSSC ve yük seri bağlı, b) sisteme gerilim verilmesine dair fazör diyagramı

Şekil 4.17'den $u_L = u_g + u_{inj}$ olduğu açıkça görülmektedir. Eğer şebeke gerilimi, gerilim dalgalanmasından ötürü düşer veya yükselirse, kompanzatörün sisteme verdiği gerilim de değişmelidir. Böylece yükün üzerindeki gerilim, hiç arıza durumu oluşmamış gibi istenen düzeyde tutulabilir.

Şekil 4.17'de ideal bir gerilim kaynağı gibi gösterilmesine karşın aslında statik senkron seri kompanzatör, çok sayıda elemanın bir araya gelmesiyle oluşur. Bu elemanlar; VSC, modülasyon birimi, kontrol birimi, çıkış filtresi, enjeksiyon transformatörü ve enerji depolama birimidir. Sistemde meydana gelen bozucu etkinin belirlenmesi için gerilim ve akım değerleri ölçülüp kontrol birimine iletilir ve burada referans değerlerle karşılaştırılır. Şebeke gerilimi önceden belirlenen aralığın

dışındaysa arıza tanımlama birimi kompanzasyonu başlatır. Ardından kontrol birimi gerilim referanslarını üretir. Gerilim referansları, modülasyon biriminde VSC'nin girişlerine verilen sinyallerin üretilmesi için kullanılır. Enerji depolama birimi, gerilimde meydana gelen dalgalanmayı kompanze etmek için gereken enerjiyi sağlar. Ayrıca SSSC'nin sisteme verdiği aktif ve reaktif enerji ayrı ayrı kontrol edilebilir. Böylece sistemle kompanzator arasında optimum güç akışı sağlanır[21].

Transformator iletim hattına seri bağlıdır; reaktif güç çekmek ya da almak suretiyle hattın kontrolünü üstlenir. Bununla birlikte kompanzatorun yapısında kapasitor yerine bir enerji depolama sistemi kullanılırsa, reaktif güçten bağımsız olarak aktif güç üretimi veya tüketimi de yapabilmektedir. Bundan dolayı senkron kompanzator olarak anılır.

Statik senkron seri kompanzator ile gerilimdeki dalgalanmalar %80'e kadar yok edilebilir. Bu sonuç, özellikle büyük kapasiteli üretim yapan tüketiciler için son derece önemlidir. Çünkü bu tipteki tüketicilerin dalgalanmalardan gördüğü zararın maliyeti, bir SSSC sisteminin maliyetinden çok daha fazladır. Bununla beraber SSSC orta gerilimde çok uygun bir enerji kalitesi kontrol cihazı olarak kullanılabilirse de alçak gerilimde kullanmak için pek uygun değildir. Bunun yerine kesintisiz güç kaynağı kullanmak, alçak gerilim sistemi için daha ekonomik bir çözüm olmaktadır[21].

4.5 Aktif Filtre

Genel olarak pasif LC filtreler sistemdeki harmonikleri yok etmek ve yükün güç faktörünü iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte uygulamada pasif filtrelerin, seri ve paralel rezonans olasılığı gibi bir takım dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca pasif filtreler çoğunlukla tek bir harmonik frekansına ayarlanabilir; bu nedenle genişlemeye elverişli değildir. Elektrik şebekesinde harmonik kirliliğin artması, araştırmacıları enerji kalitesi problemlerine esnek ve dinamik çözümler üretmeye yöneltmiştir. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için aktif filtreler geliştirilmiştir.

Aktif filtreler pasif filtre sistemlerinden daha yeni bir teknoloji olup karmaşık güç elektroniği elemanları içerirler. Bu nedenle pasif filtrelerden çok daha pahalıdır. Ancak en önemli avantajları, sistemle rezonansa girmemeleridir. Aktif filtreler,

sistemin empedans karakteristiğinden bağımsız olarak çalışabilirler. Bu sayede pasif filtrelerin paralel rezonans sebebiyle çalışmadıkları koşullarda aktif filtreler güvenle kullanılabilir[15].

Aktif filtreler, gerek düşük ayarlı gerekse ayarlı pasif filtrelerden tamamen farklı yapıda ve mantıkta çalışmaktadırlar; bunlar herhangi bir harmonik frekansına ayarlı olmayıp sistemde bulunan bütün yüksek frekanslı akım bileşenlerine (filtrenin yapısına ve çalışma mantığına göre genellikle 1-50 arası harmoniklere) karşı filtreleme yapar[14]. Şebekede aktif filtreler harmonik filtreleme, reaktif güç kompanzasyonu ve nötr akım kompanzasyonu için kullanılmaktadır. Ayrıca üç fazlı sistemlerde gerilim harmoniklerini yok etmek (teorik olarak akım harmoniklerinin yok edilmesi ile gerilim harmoniklerinin de ortadan kalkması şeklinde), uç gerilimini düzenlemek ve gerilimi dengelemek amacıyla da aktif filtreler kullanılmaktadır. Özellikle 1980'lerin başından itibaren değişik yapıların, kontrol stratejilerinin ve katı hal elemanlarının gelişimi ile birlikte aktif filtre teknolojisi de gelişmiştir.

Açıklanan bu faydalarının yanında aktif filtrelerin dezavantajları da bulunmaktadır; büyük güçlerde üretilmeleri ve uygulanmaları zor ve pahalıdır. Ayrıca ilk yatırım maliyetleri pasif filtrelere göre oldukça yüksektir.

Aktif filtreler temel olarak tek fazlı, üç fazlı nötrsüz ve üç fazlı nötrlü olmak üzere üç sınıfta toplanabilir. Şebekedeki harmonik ve enerji kalitesi problemlerini gidermek için 1971'den bu yana aktif seri filtreler, aktif şönt filtreler ve bu ikisinin birleşimi olan seri-şönt filtreler gibi birçok konfigürasyonlar geliştirilmiştir. Endüktif elemanlı akım kaynaklı evirici ve kapasitif elemanlı gerilim kaynaklı evirici tek fazlı aktif filtrelerde kullanılmaktadır. Ayrıca aktif filtreler, ticari amaçla kesintisiz güç kaynağı uygulamalarında da kullanılmaktadır[22]. Konuyla ilgili literatür incelendiğinde aktif filtrelerin reaktif güç kompanzasyonu, harmoniklerin filtrenmesi, titreşim dengesizlik kompanzasyonu ve gerilim regülasyonu sağladığı için enerji düzenleyicisi olarak yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir[14, 22, 23, 24].

Aktif filtre teknolojisindeki gelişimin en önemli faktörlerinden birisi hızlı ve kendinden komütasyonlu katı hal elemanlarındaki yeniliklerdir. Önceleri tristörler, transistörler ve güç mosfetleri aktif filtrelerde kullanılırken daha sonra statik indüksiyon tristörleri ve GTO'lar kullanılmıştır. Günümüzde ise aktif filtrelerde çoğunlukla IGBT denen izole kapılı transistör kullanılmaktadır. Mikroelektronik

elemanların gelişiminden sonra ise aktif filtrelerde analog ve dijital elemanlarla birlikte dijital sinyal işlemcilerinin de kullanımı ile aktif filtrenin dinamik ve kararlı durum performansını arttırmak için bulanık mantık, yapay sinir ağları, PI denetleyici ve uyarlamalı denetim gibi farklı denetim tekniklerinin uygulanması sağlanmıştır. Böylece aktif filtreler dinamik olarak değişen doğrusal olmayan yüklerde bile hızlı ve düzgün çalışma yeteneğine sahip olmuştur[22].

Şekil 4.18'de paneliyle birlikte bir aktif filtre ve filtreyi oluşturan ekipmanlar görülmektedir. Bu filtre, Finlandiyalı Nokian Capacitors firması tarafından üretilen MaxSine model aktif filtredir. Şekil 4.8'de rakamlarla gösterilen ekipmanlar; 1, reaktörler; 2, kontrol kartı; 3, panel; 4, kontrol arabirimi; 5, soğutucu fan; 6, IBGT evirici ünitesi; 7, histerezis filtresi; 8, güç kaynağı şeklindedir[14].



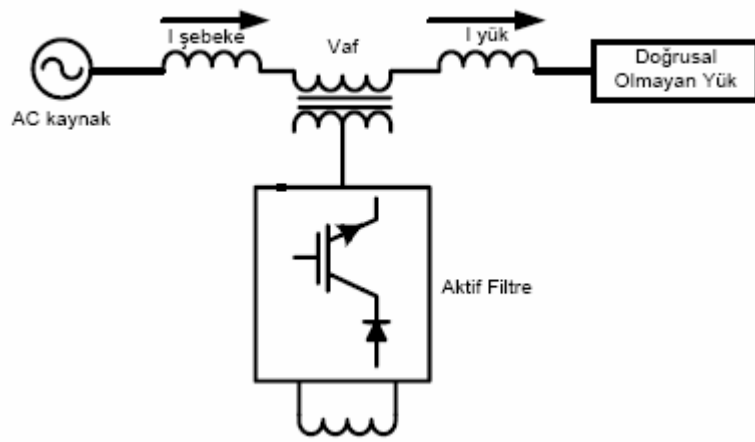
Şekil 4.18: Maxsine modeli aktif filtre

4.5.1 Aktif Filtre Konfigürasyonları

Aktif filtreler, harmoniklerin süzülmesi, reaktif güç kompanzasyonu, rezonansların bastırılması ve gerilim regülasyonu gibi enerji kalitesini artıracak birçok uygulamaya imkan sağlamaktadırlar. Aktif filtrelerin bu özellikleri, devre yapılarına ve sisteme bağlantı şekillerine göre değişiklik göstermektedir. Aktif filtreler devre yapılarına göre akım veya gerilim kaynaklı; sisteme bağlantı şekillerine göre ise seri veya paralel olarak sınıflandırılmaktadır.

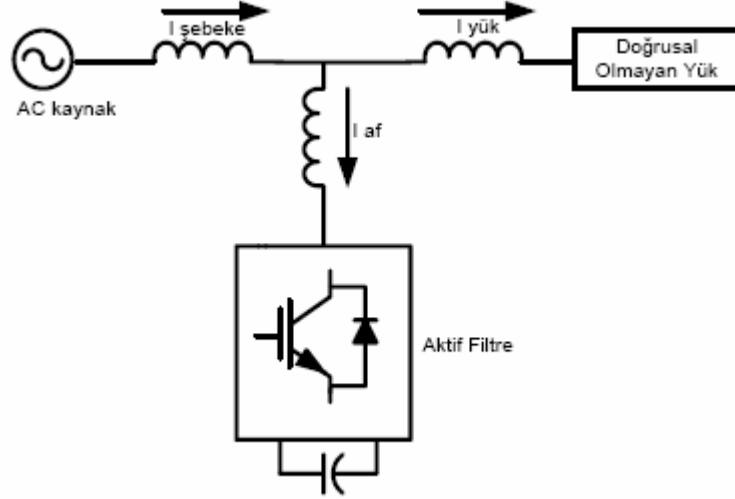
4.5.1.1 Devre Yapısına Göre Sınıflandırma

Aktif filtrelerde akım kaynaklı ve gerilim kaynaklı olmak üzere iki tip dönüştürücü kullanılır. Şekil 4.19’da akım kaynaklı PWM evirici yapısı görülmektedir. Devrede ters gerilimin önlenmesi için, kendinden komütasyonlu anahtarlama elemanına (IGBT) seri olarak bir diyot bağlıdır. GTO tabanlı düzenlemelerde ise bu diyota gerek yoktur, fakat anahtarlama frekansı sınırlıdır. Bu düzenleme oldukça güvenilir olmasına rağmen kayıpları yüksektir ve devre elemanlarının yüksek güçlü olmasını gerektirir [22].



Şekil 4.19: Akım kaynaklı aktif filtre (seri bağlı)

Aktif filtrelerde kullanılan diğer bir dönüştürücü tipi de Şekil 4.20’de görülen gerilim kaynaklı PWM evirici yapısıdır. Büyük bir DC kondansatörle düşük anahtarlama frekansında performansı arttırmak için çok seviyeli olarak genişletilebilmesi nedeniyle; ayrıca daha ucuz ve hafif olması sebebiyle bu yapı daha çok kullanılır[22].



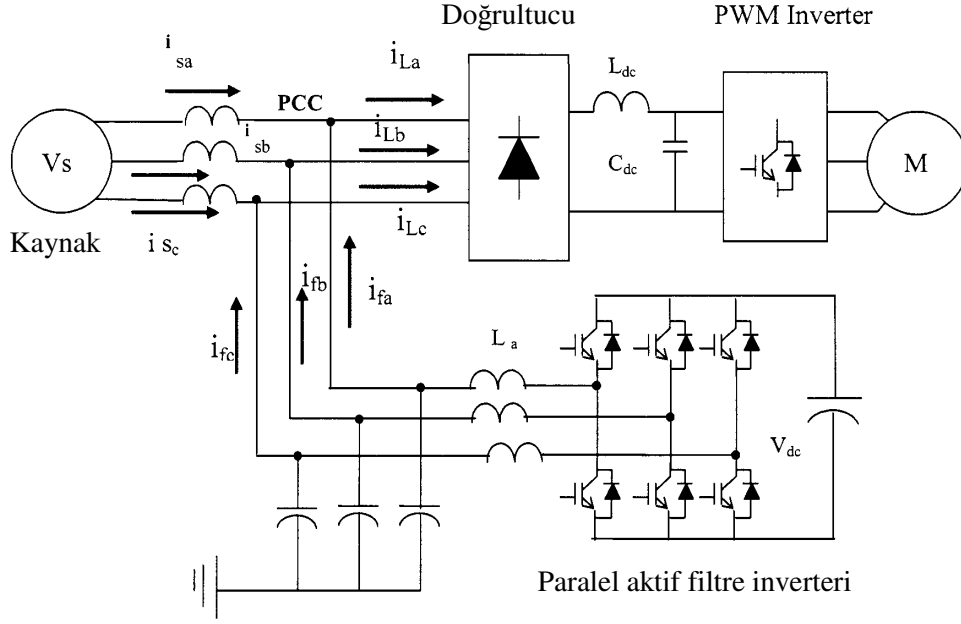
Şekil 4.20: Gerilim kaynaklı aktif filtre (paralel bağlı)

4.5.1.2 Bağlantı Şekline Göre Sınıflandırma

Aktif filtreler bağlantı şekillerine göre, seri ve paralel filtreler olarak adlandırılır. Seri aktif filtreye ek olarak paralel pasif filtre bağlanmasıyla hibrid aktif filtreler ve seri ve paralel aktif filtrenin birarada kullanılmasıyla da birleşik güç kalite düzenleyicisi (UPFC) olarak adlandırılan filtreler oluşturulur.

Paralel aktif filtreler çoğunlukla akım harmoniklerinin süzülmesi ve reaktif güç kompanzasyonu amacıyla; seri aktif filtreler ise çoğunlukla gerilim harmoniklerinin süzülmesi, gerilim regülasyonu ve harmonik izolasyon amacıyla kullanılmaktadırlar.

Aktif paralel filtreler yüke paralel bağlı olarak kullanılır. Şekil 4.21’de bir paralel aktif filtrenin iç yapısı görülmektedir. PWM gerilim kontrollü inverterler sabit veya kontrol edilebilen DC bara gerilimi ve güç faktörü sağlarlar. Paralel aktif filtreler orta büyüklükteki güçlere kadar ekonomiktir. Ayrıca harmoniklerin dağıtım barasındaki diğer yüklere doğru yayılmasını engeller[24].

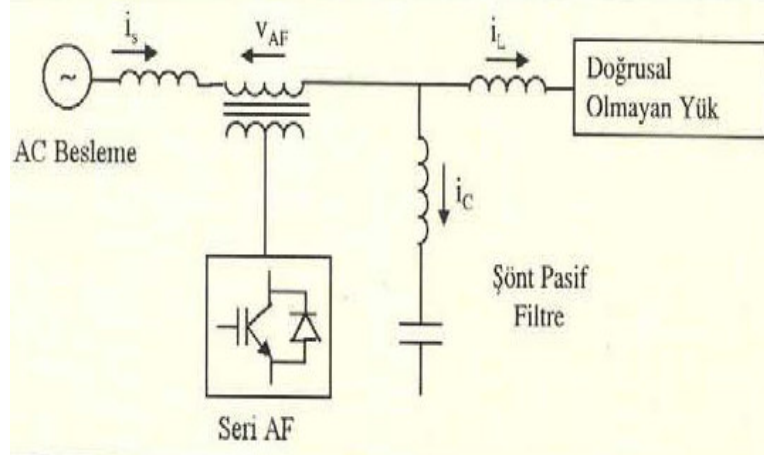


Şekil 4.21: Paralel aktif filtrenin iç yapısı

Dağıtım sisteminde oluşabilecek seri ve paralel rezonans durumu, sisteme aktif empedans bağlanmasıyla önlenabilir. Aktif empedans ise PWM gerilim kontrollü invertere sahip bir seri aktif filtre yardımıyla uygulanabilir. Seri aktif filtre, gerilim harmoniklerini yok etmek için ve yük veya hattın uç gerilimini dengelemek için yükten önce bir transformatör yardımıyla hatta seri bağlanır. Üç fazlı sistemlerde negatif dizi gerilimini azaltmak ve gerilimi düzenlemek amacıyla kullanılır[22].

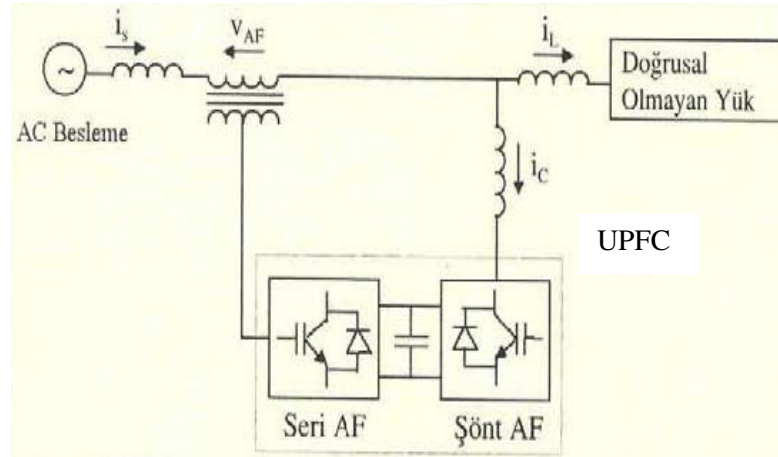
Paralel aktif filtreler genellikle yüksek güçlü büyük inverterlere ihtiyaç duyarlar. Ayrıca 500 kW'ın altındaki güçlerde çoğunlukla ekonomik olmazlar. Özellikle büyük güçlü sanayi tüketicileri, izin verilen çalışma sınırlarında kalmak için hem kolay uygulanabilen hem de ekonomik olan hibrid aktif filtrelerle çözüme gitmektedir[24].

Aktif ve pasif filtrenin bir arada kullanıldığı hibrid aktif filtrelerde aktif filtre seri bağlı, pasif filtre ise paralel bağlı olur. Böylece harmoniklerin izole edilmesi ve gerilim distorsiyonunun daha az olması sağlanabilir. Gerilim harmoniklerine karşı duyarlı olan yüklerde (örn. tıp elektroniği) bu özellik çok önemlidir. Aktif filtrede kullanılan katı hal elemanları filtrenin hem boyutunu hem de maliyetini azaltır. Pasif filtrede ise düşük dereceli harmonikler yok edilir[22, 24]. Şekil 4.22'de aktif seri ve pasif paralel filtrenin birleşiminden oluşan bir hibrid aktif filtre görülmektedir[22].



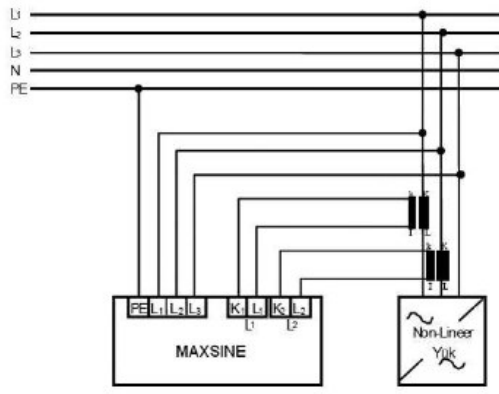
Şekil 4.22: Hibrid aktif filtre

Şekil 4.23'te seri ve paralel aktif filtrelerin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan ve birleşik güç kalite düzenleyicisi olarak adlandırılan aktif filtre görülmektedir. DC hat elemanı (bobin ya da DC bara kondansatörü) aktif seri ve aktif şönt kompanzator olarak çalışan iki akım kaynaklı veya gerilim kaynaklı köprü arasında paylaşılır. Bu filtreler hem tek fazlı hem de üç fazlı sistemlerde gerilim ve akım harmoniklerini yok etmek amacıyla kullanılmaktadır. Diğer özellikleri ise sistemin uç gerilimini dengelemesi ve negatif dizi akımlarını yok etmesidir[22].

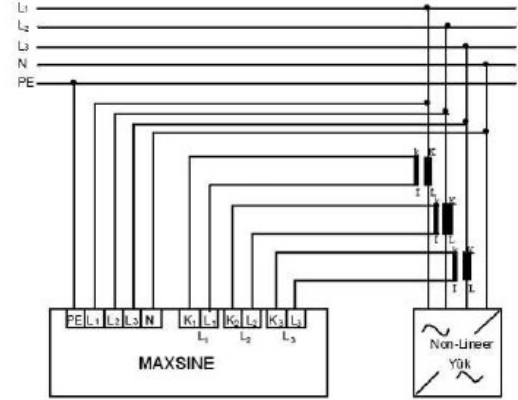


Şekil 4.23: Birleşik güç kalite düzenleyicisi (UPFC)

Sistemde yapılan harmonik ölçümleri sonucunda nötrdeki harmonik akımlarının, faz akımının % 5'ini geçtiği durumlarda dört telli aktif filtre kullanılması tavsiye edilmektedir[14]. 3 telli ve 4 telli aktif filtre bağlantı şemaları Şekil 4.24'te verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.24: 3 telli (a) ve 4 telli (b) aktif filtre bağlantı şemaları[14]

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüklerin çoğalıp çeşitlerinin artmasıyla elektrik enerji kalitesi problemleri, tüm tüketiciler için telafi edilemeyecek boyutlara ulaşmıştır. Dağıtım sisteminden tüketicilere kalitesiz enerji sunulması ile yüz binlerce dolarlık kayıplar ve ciddi hasarlar doğmaktadır. Bu nedenle enerjideki kalitesizliğe yönelik doğru çözümlerin tasarlanıp uygulanması her geçen gün daha çok önem kazanmaktadır.

Pek çok ekipmanın normal çalışması için yüksek bir güç faktörüne sahip olması şart değildir. Ancak elektrik dağıtım sistemi genelinde kayıpları azaltmak, verimi arttırmak ve işletmeyi kolaylaştırmak için reaktif güç kompanzasyonu yapılması gerekir. Ayrıca tüketiciler reaktif güç kompanzasyonu ile şebekeden çektikleri fazla reaktif gücü azaltabilecekleri için ceza ödemek zorunda kalmazlar.

Bu tez çalışmasında anlatılan konuların uygulamasının yapılması için ETAP PowerStation programında demir-çelik fabrikası baz alınarak örnek bir dağıtım sistemi oluşturulmuş ve bu sistem üzerinde yük akışı ve harmonik analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Buna göre;

1. Yük akışı analizleri yapılarak tezde incelenen reaktif güç kompanzasyonu ile kayıpların, şebekeden çekilen reaktif gücün, görünür gücün ve görünür akımın azaltılması durumları doğrulanmıştır. Dağıtım sisteminin çeşitli noktalarına kondansatörler bağlanarak güç katsayısı artırılabilir, aynı zamanda tüketicideki gerilim düşümü önlenir. Böylece tesisteki kapasiteyi arttırmak mümkün olur.
2. Dağıtım sisteminin girişindeki yüksek gerilim barasında kurulacak bir merkezi kompanzasyon ünitesi ile tesiste reaktif güç kompanzasyonu yapılabilir. Ancak bu durumda her bir dağıtım barasının tek tek kompanze edilmesi durumuna göre verim daha düşük olmaktadır.
3. Kondansatörlerin rezonansa sebep olarak bağlandıkları baradaki harmonik gerilimlerini arttırdıkları gözlenmiştir. Bunun yanında o barayı besleyen transformatörde de harmonikli akımlarda artış meydana gelmiştir. Bu nedenle reaktif güç kompanzasyonu için kurulan kondansatörlerin rezonansa sebep olup olmayacağı

iyi incelenmelidir. Rezonans ihtimali varsa kondansatöre seri olarak bir reaktör bağlanabilir.

4. Pasif harmonik filtreler yardımıyla sistemdeki harmonik miktarları azaltılmıştır. Pasif filtreler, reaktif güç ihtiyacı baz alınarak belirlendiği için harmonikleri filtrelemenin yanında reaktif güç kompanzasyonu da yapar.

5. Harmonikler için merkezi filtreleme yapılması durumunda transformatör ve kabloların harmonik akımları ile yüklendiği görülmüştür. Buna göre sistemde çeşitli noktalarda filtreleme yapmak, merkezi bir noktadan filtreleme yapmaya göre daha verimlidir. En iyi sonucu elde etmek için filtreler her bir harmonik kaynağı yükün yanında kurulmalı, ölçümler ise sistemin girişinden yapılmalıdır.

6. Transformatör sargılarının bağlantıları da harmoniklerin azaltılmasında önemlidir. Üçgen sargı yapılarak üçüncü harmoniklerin yayılmasının önlenebileceği, simülasyon çalışmasında irdelenmiştir. Buna göre sistemde sadece üçüncü harmoniklerin bulunması durumunda hiçbir harmonik filtre kullanmadan yalnızca transformatör sargılarından birisi üçgen bağlanarak üçüncü harmoniklerin yayılması engellenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Güler, Ö.**, 1995. Reaktif güç kompanzasyonu ve sakıncaları, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği**, 2004, *EPDK*, Ankara.
- [3] **Küçük, S.**, 2003. Enerji Dağıtım Çözümlü Problemler, TÜPRAŞ Yayınları, Kocaeli.
- [4] **Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliği**, 2002, *EPDK*, Ankara.
- [5] **IEEE Std 1036-1992**, 1992, IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors, *IEEE*, ABD.
- [6] **Sankaran, C.**, 2002. Power Quality, CRC Press, New York.
- [7] **Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O.**, 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [8] **IEEE Std 519-1992**, 1992, IEEE Recommended Practices and Requirements For Harmonic Control in Electrical Power Systems, *IEEE*, ABD.
- [9] **IEEE Std 1531-2003**, 2003, IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, *IEEE*, ABD.
- [10] **Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği**, 2003, *EPDK*, Ankara.
- [11] **Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği**, 2003, *EPDK*, Ankara.
- [12] **Bayram, M.**, 2000. Reaktif Güç Kompanzasyonu, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [13] **TS EN 60871-1**, 2004, Kondansatörler tesis ve işletme kılavuzu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [14] **Kompanzasyon Ürünleri ve Enerji Kalitesi Teknik Bilgiler Kitapçığı**, 2006, *Aktif Mühendislik Ltd. Şti.*, İstanbul.
- [15] **Dugan, R., McGranaghan, M., Santoso, S., Beaty, W.**, 2002. Electrical Power Systems Quality, McGraw Hill, New York.
- [16] **Tyll, H.K.**, 2004. FACTS technology for reactive power compensation and system control, *IEEE / PES FACTS Paneli*, Sao Paulo, Brezilya, 8-11 Kasım.

- [17] **Lale, M.**, Elektrik Mühendisi, Erdemir 2. Sıcak Haddehane, 2007. Kişisel Görüşme.
- [18] **Pehlivan Türk, E.**, 2004. Güç kalitesi ve güç kalitesi kontrolörleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] **Öztürk, O. İ.**, 1998. Statik var kompanzatörü ile reaktif güç kontrolü ve kompanzasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] **Yu, Q., Li, P., Liu, W., Xie, X.**, 2004. Overview of STATCOM technologies, *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, Hong Kong, April 2004.
- [21] **Awad, H.**, 2004. Control of static series compensator for mitigation of power quality problems, *Doktora Tezi*, Chalmers University of Technology, İsveç.
- [22] **Kuşdoğan, Ş., Özdemir, Ş.**, 2006. Aktif filtrelerin güç kalite düzenleyicisi olarak kullanımı, Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.
- [23] **Peng, F. Z.**, 1998. Application issues of active power filters, IEEE industry applications magazine, September / October 1998.
- [24] **Rathle, N. L.**, 2005. Design procedure for active filters for improving power quality, *Doktora Tezi*, University of South Carolina, ABD.

ÖZGEÇMİŞ

Barış Engin 1980 yılında Adana’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kocaeli’de tamamladıktan sonra Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. Ardından İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü’nde Enerji Bilim ve Teknoloji Programı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Ocak 2007’de İskenderun Demir ve Çelik Fabrikası’nda elektrik mühendisi olarak çalışmaya başladı. Bu tez çalışması ile yüksek lisans eğitimini bitirme durumundadır.