



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OG KONDANSATÖRLERİNİN ANAHTARLANMASI
ANINDA ŞEBEKE ENERJİ KALİTESİNİN
İNCELENMESİ

MUHAMMET ERKAN MÜFTÜOĞULLARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2011

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OG KONDANSATÖRLERİNİN ANAHTARLANMASI
ANINDA ŞEBEKE ENERJİ KALİTESİNİN
İNCELENMESİ

MUHAMMET ERKAN MÜFTÜOĞULLARI

Bu tez,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS
derecesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2011

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi Muhammet Erkan MÜFTÜOĞULLARI tarafından hazırlanan “OG Kondansatörlerinin Anahtarlanması Anında Şebeke Enerji Kalitesinin İncelenmesi” adlı bu tez, jürimiz tarafından 14 / 01 / 2011 tarihinde oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Mustafa ŞEKKEİ (DANIŞMAN)

.....

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doç. Dr. A. Serdar YILMAZ (ÜYE)

.....

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Muharrem İMAL (ÜYE)

.....

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. M. Hakkı ALMA

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Muhammet Erkan MÜFTÜOĞULLARI

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**OG KONDANSATÖRLERİNİN ANAHTARLANMASI ANINDA ŞEBEKE ENERJİ
KALİTESİNİN İNCELENMESİ
(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

MUHAMMET ERKAN MÜFTÜOĞULLARI

ÖZ

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. Enerji kalitesini belirleyen en önemli faktörler gerilim değişimleri, frekans değişimleri, kesintiler ve temel frekansın dışındaki frekansları üreten tüketicilerdir.

Harmonik oluşumuna sebep olan başlıca yükler; güç elektroniği elemanları, transformatörler, döner makineler, doğru akım ile enerji nakli, ark fırınları, statik VAR kompanzatörleri ve kesintisiz güç kaynaklarıdır. Harmonikler, sistemdeki elemanlarda; ek kayıplara, ısınmalara, yalıtımlarının zorlanmasına, bazı durumlarda zarar görmelerine ve devre dışı kalmalarına yol açarlar. Bu nedenle bazı tedbirlerin alınması gerekir.

Harmonik üreten kaynaklar imal edilirken harmonik üretmesinin engellenmesi en önemli giderilme yöntemlerinden birisidir. Diğer bir önemli yöntem ise harmonik filtreler yoluyla harmoniklerin süzülmesidir.

Bu tez çalışmasında, reaktif güç kompanzasyonunun tanımı, güç sistemlerindeki harmonik problemleri ve çözümleri ele alınmıştır. Değişik güçlere sahip orta gerilim motorlarında uygulanan güç kompanzasyon sistemi kullanılmıştır. Orta gerilimde ölçüm yapma kabiliyetine sahip bir enerji analizör cihazı ile kompanzasyon sisteminin şebekeye etkilerinin grafiksel analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Harmonikler, Reaktif Güç, Kompanzasyon, Harmonik Filtreler, Kondansatörler, Enerji Kalitesi.

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ocak / 2011

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa ŞEKKELİ

Sayfa sayısı: 110

**INVESTIGATION OF POWER QUALITY IN MEDIUM VOLTAGE NETWORK
DURING SWITCHING OF THE MEDIUM VOLTAGE CAPASITORS
(M.Sc. THESIS)**

MUHAMMET ERKAN MÜFTÜOĞULLARI

ABSTRACT

It is impossible for us to meet our growing electrical energy demand with the world's limited resources. We should improve the quality of energy while saving it. The most important factors which designate the quality of energy are voltage changing, frequency changing, interruptions and the consumer who produce frequencies which is except fundamental frequency.

Main harmonic loads are power electronic elements, transformers, rotating machines, energy transformers by direct current, arc furnaces, static VAR compensators and continuous power sources which in turn cause problems like energy loss, overheating, disturbances and defects in isolation and furthermore disconnection from the circuit. So some precautions must be taken.

Owing to these adverse effects of harmonic loads on system performance their occurrence must be eliminated. The most vital mean of elimination is to prevent the harmonics during manufacturing. The important one is said to be the filtration of harmonics by harmonic filters.

In this thesis study, I will take on definition of reactive power compensation, harmonic problems and solutions in power systems. We use power compensation system which is applied to the medium voltage and motors that have different power. Using the energy analyzer which is capable to work at medium voltage, graphical analyses of effects of compensation systems to the network has worked.

Key Words: Harmonics, Reactive Power, Compensation, Harmonic Filters, Capacitors, Quality of Energy.

Kahramanmaraş Sütçü İmam University
Institute for Graduate Studies in Science and Technology
Department of Electrical and Electronics Engineering, January / 2011

Supervisor: Assistant Prof. Mustafa ŞEKKELİ

Page number: 110

OG KONDANSATÖRLERİNİN ANAHTARLANMASI ANINDA ŞEBEKE ENERJİ KALİTESİNİN İNCELENMESİ

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. Enerji kalitesini belirleyen en önemli faktörler gerilim değişimleri, frekans değişimleri, kesintiler ve temel frekansın dışındaki frekansları üreten tüketicilerdir.

Elektrik enerji sisteminin ve bu sisteme bağlanan yüklerin arızasız ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için o sistemdeki dalga şeklinin sinüsoidal olması ve frekansının 50 Hz.' lik tek frekansa sahip olması istenir. Ancak sisteme bağlanan bazı elemanlar ve bazı olaylar sonucunda akım ve gerilim büyüklükleri sinüsoidal özelliklerini kaybederek sistemde istenmeyen harmonikler oluşmaktadır. Lineer olmayan yüklerin, elektrik dağıtım sistemlerinde, gerilim ve akım dalga biçiminde bozulma meydana getirdikleri uzun yıllardır bilinmektedir. Ancak günümüzde; eskiden beri var olan lineer olmayan yüklere ilaveten, güç elektroniği elemanlarının hızla yaygınlaşması ve dalga şeklindeki bozulmaya duyarlı elemanların sayısındaki artış, bu konuda yapılacak çalışmaların önemini artırmıştır.

Akım ve gerilim dalgalarında oluşan bu harmonikler elektrik tesislerine ve bu tesislere bağlı tüketicilere zarar vermekte veya tamamen işlemez hale getirmektedir.

Elektrik enerji sistemlerinde işletmeyi kolaylaştırmanın, verimi artırmanın ve enerji tasarrufu sağlamanın en etkin ve en kolay yöntemlerinden birisi reaktif güç kompanzasyonudur. Sinüsoidal 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 tez çalışmasında, reaktif güç kompanzasyonunun tanımı, güç sistemlerindeki harmonik problemleri ve çözümleri ele alınmıştır. Değişik güçlere sahip orta gerilim motorlarında uygulanan güç kompanzasyon sistemi kullanılmıştır. Orta gerilimde ölçüm yapma kabiliyetine sahip bir enerji analizör cihazı ile kompanzasyon sisteminin şebekeye etkilerinin grafiksel analizi yapılmıştır. Harmoniklerin kondansatörlere etkileri verilmiş ayrıca bu etkiler maddeler halinde sıralanmıştır.

INVESTIGATION OF POWER QUALITY IN MEDIUM VOLTAGE NETWORK DURING SWITCHING OF THE MEDIUM VOLTAGE CAPASITORS

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 energy while saving it. The most important factors which designate the quality of energy are voltage changing, frequency changing, interruptions and the consumer who produce frequencies which is except fundamental frequency.

To operate electric energy system and their loads reliably, the waveform of the system magnitudes should be in the form of sinusoidal with 50 Hz. However, owing to elements connected to the power system and some events the voltage and current waveform are deviated from pure sinusoidal form, which cause to undesired harmonics. It has long been known that nonlinear loads cause to voltage and current waveform distortion in distribution networks. In addition importance of the research on this subject has recently intensified due to both the widespread use of power electronic devices and the increase in the number of sensitive electrical devices to waveform distortion.

Voltage and current waveform distortion due to harmonics can make the electrical system and electrical consumer either damaged or out of order.

One of the most efficient and easy methods of making operation easier, improving efficiency and saving energy is power factor correction. 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 this thesis study, I will take on definition of reactive power compensation, harmonic problems and solutions in power systems. We use power compensation system which is applied to the medium voltage and motors that have different power. Using the energy analyzer which is capable to work at medium voltage, graphical analyses of effects of compensation systems to the network has worked. The effects of harmonics on capacitors are examined and the effects are given.

TEŞEKKÜR

Reaktif güç kompanzasyonunun tanımı, güç sistemlerindeki harmonik problemleri ve çözümleri konuları kullanılarak, orta gerilimde ölçüm yapma kabiliyetine sahip bir şebeke analizör cihazı ile değişik güçlere sahip orta gerilim motorlarında uygulanan güç kompanzasyon sisteminin şebekeye etkilerinin grafiksel analizinin yapıldığı bu tez çalışmamda ve yüksek lisans eğitimim süresince benden yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen eşime, aileme, tez danışmanım sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa ŞEKKELİ'ye ve tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
ÖZET	iii
SUMMARY	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç.....	3
1.2. Önceki Çalışmalar	4
2. MATERYAL	8
2.1. Harmonikler.....	8
2.1.1. Devre büyüklüklerinin tanımı.....	9
2.1.1.1. Toplam harmonik distorsiyonu.....	10
2.1.1.2. Distorsiyon faktörü	11
2.1.1.3. Tepe faktörü (Crest factor)	11
2.1.1.4. K faktörü.....	11
2.1.1.5. Harmonik faktörü	12
2.1.1.6. Toplam talep distorsiyonu	12
2.1.2. Harmoniklerin sebepleri	12
2.1.3. Harmonik kaynakları	14
2.1.3.1. Transformatörler	14
2.1.3.2. Döner makineler	14
2.1.3.3. Güç elektroniği elemanları	15
2.1.3.4. Doğru akım ile enerji nakli (HVDC).....	15
2.1.3.5. Statik VAR generatörleri	15
2.1.3.6. Ark fırınları.....	15
2.1.3.7. Kesintisiz güç kaynakları.....	15
2.1.3.8. Gaz deşarjlı aydınlatma	15
2.1.3.9. Elektronik balastlar	16
2.1.3.10. Fotovoltaik sistemler	17
2.1.3.11. Bilgisayarlar.....	17
2.1.4. Harmoniklerin etkileri	17
2.1.5. Harmonik bozulmanın giderilmesi	19
2.1.5.1. Oluşmuş harmonik akımlarını azaltma.....	19
2.1.5.2. Devre kesiciler	20

2.1.5.3. Güç değerini düşürme.....	20
2.1.5.4. Filtreleme.....	20
2.1.5.4.1. Pasif filtreler	20
2.1.5.4.1.1. Seri pasif filtreler	20
2.1.5.4.1.2. Paralel pasif filtreler	21
2.1.5.4.1.3. Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamak (Filtreli kompanzasyon sistemleri).....	22
2.1.5.4.2. Aktif güç filtreleri.....	24
2.1.5.4.2.1. Paralel aktif filtre	25
2.1.5.4.2.2. Seri aktif filtre.....	25
2.1.5.4.3. Aktif güç filtresinin yapısı.....	26
2.1.6. Harmonik standartları	27
2.2. Reaktif Güç Kompanzasyonu	30
2.2.1. Kompanzasyonun amacı.....	32
2.2.2. Kompanzasyonun faydaları	38
2.2.2.1. Sistem kapasitesi	38
2.2.2.2. Isı kayıpları	40
2.2.2.3. Gerilim düşümü	40
2.2.2.4. Tüketici açısından faydası	42
2.2.3. Reaktif güç ihtiyacının saptanması.....	42
2.2.3.1. P ₁ gücünün sabit olması hali.....	42
2.2.3.2. S ₁ gücünün sabit olması hali.....	43
2.2.4. Yeni bir kompanzasyon tesisin projelendirilmesinde dikkat edilmesi gereken hususlar.....	43
2.2.4.1. Kompanzasyon tesisi çeşitleri	44
2.2.4.1.1. Bireysel kompanzasyon	44
2.2.4.1.2. Grup kompanzasyon	45
2.2.4.1.3. Merkezi kompanzasyon	46
2.2.5. Kondansatörler	47
2.3. Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri	48
2.3.1. Aşırı gerilim.....	50
2.3.2. Aşırı akım	50
2.3.3. Aşırı reaktif yük.....	52
2.3.4. Kayıp güç.....	54
2.3.5. Rezonans oluşumu.....	55
2.3.5.1. Rezonansın etkileri	56
3. METOT	58
3.1. Giriş	58
3.2. Enerji Analizör Cihazı ile Ölçümlerin Yapılması	62
3.2.1. Enerji analizör cihazı	62
3.2.2. Ölçümlerin yapılması	64
3.3. Bulgular	66
4. SONUÇLAR.....	72
KAYNAKLAR.....	75
EKLER	78
ÖZGEÇMİŞ.....	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. Nonlineer bir yükün sebep olduğu harmonik bozulma devresi.....	8
Şekil 2.2. Frekansı 50 Hz. olan bir dalganın bazı harmoniklerinin şekilleri	8
Şekil 2.3. Belli başlı harmonik kaynaklı yüklerin karakteristikleri	13
Şekil 2.4. Anti-harmonik şok bobininin tesisat empedansı üzerinde etkileri	19
Şekil 2.5. Seri pasif filtre için bir örnek	21
Şekil 2.6. Pasif filtre için bir örnek (Tek ayarlı paralel pasif filtre)	22
Şekil 2.7. Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamak	23
Şekil 2.8. Paralel aktif filtrenin prensip şeması	25
Şekil 2.9. Seri aktif filtrenin prensip şeması.....	26
Şekil 2.10. Aktif güç filtresinin blok şeması	26
Şekil 2.11. Reaktif güç sisteminde çekilen akım ve şebeke gerilimi	32
Şekil 2.12. Kompanzasyonlu sistemin düzelttiği gerilim ve akım şekilleri	32
Şekil 2.13. Aktif güç, reaktif güç fazör diyagramı	33
Şekil 2.14. Hattın sonunda beslenen bir tüketici	39
Şekil 2.15. Bir gerilim hattının fazör diyagramının şematik çizimi	41
Şekil 2.16. P ₁ gücünün sabit olması halini gösteren diyagram.....	42
Şekil 2.17. S ₁ gücünün sabit olması halini gösteren diyagram.....	43
Şekil 2.18. Bireysel kompanzasyon.....	45
Şekil 2.19. Grup kompanzasyon.....	46
Şekil 2.20. Merkezi kompanzasyon.....	47
Şekil 2.21. Orta gerilim güç kondansatörleri.....	48
Şekil 2.22. Doğrusal olmayan yüklerle harmonikli gerilimin oluşması	49
Şekil 2.23. Kondansatörün farklı gerilimlerle beslenmesi halindeki akımı	
a) Aynı efektif değerde sinüzoidal beslenmesi	
b) Aynı efektif değerde nonsinüzoidal beslenmesi	52

Şekil 2.24. Kondansatörün farklı gerilimlerle beslenmesi halindeki reaktif gücü

a) Aynı efektif değerde sinüzoidal beslenmesi

b) Aynı efektif değerde nonsinüzoidal beslenmesi 53

Şekil 3.1. Tesis motor dairesinden bir görüntü..... 59

Şekil 3.2. 1600 kVAR, 800 kVAR ve 800 kVAR kondansatör bankları 61

Şekil 3.3. Zarar görmüş OG kondansatörler ve kondansatör plakaları 62

Şekil 3.4. Ölçümlerde kullanılan enerji analizör cihazı ve tesisata bağlantı şekli..... 63

Şekil 3.5. Ölçümlerde kullanılan akım ve gerilim klempleri 63

Şekil 3.6. Ölçümün yapıldığı akım ve gerilim trafo değerlerini gösteren tek hat şeması ..65

Şekil 3.7. Akım ve gerilim dalga formu grafiği (Kondansatörler devrede iken) 66

Şekil 3.8. Akım ve gerilim dalga formu grafiği (Kondansatörler devreden çıktığı an) 66

Şekil 3.9. Akım ve gerilim dalga formu grafiği (Kondansatörler devrede değil) 66

Şekil 3.10. Akım ve gerilim harmonik grafiği (Kondansatörler devrede iken)..... 67

Şekil 3.11. Akım ve gerilim harmonik grafiği (Kondansatörler devreden çıktığı an)..... 67

Şekil 3.12. Akım ve gerilim harmonik grafiği (Kondansatörler devrede değil)..... 67

Şekil 3.13. Akım ve gerilim dalga formu grafiği (Kondansatörler devrede iken)..... 69

Şekil 3.14. Akım ve gerilim dalga formu grafiği (Kondansatörler devreden çıktığı an) ...69

Şekil 3.15. Akım ve gerilim dalga formu grafiği (Kondansatörler devrede değil) 69

Şekil 3.16. Akım ve gerilim harmonik grafiği (Kondansatörler devrede iken)..... 70

Şekil 3.17. Akım ve gerilim harmonik grafiği (Kondansatörler devreden çıktığı an)..... 70

Şekil 3.18. Akım ve gerilim harmonik grafiği (Kondansatörler devrede değil)..... 70

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1. Frekansı 50 Hz olan bir dalganın bazı harmoniklerinin frekansı	8
Çizelge 2.2. Flouresant lamba harmonik distorsiyon değerleri (Gerilim için).....	16
Çizelge 2.3. Flouresant lamba harmonik distorsiyon değerleri (Akım için)	16
Çizelge 2.4. Magnetik balastlı flouresant lamba harmonik spektrumu	16
Çizelge 2.5. Harmoniklerin etkileri ve izin verilen normal seviyeleri	18
Çizelge 2.6. Aktif ve pasif filtrelerin karşılaştırılması	27
Çizelge 2.7. Ülkemizde 380 kV iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri	27
Çizelge 2.8. Ülkemizde 20-154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri	28
Çizelge 2.9. Ülkemizde izin verilen azami gerilim fliker şiddeti	28
Çizelge 2.10. O.G., Y.G. ve Ç.Y.G. güç sistemlerinde kabul edilebilir gerilim harmonik limitleri	28
Çizelge 2.11. Ülkemizde A.G. güç sistemleri için gerilim harmonikleri sınır değerleri....	29
Çizelge 2.12. Ülkemizde A.G. güç sistemlerinde akım harmonikleri için maksimum yük akımına (I_L) göre sınır değerleri	29
Çizelge 2.13. Ülkemizde A.G. güç sistemlerinde fliker şiddeti için sınır değerler	29
Çizelge 2.14. Bazı ülkelere ait harmonik standartları	30
Çizelge 2.15. Bazı ana tüketicilerin güç faktörleri	38
Çizelge 3.1. Tesislerde bulunan güç transformatörlerinin etiket değerleri.....	59
Çizelge 3.2. Tesislerdeki 1600 kW ve 1200 kW güçlerindeki 3 fazlı bilezikli asenkron motorların etiket değerleri	60
Çizelge 3.3. OG kondansatör gruplarına ait kondansatör etiket değerleri.....	60
Çizelge 3.4. Ölçümlerde kullanılan enerji analizör cihazına ait teknik özellikler.....	64

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AC	: Alternatif akım
AG	: Alçak gerilim
Alt	: Akım için limit fliker şiddeti
Ast	: Akım için standart fliker şiddeti
C	: Kondansatör
cosφ	: Güç faktörü
ÇYG	: Çok yüksek gerilim
D	: Distorsiyon gücü
DC	: Doğru akım
[DF]_i	: Akım için distorsiyon faktörü
[DF]_v	: Gerilim için distorsiyon faktörü
E	: Şebeke gerilimi
f	: Frekans (Hz.)
I	: Görünür akım
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	: Harmonik temel bileşenin RMS değeri
IH	: Akım harmonik bozunumu
I_n	: n. harmonik akımı RMS değeri
I_p	: Aktif akım
I_q	: Reaktif akım
kV	: Kilovolt (Gerilim birimi)
kVA	: Kilovoltamper (Görünür güç birimi)
kVAR	: Kilovoltamperreaktif (Reaktif güç birimi)
kW	: Kilowatt (Aktif güç birimi)
L	: Endüktans
n	: Harmonik mertebesi

OG	: Orta gerilim
P	: Aktif güç
Plt	: Güç için limit fliker şiddeti
Pst	: Güç için standart fliker şiddeti
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
Q	: Reaktif güç
R	: Hattın aktif direnci
S	: Görünür güç
tanδ	: Kayıp faktörü
[THD]_i	: Akım toplam harmonik distorsiyonu
[THD]_v	: Gerilim toplam harmonik distorsiyonu
TTB	: Toplam talep bozunumu
TTD	: Toplam talep distorsiyonu
U	: Şebeke gerilimi
U₁	: Hattın başındaki faz-nötr gerilimi
U₂	: Hattın sonundaki faz-nötr gerilimi
V_n	: n. harmonik gerilimi RMS değeri
X	: Hattın reaktif direnci
XC	: Kapasitif reaktans
XL	: Endüktif reaktans
YG	: Yüksek gerilim
Z	: Empedans
ω	: Açısal frekans
γ_n	: n. Harmonik akımının faz açısı
δ_n	: n. Harmonik gerilimin faz açısı
φ	: Faz açısı
A_{st}	: Akım için standart fliker şiddeti

P_{st}	: Güç için standart fliker şiddeti
A_{lt}	: Akım için limit fliker şiddeti
P_{lt}	: Güç için limit fliker şiddeti
kV	: Kilovolt (Gerilim birimi)
kW	: Kilowatt (Aktif güç birimi)
U₁	: Hattın başındaki faz-nötr gerilimi
U₂	: Hattın sonundaki faz-nötr gerilimi
TTB	: Toplam talep bozunumu
kVA	: Kilo volt amper (Görünür güç birimi)
kVAR	: Kilo volt amper reaktif (Reaktif güç birimi)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu

1. GİRİŞ

Enerji verimliliği ve tasarrufu konularının gittikçe artan bir şekilde önem kazanmasıyla, bu amaca yönelik çalışmalardan, enerji kalitesini yükseltmek için yapılan çalışmalarda her geçen gün artmaktadır. Tüketicie sunulan elektrik enerjisinin ucuz ve kesintisiz sağlanması, gerilim, frekans ve güç faktörü gibi büyüklüklerin de istenen sınırlar içerisinde olması şeklinde tanımlanabilecek enerji kalitesi kavramı, uzun süredir elektrik mühendislerinin başlıca uğraşı alanları arasında yer almaktadır. Alternatif akım tesislerinde akım ve gerilim dalga şekillerinin tam sinüs fonksiyonu şeklinde olması istenir. Bu koşul, elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir. Bu amaçla genellikle gerilimdeki dalgalanmalar, çökmeler ya da kesintiler ile geçici olaylar üzerinde çalışılmakla birlikte, hiç şüphesiz, en çok reaktif güç kompanzasyonu ve harmoniklerin azaltılması çalışmaları da yapılarak enerji kalitesi ile birlikte verim artırılmakta ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır (Kaypmaz ve Engin, 2009).

Reaktif güç kompanzasyonu ve harmoniklerin azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalar, elektrik dağıtım sistemlerinde işletmeyi kolaylaştırmanın yanı sıra, verimi arttırmanın ve enerji tasarrufu sağlamanın en etkin yöntemlerindendir.

Elektrik dağıtım sistemine bağlanan cihazların büyük bir kısmının şebekeden aktif gücün yanında bir miktarda reaktif güç çektiği bilinmektedir. Bu reaktif güç, endüksiyon prensibine göre çalışan cihazların çalışabilmesi için ihtiyaç duyulan manyetik alanların oluşturulması için gereklidir. Aktif gücün elektrik santrallerinde üretilmesi gerektiği halde, reaktif güç için böyle bir zorunluluk yoktur. Reaktif güç üretimi yükün yanında kurulacak yardımcı sistemler aracılığıyla 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 elemanları bu reaktif güç ile gereksiz yere yüklenip, hat kapasitelerini azaltacağı gibi işletmenin elektrik faturasını da arttıracaktır (Kaypmaz ve Engin, 2009).

Kompanzasyonda genel kaide olarak en gerçekçi yol; reaktif akımlar kendilerini tüketen cihazlara en yakın noktada üretilmelidirler. Bu durumda abonelerden başlayarak dağıtım hatlarından itibaren üretim kaynağına kadar söz konusu cihazlar için gerekli reaktif enerji sistemden taşınmayacak ve bu sebeple;

- Şebekedeki güç kayıpları önemli oranda azalacak,
- Üretim ve dağıtım sisteminin kapasitesi artacak,
- Gerilim düşümünün taşınan gücü sınırladığı dağıtım hatlarında enerji taşıma kapasitesi büyük oranda artmış olacaktır.

Elektrik dağıtım sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu, senkron motorlarla (dinamik faz kaydırıcılar) ve kondansatörlerle (statik faz kaydırıcılar) olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Senkron motorların uyarma akımlarının değiştirilmesi ile motorun kapasitif veya endüktif olarak çalışması sağlanabilmektedir. Ancak günümüzde ekonomik olması, bakım gerektirmemesi ve kayıplarının çok düşük olması nedeniyle kompanzasyon sistemlerinde çoğunlukla kondansatörler kullanılmaktadır (Kaypmaz ve Engin, 2009).

Kondansatördeki kapasitif reaktif güç ile yükün endüktif reaktif gücü vektörel olarak aynı doğrultuda fakat ters yöndedir. Böylece birlikte kullanıldığında kapasitif güç, endüktif gücü azaltarak kompanzasyon etkisi yapar ve akım ile gerilim arasındaki faz farkı azaltılmış olur (Kaypmaz ve Engin, 2009).

Hem dağıtım şirketinin hem de tüketicinin sistemdeki reaktif gücü azaltmakla sağlayacağı faydalardan en önemlileri sistemin kapasitesinin artması ve ısı kayıpları ile gerilim düşümünün azalmasıdır. Ayrıca kompanzasyon ile sistem elemanları fazla yüklenmekten kurtulacağı için sistemin boyutları da küçültülebilir (Kaypmaz ve Engin, 2009).

Görüldüğü üzere enerji kalitesine oldukça katkısı olan ve reaktif güç kompanzasyonunun en önemli devre elemanı durumundaki kondansatörlere büyük bir iş düşmektedir.

Kondansatörler harmonik üreten bir eleman olmamakla birlikte sistemde bulunan harmonik seviyelerinin etkin bir biçimde artmasına neden olurlar. Harmonik bileşenler, elektrik enerji sistemlerine bağlanan nonlineer elemanlar sonucunda ortaya çıkmaktadır. Sistemi besleyen kaynak, sinüzoidal olsa bile harmonik akımları çeken nonlineer elemanlar, sistemde harmonik gerilimlere neden olurlar. Böylece nonlineer yükün bağlı olduğu baraya bağlanan kondansatörler ile eğer varsa lineer yükler nonsinüzoidal (harmonikli) gerilimle beslenirler. Bu durumda kondansatör çalışma değerleri sinüzoidal besleme haline göre farklı değerler alacaktır. Harmonikler; kondansatörlerde hem aşırı gerilimlere hem de aşırı akımlara ve bunların sonucunda da aşırı reaktif yüklenmeye yol açarlar. Bunlara bağlı olarak ta kondansatörlerde aşırı ısınmalar olmakta, aşırı ısınma

nedeniyle kondansatörlerin dielektrik malzemesi zarar görmekte ve ömürleri kısalmaktadır. Ayrıca harmonik bileşenler sistemdeki kondansatörlerle selfler arasında rezonans meydana getirerek işletmenin sürekliliğini de etkilerler (İnan, 2008).

Teknolojinin hızlı seyri ile birlikte gerek artan elektrik talebi, gerekse güç elektroniği elemanlarının daha yaygın bir şekilde günlük hayatın içine girmeye başlaması ile bir takım yeni sorunlar karşımıza çıkmaktadır (Bilge, 2008).

1950'lerden bu yana güç sistemlerinde ilave kayıplar, ek gerilim düşümleri, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi vb. gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açtığı tespit edilen harmonikler akım ve gerilimin sinüzoidal yapısını bozan etkilere sahiptir. Buna sebep olan etkenlerin başında ise manyetik ve elektrik devrelerindeki doğrusal olmayan değişimler (lineer olmayan) gelir (Bilge, 2008).

Yarı iletken elemanların yapıları gereği ve sanayide kullanılan bazı doğrusal olmayan yüklerin (transformatör, ark fırınları, vb.) etkisiyle, akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte temel sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir (Bilge, 2008).

Elektrik enerji sistemleri üzerinde olumsuz etkileri görülen harmoniklerin yok edilmesi veya zararsız hale getirilmesi gerekmektedir (Filiz, 2006).

Bunun için iki farklı yöntem vardır. Bunlardan birincisi, harmonik üreten elemanların üretimi sırasında yapısının harmonik üretmeyecek veya çok az üretecek şekilde tasarlanması veya şebekeye bağlantılarının uygun şekilde yapılmasıdır. Bu yöntem tasarım sırasında alınabilecek önlemler olarak isimlendirilebilir. İkinci yöntem ise, harmoniklerin üretildikten sonra yok edilmesidir. Bu yöntem de, harmoniklerin filtrelenmesi olarak isimlendirilir (Filiz, 2006).

1.1. Amaç

Bu çalışmada, çalışma gerilimi 6,3 kV olan, orta gerilime göre tasarlanmış merkezi reaktif güç kompanzasyon sistemi bulunan, aynı şalt merkezinden beslenen, trafo güçleri aynı fakat motor güçleri farklı olan iki farklı tesise ait enerji kalitesi, kompanzasyon sisteminde bulunan orta gerilim sınıfı kondansatörlerin enerji kalitesine ve enerji kalitesinin de bu kondansatörlere olan etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle enerji kalitesini etkileyen harmonikler, reaktif güç kompanzasyonu ve reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan kondansatörler hakkında temel bilgiler verilmiştir. Harmoniklerin kondansatörler

üzerindeki etkilerinden bahsedilerek, tesislerde kullanılan enerjinin kalitesine yönelik alınan ölçüm sonuçları analiz edilmiştir.

Birinci tesiste; 31,5/ 6,3 kV ve 8000 kVA güce sahip bir trafodan beslenen ve çalışma gerilimi 6,3 kV olan 1600 kW gücündeki bilezikli asenkron motorların 6,3 kV giriş gerilimine sahip 2 adet 800 kVAR gücündeki ve 1 adet 1600 kVAR gücündeki 3 ayrı kondansatör grubu ile merkezi reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. İkinci tesiste ise; yine 31,5/ 6,3 kV ve 8000 kVA güce sahip bir trafodan beslenen ve çalışma gerilimi 6,3 kV olan 1200 kW gücündeki bilezikli asenkron motorların 6,3 kV giriş gerilimine sahip 2 adet 700 kVAR gücündeki ve 1 adet 1400 kVAR gücündeki 3 ayrı kondansatör grubu ile merkezi reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Orta gerilim şebekesine göre tasarlanmış bu tesislerde, şebekenin orta gerilim kısmındaki harmoniklerin, reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan orta gerilim kondansatörleri üzerindeki etkileri ve tesislerde uygulanan orta gerilim reaktif güç kompanzasyonunun orta gerilim şebekesinde meydana getirdiği geçici olaylar bir enerji analizör cihazı ile ölçülerek gözlemlenmiştir. Bu geçici olaylar; orta gerilim kondansatörlerinin devreye alınması ve devreden çıkarılması durumları için şebeke enerji kalitesi açısından incelenmiştir. Gerekli ölçümleri yapabilmek için tesisteki mevcut akım trafoları ile gerilim trafoları kullanılmış ve bunlardan uygun bir enerji analizör cihazı ile alınan bilgilerin analizi metot olarak kullanılmıştır.

1.2. Önceki Çalışmalar

Andrzej KANICKI, 2000. “Dağıtım sistemlerinde voltaj kontrolünün enerji kalitesine etkileri” başlıklı bir makale hazırlamış ve bu makalesinde, dağıtım sistemlerinde yapılan voltaj regüle işleminin indüksiyon motorları ve aydınlatma sistemleri üzerindeki yük modelini yaklaşık olarak çıkarmış ve matematiksel olarak ta ifade etmiştir.

Mehmet SUCU, 2003. “Elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinin bilgisayar destekli modellenmesi ve simülasyonu” başlıklı bir yüksek lisans tezi hazırlamış ve bu tez çalışmasında, harmoniklerin filtrelenmesi ve filtreleme yöntemlerinde tasarım sırasında alınabilecek önlemlerden yüzeysel olarak bahsetmiş, filtreleme konusuna ise ayrıntılı olarak değinmiştir.

Süleyman ADAK, 2003. “Enerji sistemlerinde harmonik distorsiyonunun azaltılması” başlıklı bir doktora tezi hazırlamış ve bu tez çalışmasında, harmoniklerle ilgili

tanımlar ve matematiksel bağıntılar vermiş ve üçüncü harmonik akımı enjekte edilerek harmonik distorsiyonunun azaltılması incelenmiştir.

Serhat Berat EFE, 2006. “Güç sistemlerinde harmonikler ve harmoniklerin analizi” başlıklı bir yüksek lisans tezi hazırlamış ve bu tez çalışmasında, MATLAB programında bir elektrik enerji tesisinin modelini oluşturarak pasif filtrelerin etkisi incelenmiştir.

Caner FİLİZ, 2006. “Güç sistemlerinde harmonikler ve filtrelerin incelenmesi” başlıklı bir yüksek lisans tezi hazırlamış ve bu tez çalışmasında, fourier analizi kullanılarak harmoniklerin matematiksel analizi, harmonik üreten kaynaklar, harmoniklerin sistem üzerine etkileri ve harmonik standartları ayrıntılı olarak incelenmiş ve harmoniklerin giderilmesi konusuna ise ana hatları ile değinilerek filtrelerden bahsedilmiştir.

Ercan KOCABAŞ, 2006. “Reaktif güç kompanzasyonu ve simülasyonu” başlıklı bir yüksek lisans tezi hazırlamış ve bu tez çalışmasında, reaktif güç kompanzasyonunun gerekliliğinden bahsederek, kompanzasyonun matematiksel esasları, modern röleler ve işlevlerini anlatarak, kompanzasyon tesisleri ve matematiksel ifadeleri örnek bir simülasyon devresinde göstermiştir.

Koray TUNÇALP ve Mehmet SUCU, 2006. “Elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinde pasif filtre ve filtreli kompanzasyonun kullanımı ve simülasyon örnekleri” başlıklı bir makale hazırlamışlar ve bu makalede, elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinde kullanılan pasif filtrelerin ve filtreli kompanzasyon sistemlerinin (seri endüktans bağlanmış kompanzasyon sistemi) yapıları ve uygulama şekilleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra örnek olarak ele alınmış harmonik içeren bir elektrik enerji sisteminin modeli MATLAB programı ile oluşturulmuştur. Bu sisteme, pasif filtre ve filtreli kompanzasyon sistemi uygulanarak bu filtrenin sistem üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiş, sonuçlar üzerinde yorumlar yapılmıştır.

Özlem DEMİRKOL, 2006. “Harmonik içeren ve dengesiz şebekelerde ölçme ve kompanzasyon” başlıklı bir yüksek lisans tezi hazırlamış ve bu tez çalışmasında, reaktif güç kompanzasyonunun tanımı, güç sistemlerindeki harmonik problemleri ve çözümleri, dengesiz yüklerde ve hızlı değişen simetrik olmayan yüklerde kompanzasyon konularını ele almıştır.

Umut AYDIN, 2006. “Kampüs tipi yerleşim birimlerinde kompanzasyon ve harmonik açısından güç analizleri” başlıklı bir yüksek lisans tezi hazırlamış ve bu tez

alışmasında, rnek olarak bir niversite kampüs yerleşkesini seçmiş, burada bulunan beş ayrı transformatör merkezinde lmler yaparak ve sistemin gereksinimlerini belirleyerek, elektrik ile ilgili yönetmeliklere uymayan durumları göz önüne sermiş ve bu transformatör merkezlerinden birine kompanzasyon ve enerji analizörü görevi yapan bir reaktif güç kontrol rölesi yerleştirerek, sistemi uzaktan izleyebilmek ve anında veri alabilmek amacıyla yerel alan ağı üzerinden görüntülenebilir hale getirmiştir.

Muğdeşem TANRIÖVEN ve Rıza İNCE, 2007. “Elektrik güç sisteminin kalitesini bozan faktörlerin incelenmesi” başlıklı bir makale hazırlamışlar ve bu makalede, güç sistemine bağlanan bazı elemanlar ve bunların yol açtığı olaylar sebebiyle oluşan, tam sinüzoidal değişimden sapmaları meydana getiren harmonik kaynaklarından ve bu kaynakların enerji kalitesi ile devre elemanları üzerindeki etkileri açıklanmıştır.

Eyüp AKPINAR, 2007. “Kompanzasyon ve harmonik filtreleme- 2” başlıklı bir makale hazırlamış ve bu makalede, harmonik akımlarının taşındığı sistemlerde enerji taşıma hatlarının ve transformatörlerin endüktansları ile kompanzasyon kapasitörlerinin rezonansa girme olasılığından ve harmonik akımların kondansatörlerde delinmeye (patlamaya), kapasite azalmasına ve kondansatör ömrünün kısılmasına sebep olduğundan ve harmonik filtre tasarımlarından bahsetmiştir.

Aslan İNAN, 2008. “Harmoniklerin kondansatörler üzerindeki etkileri” başlıklı bir makale hazırlamış ve bu makalesinde, harmonik distorsiyonun, enerji sisteminde ve enerji sistemine bağlanan elemanlar üzerindeki olumsuz etkilerinden bahsetmiştir. Enerji sisteminde çok önemli yeri olan elemanlardan biri kondansatörlerin de harmonik bileşenlerden oldukça etkilendiğini hatta harmoniklerin meydana getirdiği olumsuzlukların, öncelikle kondansatörler üzerinde görüldüğünü belirtmiştir. Bu çalışmada, harmoniklerin kondansatörlerin çalışma değerlerini ne şekilde etkilediği incelenmiş olup, kondansatörlerin sinüzoidal besleme durumu ile karşılaştırmalar sonucu matematiksel analizler yapılmıştır.

Barış ENGİN, 2008. “Elektrik dağıtım sistemlerinde kompanzasyon ve enerji kalitesi sorunları” başlıklı bir yüksek lisans tezi hazırlamış ve bu tez çalışmasında, enerji kalitesi konusunu tanıtarak, elektrik dağıtım sistemleri ile reaktif güç kompanzasyonu ve harmonikler konularında zet nitelikli bilgiler vermiştir.

Oğuzhan ZSREKCİ, 2008. “Filtreli dinamik kompanzasyon” başlıklı bir yüksek lisans tezi hazırlamış ve bu tez çalışmasında, hızlı değişen yüklerde, reaktif güç ihtiyacını karşılayabilmek için kullanılan dinamik kompanzasyonu inceleyerek, faydalarını iki ayrı

örnek sistem üzerinde açıklamış ve sonuçları bilgisayar ortamında kurulan bir model ile karşılaştırmıştır. Ayrıca harmoniklerin elektrik tesisleri üzerindeki zararlı etkilerini irdeleyerek, bu etkilerin filtre yöntemiyle azaltılmasından bahsetmiştir.

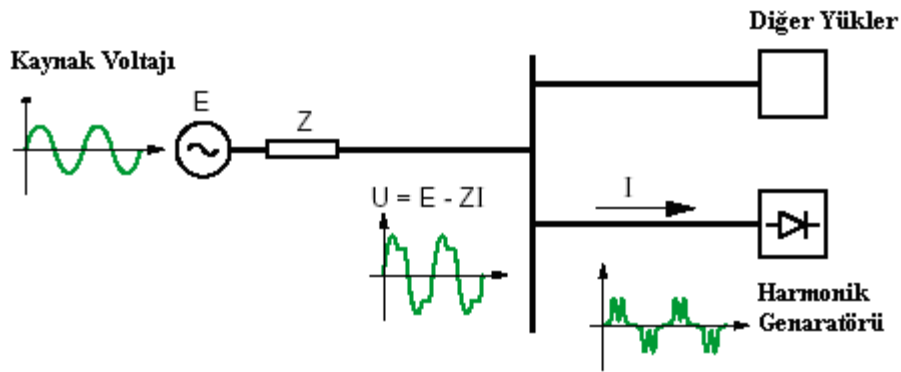
Adnan KAKİLLİ, Koray TUNÇALP ve Mehmet SUCU, 2008. “Harmoniklerin reaktif güç kompanzasyon sistemlerine etkilerinin incelenmesi ve simülasyonu” başlıklı bir makale hazırlamışlar ve bu makalede, elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin reaktif güç kompanzasyon sistemlerine olan etkileri incelenmişlerdir. Örnek olarak; harmonik barındıran bir elektrik enerji sisteminin modeli MATLAB/SIMULINK programı ile oluşturulmuştur. Bu sisteme, öncelikle klasik kompanzasyon sistemi uygulanmış, daha sonra filtreli kompanzasyon sistemi uygulanarak bunun sistem üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiş, sonuçlar üzerinde yorumlar yapılmıştır.

Barış ENGİN ve Adnan KAYPMAN, 2009. “Enerji verimliliği ve tasarrufu açısından kompanzasyon ve enerji kalitesi çalışmaları” başlıklı bir makale hazırlamışlar ve bu makalede, bir sanayi tesisindeki kompanzasyon sistemi örnek olarak alınmış ve sadece kondansatör ile yapılan bir kompanzasyon ile harmonikleri de bastırmayı hedefleyen filtreli kompanzasyon karşılaştırılması yapılmıştır. Her iki durum için harmonik distorsiyonları ve harmonik miktarları verilerek, enerji verimliliği ve tasarrufu açısından kompanzasyonun faydaları açıklanmıştır. Enerji kalitesi ve verimliliğinin sağlanması için bir sanayi tesisinde yapılan çalışmalar örnekler verilerek elde edilen sonuçlar açıklanmıştır. Buna göre sistemdeki harmonik akımlarının ve reaktif gücün azaltılmasıyla önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür.

2. MATERYAL

2.1. Harmonikler

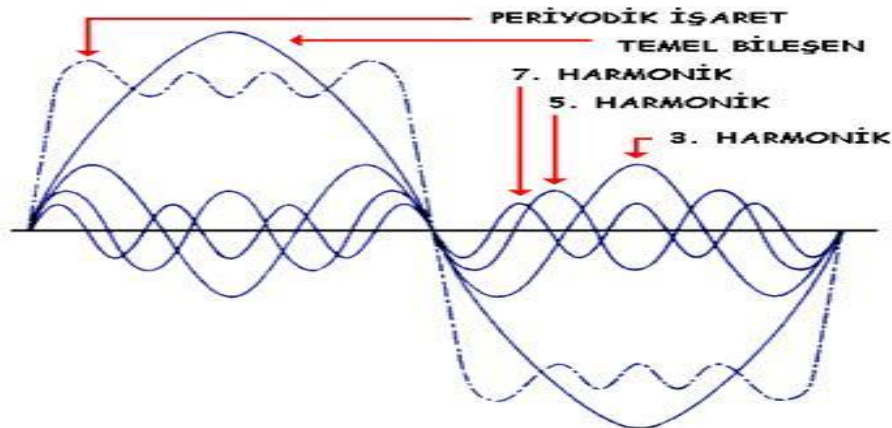
Yarı iletken elemanların tabiatı gereği ve sanayide kullanılan bazı nonlinear yüklerin (transformatör, ark fırınları, v.b.) etkisiyle; akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalara harmonik denir (Tanrıöven ve İnce, 2007).



Şekil 2.1. Nonlineer bir yükün sebep olduğu harmonik bozulma devresi

Çizelge 2.1. Frekansı 50 Hz olan bir dalganın bazı harmoniklerinin frekansı (Efe, 2006)

Temel Bileşen (1. Harmonik)	50 Hz.
2. Harmonik	100 Hz.
3. Harmonik	150 Hz.
4. Harmonik	200 Hz.
5. Harmonik	250 Hz.
6. Harmonik	300 Hz.



Şekil 2.2. Frekansı 50 Hz. olan bir dalganın bazı harmoniklerinin şekilleri (Efe, 2006)

Bir işaretin harmonik bozunumunun matematiksel ifadesi,

$$I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.1)$$

I_n = n. harmonik RMS değeri, I_F = Temel bileşenin RMS değeri olmak üzere,

$$THD = \frac{I_H}{I_F} \quad (2.2)$$

şeklinde hesaplanabilir (Efe, 2006).

Toplam harmonik bozunumun yüzdesi, denklem (2.3) ile ifade edilir (Efe, 2006).

$$i = a + bU + cU^2 + dU^3 + \dots \quad (2.3)$$

Nonlinear bir elemanın akım ve gerilim arasındaki ilişkisi çoğu devreler için,

$$I = a + bU + cU^2 + dU^3 + \dots \quad (2.4)$$

şeklinde. Burada I, nonlinear elemanın akımı, U ise gerilimidir. Denklem (2.3) ve (2.4)'teki a, b, c ve d katsayılarıdır. Bu sabit değerler her eleman için farklı değerlere sahip olup elemanların bazılarında bulunabilir, bazılarında ise bulunmayabilirler (Efe, 2006).

2.1.1. Devre büyüklüklerinin tanımı

Harmonik bileşenleri içeren akım ve gerilimin ani değerleri,

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t + \gamma_n) \quad (2.5)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn} \sin(n\omega t + \delta_n) \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir. Akım ve gerilimin n. harmonik için etkin değerleri sırayla, denklem (2.7) ve denklem (2.8) ifadelerinden tespit edilir.

$$I_n = \frac{I_{mn}}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

$$V_n = \frac{V_{mn}}{\sqrt{2}} \quad (2.8)$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.9)$$

$$V = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2} \quad (2.10)$$

Akım ve gerilimin etkin değerleri sırayla, denklem (2.9) ve denklem (2.10) ifadelerinden tespit edilir. Bu denklemlerde I_0 akım ve V_0 gerilimin doğru bileşeni, n değeri harmonik mertebesi, I_{mn} ve V_{mn} , n . harmonik akım ve gerilimin tepe değerini göstermektedir. γ_n n . harmonik akımının faz açısı, δ_n ise n . harmonik gerilimin faz açısını ifade etmektedir (Adak, 2003). Böyle büyüklüklerin bulunduğu bir devrede aktif güç ifadesi, denklem (2.11) ile reaktif güç ise denklem (2.12) ile tanımlanır.

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^N V_n I_n \cos(\delta_n - \gamma_n) \quad (2.11)$$

$$Q = \sum_{n=1}^N V_n I_n \sin(\delta_n - \gamma_n) \quad (2.12)$$

Görünür güç, denklem (2.13) ile ifade edilir.

$$S = VI = \sqrt{\sum_{n=0}^N V_n^2} \sqrt{\sum_{n=0}^N I_n^2} \quad (2.13)$$

Harmonikli güç sistemlerinde tanımlanan diğer büyüklük distorsiyon gücüdür. Denklem (2.14)'ten distorsiyon gücü, denklem (2.15)'teki gibi ifade edilir.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.14)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (2.15)$$

Farklı frekanslı akım ve gerilim bileşenlerin çarpımından oluşan bu gücün fiziksel anlamı ve reaktif güç ile ilişkisi halen tartışılmaktadır (Adak, 2003).

2.1.1.1. Toplam harmonik distorsiyonu

Harmonik bileşenlerin temel bileşene göre seviyesini belirlemede dikkate alınan en önemli ölçüttür. Sinüzoidalden uzaklaşmayı, distorsiyonu diğer bir deyişle bozulmanın derecesini belirtir. Hem gerilim, hem de akım için verilebilir.

Gerilim toplam harmonik distorsiyonu (gerilim bozulma faktörü) THD_v ,

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.16)$$

şeklindedir. Akım toplam harmonik distorsiyonu (akım bozulma faktörü) THD_I ise,

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.17)$$

şeklindedir (Kakilli ve ark., 2008).

2.1.1.2. Distorsiyon faktörü

Akım ve gerilim için distorsiyon faktörü sırayla, denklem (2.18) ve denklem (2.19) ifadeleri ile belirtilir (Adak, 2003).

$$DF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} \quad (2.18)$$

$$DF_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V} \quad (2.19)$$

2.1.1.3. Tepe faktörü (Crest factor)

Sinüzoidal olmayan dalgalar için tepe faktörü,

$$CF = \frac{\text{Dalganın tepe değeri}}{\text{Dalganın efektif değeri}} \quad (2.20)$$

ifadesi ile belirtilir (Adak, 2003).

2.1.1.4. K faktörü

Kuru tip transformatörlerin K faktörü, nonlinear yüklenen ve genellikle 500 KVA'nın altındaki transformatörlerde yüklenme kapasitesinin bir ölçütüdür. Bu faktör, imalatçılar tarafından ifade edilen bir büyüklük olup,

$$K_{Faktörü} = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 (pu) n^2 \quad (2.21)$$

ile ifade edilir. I_n birim değer $(pu)t$ olarak transformatörün akım bileşenidir (Adak, 2003).

2.1.1.5. Harmonik faktörü

Her bir harmonik bileşenin seviyesini belirlemede kullanılır. Örneğin gerilim için,

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (2.22)$$

V_n = n. harmonik gerilimine ait efektif değeri, V_1 gerilimin temel bileşeninin efektif değerini göstermektedir (Adak, 2003).

2.1.1.6. Toplam talep distorsiyonu

Çekilen yük akımına ait distorsiyonu belirlemede kullanılır. Toplam talep distorsiyonu (TTD),

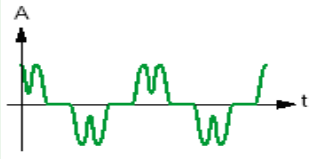
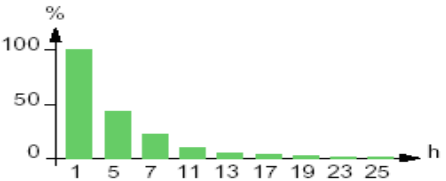
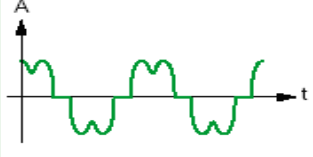
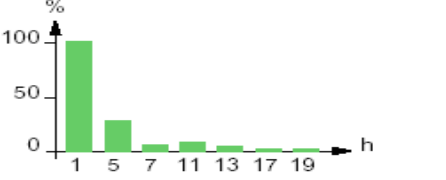
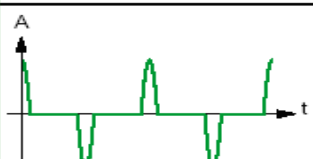
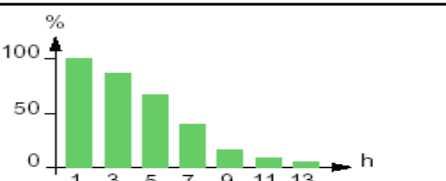
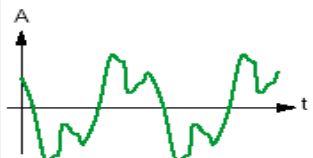
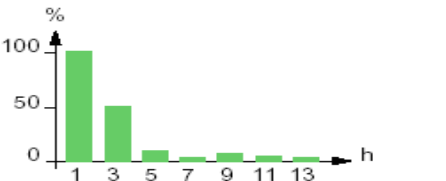
$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (2.23)$$

ile belirtilir. Burada I_n harmonik akımını, I_L ise 12 ay boyunca talep edilen maksimum akımların matematiksel ortalamasını göstermektedir (Adak, 2003).

2.1.2. Harmoniklerin sebepleri

- ✓ Manyetik devrelerde doyma,
- ✓ Güç kontrol elemanları,
- ✓ Lineer olmayan yükler,
- ✓ Doyma bölgesinde çalışan transformatörün mıknatıslanma akımları,
- ✓ İndüksiyon ısıtma,
- ✓ Yarı iletken kontrollü cihazlar,
- ✓ Tristörlü dinamik kompanzasyon,
- ✓ Deşarj lambaları,
- ✓ Kesintisiz güç kaynakları,
- ✓ Bilgisayarlar,
- ✓ Flouresant lambalar, elektronik balastlar,

- ✓ Akü şarj sistemleri,
- ✓ Elektrik makinelerindeki diş ve olukların meydana getirdiği harmonikler,
- ✓ Çıkık kutuplu senkron makinelerde hava aralığındaki relüktans değişiminin oluşturduğu harmonikler,
- ✓ Senkron makinelerde ani yük değişimleri ile manyetik akı dalga şekillerindeki bozulmalar ve senkron makinelerinin hava aralığı döner alanının oluşturduğu harmonikler,
- ✓ Doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin mıknatıslanma akımları,
- ✓ Şebekedeki nonlinear yükler; doğrultucular, eviriciler, kaynak makineleri, ark fırınları, gerilim regülatörleri, frekans çeviriciler, v.b.,
- ✓ Motor hız kontrol düzenleri,
- ✓ Doğru akım ile enerji nakli (HVDC),
- ✓ Statik VAR generatörleri,
- ✓ Elektrikli taşıtların yaygınlaşması ve bunların akü şarj devrelerinin etkileri,
- ✓ Enerji tasarrufu amacıyla kullanılan aygıt ve yöntemler,
- ✓ Direkt frekans çevirici ile beslenen momenti büyük hızı küçük motorlar.

Nonlinear Yükler	Akım Dalga Formu	Spektrum	THD _i
Hız Kontrol Sistemleri			% 44
Doğrultucu ve Şarj Edici			% 28
Bilgisayar/İşlemci			% 115
Fluoresant Lamba			% 53

Şekil 2.3. Belli başlı harmonik kaynaklı yüklerin karakteristikleri (Tanrıöven ve İnce, 2007)

2.1.3. Harmonik kaynakları

2.1.3.1. Transformatörler

Transformatörler, demir çekirdeği bulunan bobinden oluştuğu için harmoniklere yol açmaktadır. Demir çekirdeğinin mıknatıslama karakteristiği lineer olmadığından, transformatör doyuma gitmekte ve neticede harmonikler üretmektedir (Dommel ve ark., 1986).

Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nüvede daha çok doymaya ve harmonik akımların seviyesinde hızla artmaya sebep olabilir (Szabados ve Lee, 1981).

Mıknatıslama akımı harmonikleri yüklenmenin az olduğu günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır. Çünkü sistem yükü az olup, gerilim yükselerek aşırı uyarma meydana gelir, aşırı uyarmayla oluşan akım harmoniklerinde 3. 5. ve 7. harmonikler etkili olur (Arrillaga ve ark., 1985).

Transformatörlerde genelde iki türlü harmonik oluşur. Bu harmonikler akım harmonikleri ve gerilim harmonikleri olarak sınıflandırılır. Akım harmonikleri ilave ısı kayıpları ($I^2.R$ 'den) oluşturur, çekirdek demir kayıplarını artırır. Haberleşme devreleri üzerinde magnetik etkiler yapar. Gerilim harmonikleri ise transformatör endüktansı ile transformatöre bağlı tüketicilerin kapasitesi arasında rezonansa girmeye neden olur. Dielektrik zorlanmayı artırır. Haberleşme devrelerine elektrostatik etki meydana gelir (Adak, 2003).

2.1.3.2. Döner makineler

Döner makineler makine ve endüvi oluk sayısına bağlı olarak harmonik üretirler. En tabii harmonik üreticileri generatörlerdir. Alan şekline ve manyetik devrenin doymaya ulaşmasına ya da magnetik direncin değişimine bağlı olarak harmonik üretirler.

Bu nedenlerden dolayı generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir. Generatör dört iletkenli bir şebekeye bağlı ise, bu koşulda nötr hattı, zigzag bağlı bir bobinle oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Stator sargı adımlarının uygun seçildikten sonra kırılganlık yolu ile alan eğrisindeki 3. harmonik ile 5. ve 7. harmonikler gerilim eğrisinde tamamen ortadan kaldırılabilirler. Burada dikkate değer en düşük harmonik 2. harmoniktir (Arrillaga ve ark., 1985).

2.1.3.3. Güç elektroniği elemanları

Yarı iletken elemanlar, çalışma karakteristiklerinin lineer olmayan özelliğinden dolayı harmonikler üretirler.

2.1.3.4. Doğru akım ile enerji nakli (HVDC)

Güç elektroniği elemanları ile AC/DC– DC/AC yapıldığı için şebekede birer harmonik kaynağı gibi davranırlar.

2.1.3.5. Statik VAR generatörleri

Reaktif güç kompanzasyonunda değişken yüklerin olduğu ve bundan dolayı hızlı anahtarlamanın istendiği durumlarda statik anahtarlama kompanzasyon sistemleri kullanılır. Statik VAR kompanzasyonları genel itibari ile sinüzoidal dalganın belirli aralıklarla kesilmesine neden olur.

2.1.3.6. Ark fırınları

Ark fırınları, kaynak makineleri gibi normal işlemlerini ark ile sürdüren tesisler önemli harmonik kaynakları arasında sayılabilirler. Harmoniğin üretilme nedeni, ark direncinin lineer olmaması yani ateşleyici elektrotlarının akım gerilim karakteristiğinin lineer olmayışdır (Arrillaga ve ark., 1985).

2.1.3.7. Kesintisiz güç kaynakları

Kesintisiz güç kaynakları, güç elektroniği elemanları ile anahtarlama yaparak alternatif gerilimi doğru gerilime çevirip, enerjinin depolanması ve sonra evirici yardımı ile alternatif akıma çevirerek elektrik kesintisi anında tüketiciye iletmeye prensibine göre çalışır. Hem doğrultucu hem de evirici tarafında harmonikler oluştururlar.

2.1.3.8. Gaz deşarjlı aydınlatma

Flouresant, civa ve yüksek basınçlı sodyum lambalar, xenon v.b. gibi gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, şebekeden harmonikli akımların çekilmesine neden olurlar. Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'te flouresant lambaya ait harmonik değerleri verilmiştir (Doggan ve Morrison, 1993).

Çizelge 2.2. Flouresant lamba harmonik distorsiyon değerleri (Gerilim için) (Adak, 2003)

Harmonik bileşenler (n)	Magnetik Balast (THD _v)		Elektronik Balast (THD _v)	
	Faz	Nötr	Faz	Nötr
1	12,8	171,2	16,3	44
3	10,6	169,8	3,6	11,9
5	6,7	16,6	11,7	31,6
7	1,6	3,3	5,2	3,7
9	0,8	12,7	3,9	20,1
11	0,2	2,3	3,5	2

Çizelge 2.3. Flouresant lamba harmonik distorsiyon değerleri (Akım için) (Adak, 2003)

Harmonik bileşenler (n)	Magnetik Balast (THD _i)		Elektronik Balast (THD _i)	
	Faz	Nötr	Faz	Nötr
1	12,8	171,2	16,3	44
3	10,6	169,8	3,6	11,9
5	6,7	16,6	11,7	31,6
7	1,6	3,3	5,2	3,7
9	0,8	12,7	3,9	20,1
11	0,2	2,3	3,5	2
13	0,3	2,5	3,4	4,1
15	0,1	3,4	2,1	10,1
17	0,1	0	2,1	3,2
19	0	0,7	2,2	3,1
21	0	0,5	2	9,1
23	0	0	1,7	1,5
25	0	0,4	1,9	3,7
27	0	0	1,7	8,2
29	0	0	1,5	3
31	0	0	1,5	3,5
33	0	0	1,4	6,4

2.1.3.9. Elektronik balastlar

Kompakt flouresant lambalarda kullanılan elektronik balastlar da önemli harmonik kaynaklarıdır. Çizelge 2.4'te magnetik balastlı bir flouresant lamba harmonik akımlarının temel bileşene oranı verilmiştir (Doggan ve Morrison, 1993).

Çizelge 2.4. Magnetik balastlı flouresant lamba harmonik spektrumu (Doggan ve Morrison, 1993)

Harmonikler (n)	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
% 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

2.1.3.10. Fotovoltaik sistemler

Elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan üreten sistemler olup, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için konvertörleri kullanırlar. Dolayısıyla harmoniklere yol açarlar (Kocatepe, 1995).

2.1.3.11. Bilgisayarlar

Bilgisayar sistemleri, hem harmonik üreticisidir. Hem de harmonik bileşenlerden son derece etkilenirler (Adak, 2003).

2.1.4. Harmoniklerin etkileri

Harmonikler genel olarak nonlinear elemanlar ile nonsinüzoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması sinüzoidal dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar nonsinüzoidal dalga olarak adlandırılır. Harmonikler güç sistemlerinde; ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi v.b. gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açar (Tanrıöven ve İnce, 2007).

Sinüzoidal alternatif akım uygulanan bir alıcının şebekeden harmonikli akım çekmesi bu alıcının yapısı gereğidir. Yani; alıcı nominal çalışması sırasında harmonik meydana getirecek akım çekiyor demektir. Harmonik üreten bu alıcılardan başka, karakteristikleri itibariyle lineer oldukları halde harmonikli akımlara sebebiyet veren alıcılarda vardır. Bu durum ise alıcıya uygulanan gerilimin nonsinüzoidal olmasından kaynaklanmaktadır. Alternatif akımın üretilmesi sırasında alternatörlerde yapılan gerekli iyileştirici önlemler yardımıyla elektrik enerjisi mümkün olduğunca sinüzoidale yaklaştırılmaktadır. Fakat lineer bir alıcıya aynı şebekeye bağlı diğer nonlinear yükler tarafından etki edilmektedir (Tanrıöven ve İnce, 2007).

Enerji sistemlerinde harmoniklerle gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunlar maddeler halinde şöyle verilebilir (Tanrıöven ve İnce, 2007):

- ✓ Generatör ve şebeke geriliminin bozulması,
- ✓ Gerilim düşümünün artması,
- ✓ Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma nedeniyle zarar görmesi,
- ✓ Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması,

✓ Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmanın meydana gelmesi,

- ✓ Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler,
- ✓ Uzaktan kumanda, yük kontrolü v.b. yerlerde çalışma bozuklukları,
- ✓ Rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar,
- ✓ Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları,
- ✓ İzolasyon malzemesinin delinmesi,
- ✓ Elektrik aygıtlarının ömrünün azalması,
- ✓ Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma,
- ✓ Mikro bilgisayarlar üzerinde hatalı çalışma
- ✓ Elektromekanik cihazlarda ve kablolarda ısınma,
- ✓ Makinelerde mekanik titreşimler (vibrasyon),
- ✓ Ateşleme devrelerinin anormal çalışması,
- ✓ CAD/CAM terminallerinde hafızaların silinmesi,
- ✓ Elektronik kart arızaları,
- ✓ Güç kondansatörlerinde güç kayıpları, delinmeler ve patlamalar,
- ✓ Kompanzasyon sigortalarında atmalar,
- ✓ Kesici ve şalterlerde açmalar,
- ✓ Röle sinyallerinin bozulması ve anormal çalışması,
- ✓ Enerji kayıpları.

Çizelge 2.5. Harmoniklerin etkileri ve izin verilen normal seviyeleri

Cihaz	Etkileri	Limitler
Güç Kondansatörleri	Aşırı ısınma, erken eskime (bozulma), rezonans.	MV'de 12 saat/gün için veya AG'de 8 saat/gün için (THD $I < \%83$)'de $I < 1.3$ veya $U < 1.1 U_n$
Motorlar	Kayıplar ve aşırı ısınma. Tam yükte kullanılacak kapasitenin düşmesi. Darbe torku (titreşimler, mekanik stres) Gürültü kirliliği.	$HVF = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} U_h^2 / h} \leq \%2$
Trafoalar	Kayıplar (omik-demir) ve aşırı ısınma. Mekanik titreşimler. Gürültü kirliliği.	
Devre Kesiciler	İstenmeyen açılma (aşırı gerilim tepe değerleri vb.)	$U_h / U_1 \leq \%6$ ile 12
Kablolar	Ek elektrik ve ohm kayıpları (üçüncü harmonik akımları mevcutsa, özellikle nötr iletkende)	$THD \leq \%10$ $U_h / U_1 \leq \%7$
Bilgisayarlar	Çalışma problemleri.	$U_h / U_1 \leq \%5$
Güç Elektronikleri	Dalga formu ile ilgili problemler (haberleşme, senkronizasyon).	

Bu etkiler içinde teknik ve ekonomik yönden en olumsuz sonuçlardan birincisi omik direnç içeren tüm tesis elemanları üzerinde ek harmonik kayıplara yol açmaktadır. İkincisi ise ölçü ve kayıt cihazlarındaki istenmeyen hata miktarlarının oluşması, bir başka deyişle kayıt ve ölçüm hatalarının artmasıdır.

2.1.5. Harmonik bozulmanın giderilmesi

Harmonikleri bastırmanın veya en azından etkilerini azaltmanın olası dört yolu vardır (Tanrıöven ve İnce, 2007).

2.1.5.1. Oluşmuş harmonik akımlarını azaltma

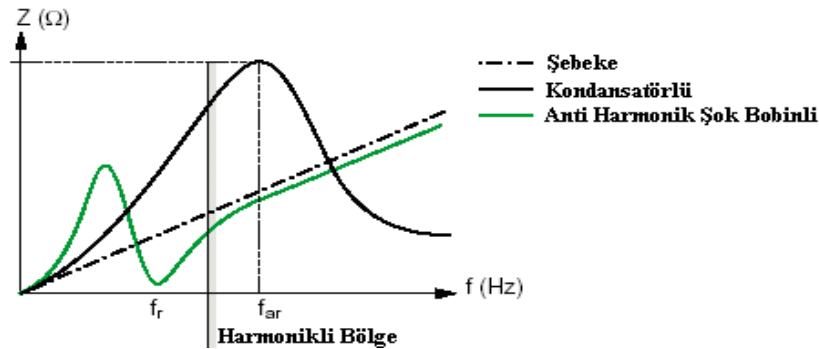
Bunun için üç farklı yöntem vardır:

✓ Güç kaynağına seri olarak 3 fazlı bir şok bobini takılarak (veya frekans değiştirici için DC hattına entegre edilmektedir) hattın akım harmonikleri (özellikle de sayıca fazla olan harmonikleri) ve böylece de enversör bağlantı noktasındaki bozulma ve akım tüketiminin RMS değeri azaltılmaktadır. Şok bobinini, harmonik üreticisini etkilemeden takmak ve şok bobinlerini birden fazla tahrik için kullanmak mümkündür.

✓ 12 fazlı doğrultucu ile akımlar birleştirilerek 5 ve 7 gibi düşük sıradaki harmonikler şebeke tarafında ortadan kaldırılır (genellikle büyük genliklerden dolayı en fazla kesintiyi bunlar yaratmaktadır). Bu çözüm bir trafo ile iki sekonder sarım (yıldız ve üçgen) gerektirmektedir ve sadece $12k \pm 1$ sayılı harmonikleri üretmektedir.

✓ Kompanzasyon tesisatı içerisinde değişiklikler yapmayı içerir. Bunlar:

- Tesisatın kısa devre gücünü artırma,
- Cihazın güç değerini azaltma,
- Kirletici yükleri denetim altına alma,
- Koruyucu cihazlar ve kondansatörlerin gereğinden büyük boyutlandırılmasıdır.



Şekil 2.4. Anti-harmonik şok bobininin tesisat empedansı üzerindeki etkileri

2.1.5.2. Devre kesiciler

Harmonikler koruyucu cihazların istem dışı açılmasına neden olabilir, bunu önlemek için koruyucu cihazları seçerken dikkatli olunmalıdır. Devre kesicilere iki tip açma cihazı monte edilebilir; termik-manyetik veya elektronik. Termik-manyetik devre kesicilerin ısı sensörleri özellikle harmoniklere karşı duyarlıdır ve harmoniklerinin varlığının neden olduğu iletkenlerin üzerindeki gerçek yükü tanımlayabilir. Bu nedenle bunlar, düşük akım devrelerinde, özellikle evsel ve endüstriyel uygulamalar için çok uygundur.

2.1.5.3. Güç değerini düşürme

Bu çözüm bazı cihazlara uygulanabilmektedir ve harmoniklerin neden olduğu kesintiye karşı basit ve genellikle yeterli bir tepkidir.

2.1.5.4. Filtreleme

Elektrik enerji sistemine yerleştirilen ve istenilen harmonik akımlarının süzülmesini sağlayan devrelere harmonik filtresi denir. Harmonik filtrelerinin amacı akım veya gerilimdeki harmonik derecelerinin etkilerini azaltmaktır. Pasif ve aktif filtre olarak iki çeşit harmonik filtresi bulunmaktadır.

2.1.5.4.1. Pasif filtreler

Pasif filtreler, kaynak ile alıcı arasına konulan ve temel frekans dışındaki bileşenleri yok etmek için tasarlanan, kondansatör (C), endüktans (L) ve bazı durumlarda direnç (R) elemanlarından oluşan devrelerdir.

Pasif filtreler, seri pasif filtreler ve paralel (şönt) pasif filtreler olmak üzere kendi içerisinde iki tiptir. Ayrıca uygulamada çok karşılaşılan bir diğer pasif filtre türü de sistemde bulunan kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamaktır (filtreli kompanzasyon sistemleri).

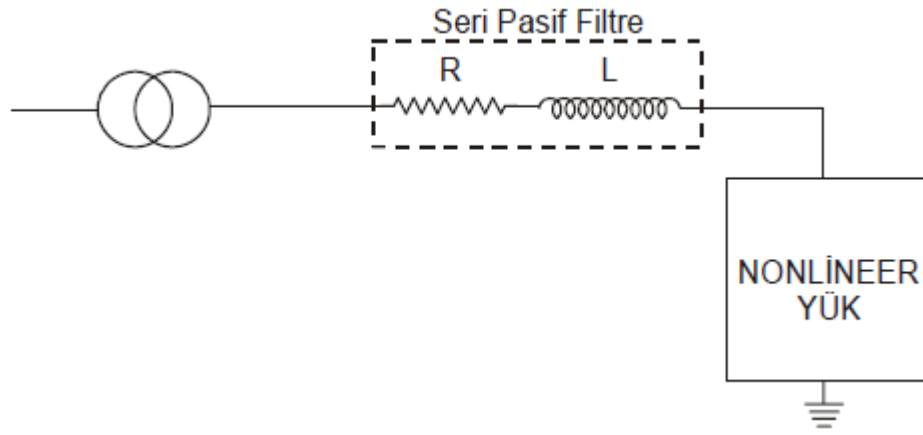
2.1.5.4.1.1. Seri pasif filtreler

Seri filtreler adından da anlaşılacağı gibi, kaynak ile harmonik üreten eleman arasına seri olarak bağlanan endüktans (L) elemanından oluşmaktadır. (f) frekans olmak üzere seri bağlanan bu empedans,

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.24)$$

denklem (2.24)'e göre harmonik frekanslarına yüksek empedans göstererek onların geçişlerini engeller. Temel frekansta ise düşük empedans gösterirler. Seri filtre uygulamasına örnek bir devre Şekil 2.5'te verilmiştir (Tunçalp ve Sucu, 2006).

Seri filtreler uygulamada; AC motor sürücü devrelerinin ve yüksek güçlü AC/DC inverterlerin girişine bağlanır. Seri filtrelerin uygulanmasındaki zorluklar; tüm yük akımının filtre üzerinden geçmesi, tam hat gerilimleri için yalıtım zorunluluğu ve hatta gerilim düşümüne neden olması şeklinde sıralanabilir (Tunçalp ve Sucu, 2006).

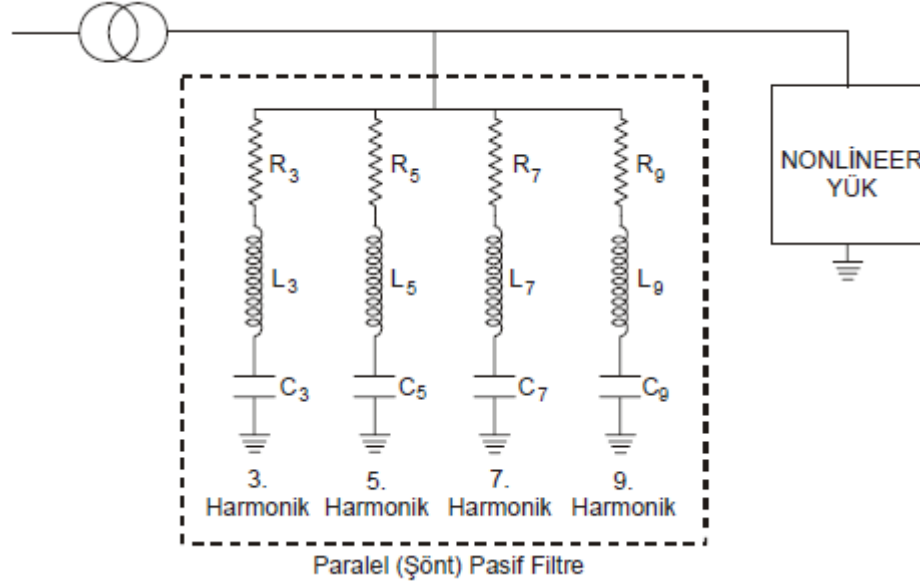


Şekil 2.5. Seri pasif filtre için bir örnek

2.1.5.4.1.2. Paralel pasif filtreler

Paralel (şönt) pasif filtreler, harmonik kaynağı ile şebeke arasına kondansatör (C), endüktans (L) ve bazı durumlarda direnç (R) elemanlarının paralel olarak bağlanmasından oluşan devrelerdir. Paralel pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik frekansı için rezonans şartını sağlayacak L, C değerlerini hesaplayarak bu devreyi güç sistemine bağlamaktır. Her bir harmonik frekansı için ayrı rezonans kolları oluşturularak bu kolların güç sistemine bağlanması gerekmektedir. Ancak bu işlem en etkin şekilde diğer bir ifadeyle genlik değeri yüksek harmonik frekansları için yapılmalıdır. Her harmonik bileşeni için ayrı bir rezonans kolu oluşturmak optimum bir çözüm olmayacağından, sadece genlik değeri yüksek harmonik frekansları için rezonans kolu oluşturulur. Genliği yüksek olmayan harmonik frekansları için ise bunların etkinliğini azaltacak tek bir rezonans kolu oluşturmak yeterli olacaktır. Pasif filtre için örnek bir devre (Tek ayarlı paralel pasif filtre) Şekil 2.6'da görülmektedir. Şönt filtrelerin kullanılmasının en büyük sakıncası, güç sistemiyle paralel rezonansa girebilmesidir. Bu yüzden güç sistemine paralel pasif filtre uygulanmadan önce sistemin ayrıntılı bir analizinin yapılması gerekmektedir.

Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler, çift ayarlı filtreler, otomatik ayarlı filtreler, yüksek geçiren sönümlü filtreler olmak üzere dört farklı paralel pasif filtre çeşidi vardır (Tunçalp ve Sucu, 2006).



Şekil 2.6. Pasif filtre için bir örnek (Tek ayarlı paralel pasif filtre)

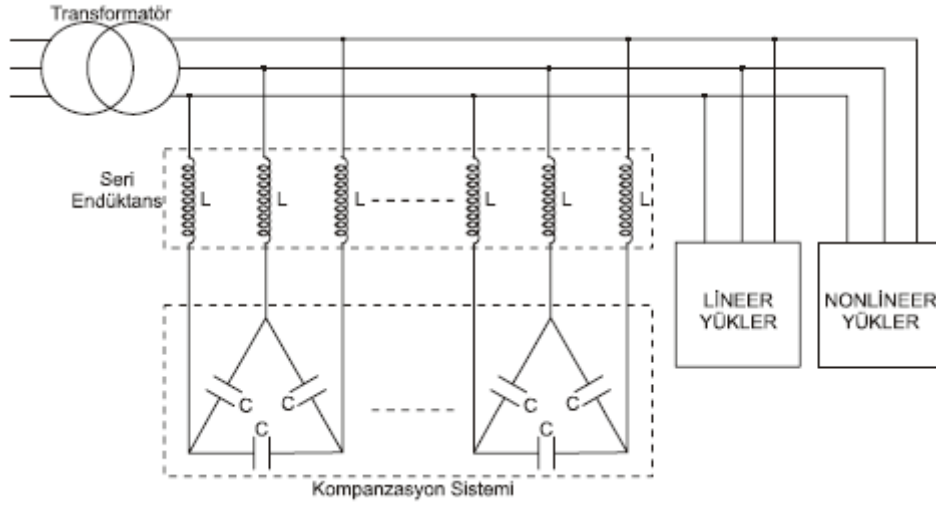
Burada; (R_n) n. harmonik mertebesi için rezonansa getirilen kapasite ve endüktans elemanının iç direnci (Ω), (X_{L_n}) n. harmonik mertebesi için kapasite elemanı ile rezonansa sokulan endüktans (Ω) ve (X_{C_n}) n. harmonik mertebesi için endüktans elemanı ile rezonansa sokulan kapasitanstır (Ω).

2.1.5.4.1.3. Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamak (Filtreli kompanzasyon sistemleri)

Bu teknik, harmonikleri önlemede en etkisiz yöntemlerden biridir. Ancak en kullanışlı ve en ekonomik olanıdır. Tekniğin prensip şeması Şekil 2.7’de verilmiştir (Tunçalp ve Sucu, 2006).

Harmoniklerin, elektrik enerji sistemlerindeki gözle görülen en büyük etkileri kompanzasyon sistemleri üzerinde meydana gelmektedir. Harmonikler kondansatörlerin kapasitesinde değişmelere yol açmakta ve ömürlerini azaltmaktadır. Bu etkileri azaltabilmenin en pratik ve en ekonomik yolu, kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamaktır. Böylece, harmonikli akımlara karşı seri endüktans sayesinde yüksek empedans gösterilerek kompanzasyon sistemine geçmesi önlenmekte ve bu seri

endüktansla kompanzasyon sisteminin kapasitansı bir filtre görevi görerek harmoniklerin etkinliğini azaltmaktadır (Tunçalp ve Sucu, 2006).



Şekil 2.7. Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamak

Bu sistemler tesis edilirken seçilecek olan endüktanslara, her firmanın kendi endüktansları için hazırladığı tablolara bakılarak karar verilmektedir. Bu seçim için bazı kriterler vardır. Bunların en önemlisi p faktörüne karar vermektir. Bu faktör;

$$p = \frac{X_L}{X_C} \quad (2.25)$$

denklemleriyle belirlenmektedir. Burada; (X_L) kompanzasyona seri bağlanacak olan endüktansın temel frekanstaki endüktif reaktansı (Ω), (X_C) kompanzasyon sisteminin temel frekanstaki kapasitif reaktansıdır (Ω) (Erkan, 1996).

Kompanzasyon sistemine seri bağlanan endüktanslar, kompanzasyon uçlarındaki gerilimin bir miktar yükselmesine sebep olmaktadır. Bunun sebebi, gücün sabit kalması istendiği için kompanzasyon sisteminden akan akım sınırlandırıldığından kompanzasyon uçlarındaki gerilimin yükselmesidir. Bu yüzden sistem için seçilen kapasitanslar şebeke geriliminden daha büyük gerilimlere dayanıklı olmalıdır (Erkan, 1996). Bu;

$$U_C = \frac{U}{1-p} \quad (2.26)$$

ile hesaplanabilir. Burada; (U_C) kapasitans gerilimi (V), U şebeke gerilimini (V) ifade eder.

Eğer kapasitanslar daha düşük gerilim ile çalışırlarsa yeni güçleri,

$$Q_2 = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 Q_1 \quad (2.27)$$

ile hesaplanmalıdır. Burada; (Q_1) kompanzasyon sisteminin nominal çalışma gerilimi altında üreteceği reaktif güç (VAr), (Q_2) gerilimin değişmesi sonucunda kompanzasyon sisteminin üreteceği reaktif güç (VAr), (U_1) kompanzasyon sisteminin nominal çalışma gerilimi (V) ve (U_2) değişen gerilimin değeridir (V).

Ayrıca, kompanzasyon sistemi seri bağlı reaktörlerin tükettiği

$$Q_L = 3I^2 X_L \quad (2.28)$$

reaktif güç kadar daha az reaktif güç sisteme verecektir.

Burada; (Q_L) seri endüktansların tükettiği reaktif güç (VAr), (I) seri endüktans üzerinden akan akım (A), (X_L) seri endüktansın temel frekanstaki endüktif reaktansdır (Ω) (Tunçalp ve Sucu, 2006).

2.1.5.4.2. Aktif güç filtreleri

Elektrik enerji sistemlerindeki harmoniklerin giderilebilmesi için, düşük maliyetleri yüzünden çoğunlukla pasif filtreler kullanılmaktadır. Ancak uygulamada pasif filtrelerin birçok dezavantajı vardır. Bunlar;

- Filtrede kullanılan elemanların (kondansatör, bobin ve direnç), zamanla değerinde sapmalar olacağından ve buna bağlı olarak filtrenin ayar frekansı da sapacağından filtreleme işlevinde azalmalar olur,
- Zamanla sistemdeki nonlinear yükler arttığında filtre buna bağlı olarak aşırı yüklenerek zarar görebilir,
- Güç sistemindeki elemanlarla filtre elemanları arasında farklı harmonik frekanslarında seri veya paralel rezonans meydana gelebilir.

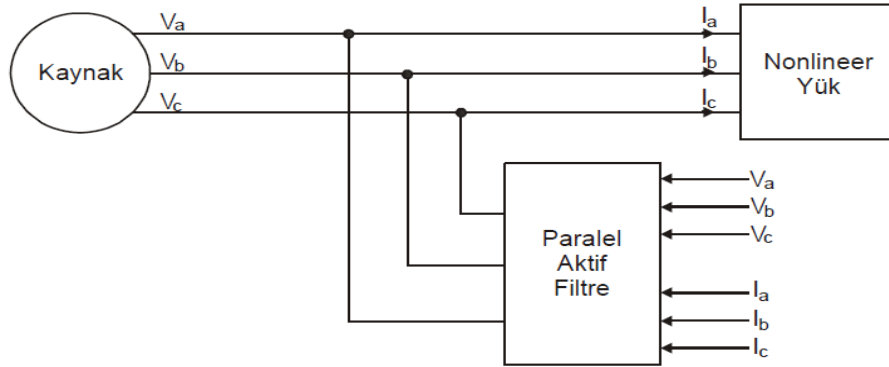
Bu olumsuz etkilerden dolayı, ilerleyen yarı iletken teknolojisi ve kontrol sistemleri sayesinde aktif güç filtreleri geliştirilmiştir. Aktif güç filtreleri, güç sisteminde nonlinear yüklerin ürettiği harmoniklerle aynı genlikte fakat ters fazda bir akımı güç sistemine enjekte ederek çalışır. Bunu yapabilmek için, güç elektroniği anahtarlama

elemanlarını ve sistemdeki harmonikleri belirleyerek anahtarlama elemanını sürebilmek için çeşitli kontrol düzenleri kullanır. Aktif güç filtreleri ile sisteme enjekte edilen akım, sistemdeki harmoniklerin etkinliğini azaltır. Bu, nonlinear yüklerin şebekeden çekmek istediği harmoniklerin aktif güç filtresi ile karşılanması anlamına gelir. Aktif güç filtreleri sistemdeki harmonikleri yok etmek için kullanılmasının yanında, reaktif güç kompanzasyonu, gerilim ve akım dengesizlikleri, nötr akımı kompanzasyonu ve şebeke geriliminin regülasyonu içinde kullanılırlar (Sucu, 2003).

Aktif filtreler, paralel ve seri aktif filtreler olmak üzere ikiye ayrılır.

2.1.5.4.2.1. Paralel aktif filtre

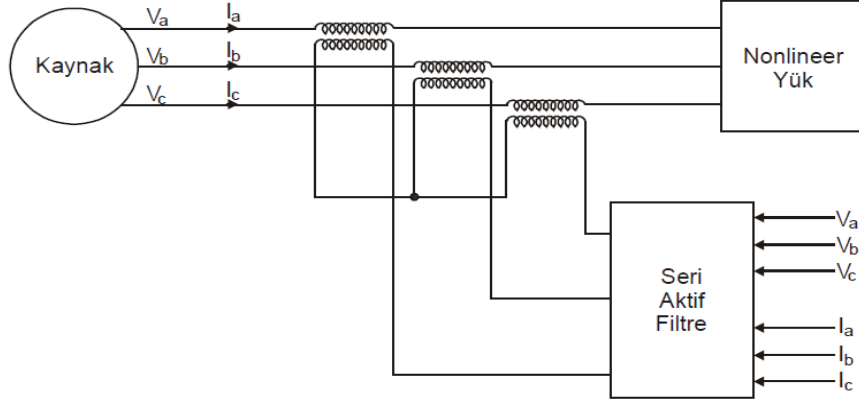
Paralel aktif filtre adından da anlaşılacağı gibi sisteme paralel bağlı olarak çalışır. Yükün çektiği harmonikli akımları tanımladıktan sonra bunlarla aynı genlikte fakat ters fazdaki akımları sisteme enjekte eder. Paralel aktif filtre (Şekil 2.8), akım kaynağı gibi davranan nonlinear yükler için etkilidir. Paralel aktif filtre akım ile ilgili kompanzasyonları (reaktif güç kompanzasyonu, akım dengesizlikleri) yapar (Sucu, 2003).



Şekil 2.8. Paralel aktif filtrenin prensip şeması

2.1.5.4.2.2. Seri aktif filtre

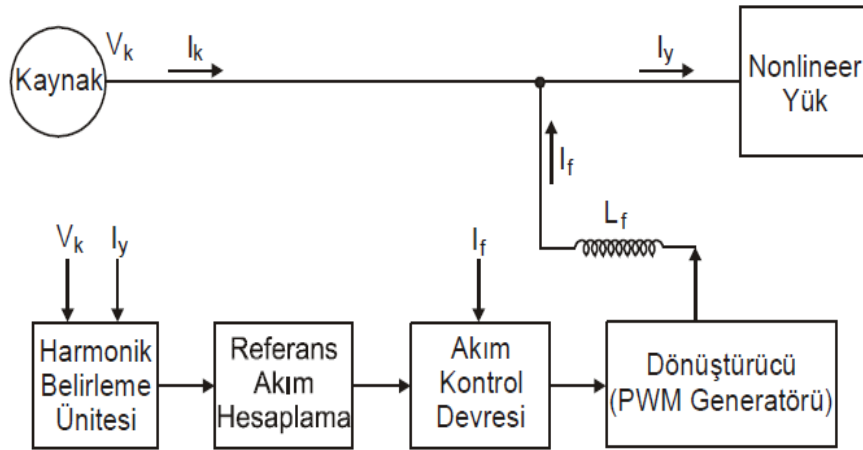
Seri aktif filtreler sisteme bir transformatör ile bağlanır. Seri aktif filtre (Şekil 2.9) ile gerilim harmonikleri elimine edilir. Harmonikli gerilim kaynağı gibi davranan kaynaklar için etkilidir. Seri aktif filtre ile gerilime bağlı kompanzasyonlar (gerilim dengesizlikleri, dalgalanmaları ve regülasyonu) gerçekleştirilir (Sucu, 2003).



Şekil 2.9. Seri aktif filtrenin prensip şeması

2.1.5.4.3. Aktif güç filtresinin yapısı

Aktif güç filtresi, dönüştürücü (PWM Generatörü), akım kontrol devresi ve harmonik belirleme bloğu olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır.



Şekil 2.10. Aktif güç filtresinin blok şeması

Bu şemadaki; (V_k) kaynak gerilimi (V), (I_k) kaynak akımı (A), (I_y) yük akımı (A), (I_f) aktif güç filtresi akımı (A), (L_f) kaynak uçlarındaki gerilim ile filtre tarafından üretilen PWM (Darbe genişlik modülasyonu) gerilimi arasında tampon görevi gören endüktanstır (L) (Sucu, 2003).

Çizelge 2.6. Aktif ve pasif filtrelerin karşılaştırılması (Demirkol, 2006)

KONU	PASİF FİLTRE	AKTİF FİLTRE
Harmonikli akımların kontrolü	Her harmonik frekansı için bir filtre ister	Aynı anda birçok harmonik akımı kontrol edilebilir
Harmonik frekanslarının değişiminin etkisi	Filtrenin etkinliği azalır	Etkilenmez
Empedans modifikasyonu etkisi	Rezonans riski vardır	Etkilenmez
Akım yükselmesi riski	Aşırı yüklenme ve bozulma riski vardır	Aşırı yüklenme riski yoktur
Sisteme yeni yük ilave edilmesi	Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir	Herhangi bir probleme yol açmaz
Sistemdeki temel dalganın frekans değişimi	Değiştirilmesi gerekir	Ayar ile uyum mümkündür
Boyutlar ve ağırlık	Harmonik genliği ve derecesine göre değişken	Küçüktür
Maliyet	İlk maliyet çok düşük ama bakım yüksek	İlk maliyet çok yüksek ama bakım düşük

2.1.6. Harmonik standartları

19.08.2010 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan güncel “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği”nden alınan Çizelge 2.7, Çizelge 2.8 ve Çizelge 2.9’a göre ülkemizde uygulanan harmonik standartları şöyledir.

Çizelge 2.7. Ülkemizde 380 kV iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri

Tek Harmonikler (3’ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3’ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)
5	1.25	3	1.0	2	0.75
7	1.0	9	0.4	4	0.6
11	0.7	15	0.2	6	0.4
13	0.7	21	0.2	8	0.4
17	0.4	>21	0.2	10	0.4
19	0.4			12	0.2
23	0.4			>12	0.2
25	0.4				
>25	0.2+0.2 (25/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 2					

Çizelge 2.8. Ülkemizde 20-154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No. “h”	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. “h”	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. “h”	Harmonik Gerilim (%)
5	1.5	3	1.5	2	1.0
7	1.5	9	0.75	4	0.8
11	1.0	15	0.3	6	0.5
13	1.0	21	0.2	8	0.4
17	0.75	>21	0.2	10	0.4
19	0.75			12	0.2
23	0.5			>12	0.2
25	0.5				
>25	0.2+0.3 (25/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 3					

Çizelge 2.9. Ülkemizde izin verilen azami gerilim fliker şiddeti

Gerilim Seviyesi (V)	Fliker Şiddeti			
	A _{st}	P _{st}	A _{lt}	P _{lt}
V > 154 kV	0,61	0,85	0,25	0,63
34.5 kV < V < 154 kV	0,91	0,97	0,37	0,72
1 kV < V < 34.5 kV	1,52	1,15	0,61	0,85
V < 1 kV	1,52	1,15	0,61	0,85

Çizelge 2.10. O.G., Y.G. ve Ç.Y.G. güç sistemlerinde kabul edilebilir gerilim harmonik limitleri (IEC 61000-3-7) (Efe, 2006)

3'ün katı olmayan tek harmonikler			3'ün katı tek harmonikler			Çift harmonikler		
Harmonik no (h)	Harmonik gerilimi (%)		Harmonik no (h)	Harmonik gerilimi (%)		Harmonik no (h)	Harmonik gerilimi (%)	
	O.G.	Y.G.- Ç.Y.G.		O.G.	Y.G.- Ç.Y.G.		O.G.	Y.G.- Ç.Y.G.
5	5	2	3	4	2	2	1,6	1,5
7	4	2	9	1,2	1	4	1	1
11	3	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,5
13	2,5	1,5	21	0,2	0,2	8	0,4	0,4
17	1,6	1	>21	0,2	0,2	10	0,4	0,4
19	1,2	1				12	0,2	0,2
23	1,2	0,7				>12	0,2	0,2
25	1,2	0,7						

12.11.2008 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan güncel “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmeliği”nden alınan Çizelge 2.11, Çizelge 2.12 ve Çizelge 2.13 göre ülkemizde uygulanan AG harmonik standartları şöyledir.

Çizelge 2.11. Ülkemizde A.G. güç sistemleri için gerilim harmonikleri sınır değerleri

Tek Harmonikler				Çift Harmonikler	
3’un Katları Olmayanlar		3’un Katları Olanlar		Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)
Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)	Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)		
5	% 6	3	% 5	2	% 2
7	% 5	9	% 1,5	4	% 1
11	% 3,5	15	% 0,5	6.....24	% 0,5
13	% 3	21	% 0,5		
17	% 2				
19	% 1,5				
23	% 1,5				
25	% 1,5				

Uluslar arası IEC 519-1992’ye göre standartlar içinde kabul edilen harmonik bozulma değerleri, gerilim için %3, akım için %5 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 2.12. Ülkemizde A.G. güç sistemlerinde akım harmonikleri için maksimum yük akımına (I_L) göre sınır değerler

Tek Harmonikler						
I_{sc}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TTB
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Çift harmonikler, kendinden sonraki tek harmonik için tanımlanan değer %25’i ile sınırlandırılmıştır.

Çizelge 2.13. Ülkemizde A.G. güç sistemlerinde fliker şiddeti için sınır değerler

Fliker Şiddeti Endeksi	Sınır Değerler
P_{st}	≤ 1.0
P_{lt}	≤ 0.8

Çizelge 2.14. Bazı ülkelere ait harmonik standartları (Başman, 2006)

Ülke	Gerilim (kV)	THD_v (%)	V_n/V_1 (Tek)	V_n/V_1 (Çift)
	Genel 2.4- 69 115≤ Özel 2.4- 69	5 1.5 8		
Avustralya	Dağıtım 33≥ İletim 22, 33, 66 110≤	5 3 1.5	4 2 1	2 1 0.5
Fransa	Tüm Gerilimler	1.6	1	0.6
İngiltere	0.415 6.6,11 33, 66 132	5 4 3 1.5	4 3 2 1	2 1.75 1 0.5
İsveç	0.43/0.25 3.3- 24 84≥	4 3 1		

Ülkemizde yürürlükte olan ve O.G., Y.G. ve Ç.Y.G. güç sistemlerinde kabul edilebilir akım harmonik limitlerini gösteren ve 10.11.2010 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan güncel “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği”nden alınan Çizelge A.1’ de verilmiştir.

2.2. Reaktif Güç Kompanzasyonu

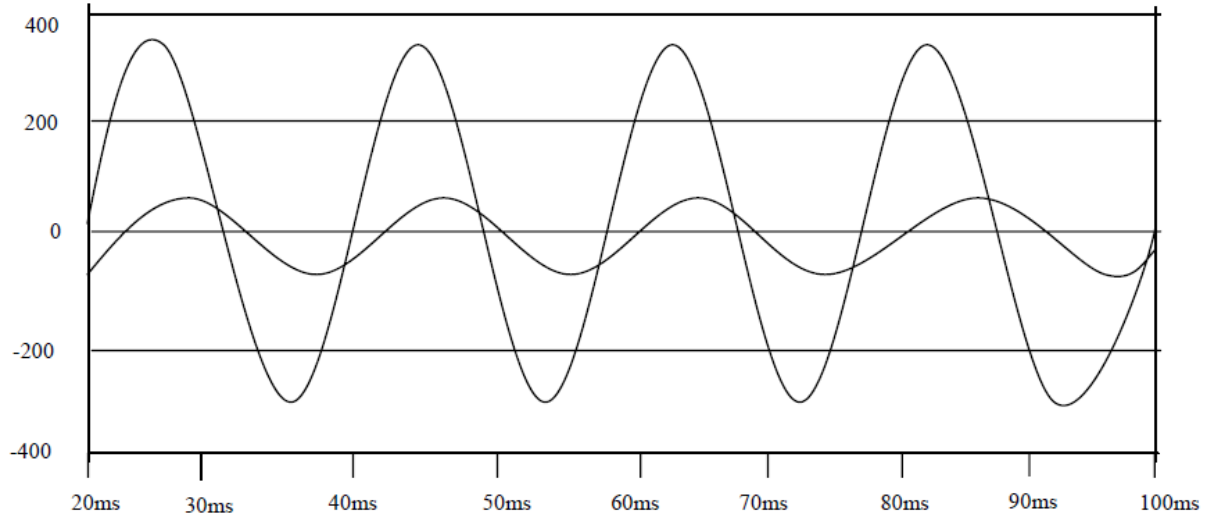
Elektrik enerjisine olan ihtiyacın gün geçtikçe artış göstermesinden dolayı bir enerji krizi ile karşı karşıya kalınmaması için bir yandan yeni enerji kaynakları araştırılırken, diğer yandan mevcut sistemlerde en verimli şekilde yararlanabilmek için bir takım çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan birisi de reaktif gücün kompanze edilmesidir. Yani güç katsayısının düzeltilmesidir. Konu, özellikle ülkemizde elektrik enerjisi ihtiyacının giderek arttığı ve mevcut kaynakların ihtiyacı yeterli ölçüde karşılayamadığı günümüzde daha da önem kazanmıştır.

Alternatif akım tüketicileri şebekeden alternatif akım çekerler. Bu akım aktif (etkin) akım ve reaktif akım olmak üzere iki bileşenden oluşur. Aktif akımın meydana getirdiği aktif güç motorlarda mekanik güce, ısıtıcı cihazlarında ısı enerjisine ve termik güce, aydınlatma cihazlarında ışık enerjisine dönüşür. Reaktif akımın meydana getirdiği reaktif güç ise faydalı güce çevrilemez. Fakat endüksiyon prensibe göre çalışan generatör,

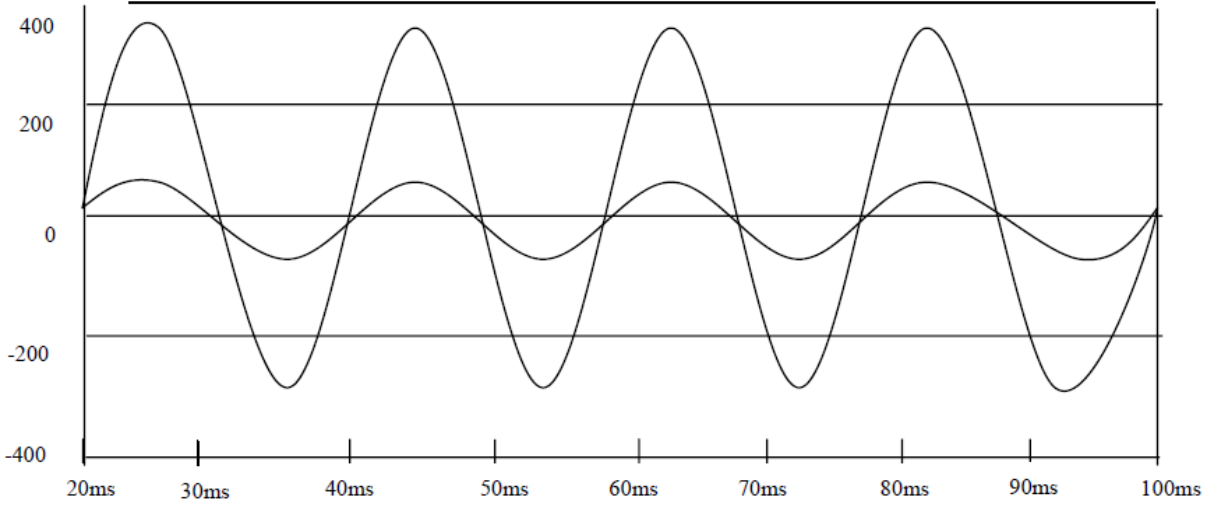
transformatör, bobin ve motor gibi bütün işletme araçlarının normal çalışmaları için gerekli olan magnetik akı reaktif akım tarafından meydana getirilir. Bilindiği gibi, endüksiyon prensibine göre çalışan bütün makineler ve cihazlar, magnetik akının meydana getirmesi için bir mıknatıslanma akımı çekerler, bu mıknatıslanma akımı reaktif akımdır (Bayram, 1991).

Günümüzde reaktif güç kompanzasyonu teknik ve ekonomik bir zorunluluktur. İdeal bir alternatif akım şebekesinde, şebekenin her noktasındaki akım ve gerilim, sabit frekanslı ve harmoniksiz olmalıdır. Ayrıca güç katsayısı da bir veya bire yakın olmalıdır. Bu kaliteyi sağlamak için alternatif akım şebekesinde reaktif güç kompanzasyonu yapmak gerekir. Kompanzasyonun üreticilere ve tüketicilere getirdiği büyük avantajların yanında kompanzasyon sistemleri uygulandıkları işletmelerde bazı teknik problemlerin doğmasına neden olmaktadır. Özellikle büyük güçlü tristör kontrollü doğrultucular, ark fırınları, kaynak generatörleri gibi harmonik üreten cihazların bulunduğu işletmelerde kompanzasyon tesisi kurmadan önce gerekli incelemelerin yapılması ve bir takım önlemlerin alınması gerekir. Aksi halde sistemde rezonans olayları baş gösterebilir (Demirkol, 2006).

Generatörlerde üretilen elektrik enerjisi, iletilmekte, dağıtılmakta son aşamada yükler tarafından kullanılmaktadır. Güç sistemlerinde aktif güç akışının yanında yükün ve sistemin gereksinimini karşılayabilmek için reaktif güç akışı da olmalıdır. Aktif güç generatörlerden yüklere iletilecektir. Oysa reaktif güç için böyle bir zorunluluk yoktur. Reaktif gücün gereksinim duyulan noktaya en yakın yerde üretilmesinde elektrik sisteminin en iyi koşullarda çalıştırılması açısından büyük yararları vardır. Tüketicilerin normal olarak şebekeden çektikleri ve tekrar şebekeye verdikleri endüktif reaktif gücü şebeke yerine, kapasitif reaktif güç alma koşulu ile özel bir reaktif güç üreticisi tarafından sağlanmasına reaktif güç kompanzasyonu denir. Bu işlemin doğal sonucu olarak sistemin belirli noktalarında gözüken güç katsayısı $\cos\phi$ düzeltilecek, başka bir deyişle güç katsayısı bire yaklaştırılacaktır (Demirkol, 2006).



Şekil 2.11. Reaktif güç sisteminde çekilen akım ve şebeke gerilimi



Şekil 2.12. Kompanzasyonlu sistemin düzelttiği gerilim ve akım şekilleri

2.2.1. Kompanzasyonun amacı

Kompanzasyonunun üç ana amacı vardır:

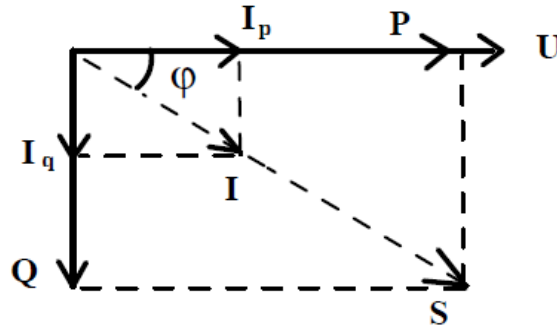
1. Güç katsayısını düzeltmek
2. Gerilim düşümü ve güç kaybını azaltmak
3. Hattın boş yere yüklenmesini önlemek

Güç katsayısının düzeltilmesi, yüke gerekli olan reaktif gücün hemen yükün yanında güç kompanzasyon sistemi yardımı ile üretilmesi olarak tanımlanabilir. Reaktif gücün var olması, enerji iletim hatlarının, transformatörlerin ve generatörlerin gerçek faydalı güce karşı düşen akımdan daha büyük akım taşımalarına yol açar. Bu da sistemin aşırı yüklenmesine neden olur. Bu nedenle güç katsayısının 1 civarında olması istenir.

Gerilim düşümü ve güç kaybı azaltılmasında eğer bir alternatif akım şebekesi sonsuz güçte olursa iç empedansı sifıra yakın bir değer alır. Bu nedenlerle gerilim değişimlerini kompanze etmek, diğer bir deyişle sabit tutmak için yüklerin reaktif güçleri kompanze edilir. Kompanze edilecek birimler yükün olduğu yere bağlanır. Kompanze edilmemiş bir yükün aldığı reaktif güç ya da ani reaktif güç değişimleri, eşdeğer empedansları sıfır olmayan sonlu güçlü gerçek şebekede gerilim değişimlerine neden olur. Bu gerilim değişimleri aynı noktaya bağlı diğer elektrik enerjisi alıcılarının olumsuz yönde etkilenmesine yol açar ve gerilim değişmelerine neden olan yükünde optimum çalışma koşullarını bozar (Demirkol, 2006).

Kompanze edilmemiş bir yükün şebekeden çekeceği akım daha büyük olacağından hatlardaki jul kayıpları da fazla olacaktır. Hatlardaki jul kayıpları da fazla olması sistemin optimum çalışma şartlarını bozar. Onun için kompanzasyon yapılarak jul kayıpları da en aza indirilmelidir. (Demirkol, 2006).

Boş yere hattın yüklenmesinin önlenmesi gerekmektedir. Çünkü güç katsayısı düzeltilmemiş bir şebekede gereksiz yere reaktif gücün neden olduğu akımlar dolaşır. Bu akımların dolaşımı hatların kapasitesini azaltır. Elektrik enerjisi üreten generatörlerden daha fazla akım çekilmesine neden olur. Çekilen bu akımların aktif bileşenleri küçük olacağından düşük verimle çalışacaklardır.



Şekil 2.13. Aktif güç, reaktif güç fazör diyagramı

Bir tüketicinin şebekeden çektiği görünür güç,

$$S = 3U_f I = \sqrt{3}U_n I \quad (2.29)$$

olarak ifade edilir. Çekilen gücün endüktif bir yük olması durumunda gerilim ile akım arasında φ açısı meydana gelir. Buna göre:

$$\text{Aktif akım: } I_p = I \cdot \cos \varphi \quad (2.30)$$

$$\text{Aktif güç: } P = S \cdot \cos \varphi \quad (2.31)$$

$$\text{Reaktif akım: } I_q = I \cdot \sin \varphi \quad (2.32)$$

$$\text{Reaktif güç: } Q = S \cdot \sin \varphi \quad (2.33)$$

Böylece;

$$\text{Hat akımı: } I_h = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (2.34)$$

$$\text{Görünür güç: } S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.35)$$

Burada görünür gücün aktif güce oranına güç faktörü denir. Harmoniksiz durumda $\cos \varphi$ 'ye eşittir. Güç faktörü basitçe, (S) görünür gücü ile (P) aktif gücünün oluşturduğu φ açısının cosinüsü alınarak hesaplanabilmektedir. Güç katsayısı 0-1 arasında değişim gösterebilmektedir. Bu oran ile sistemin reaktif enerji tüketimi çok kolay bir şekilde anlaşılabilir. Güç faktörünün 1'e eşit olması halinde φ açısı sıfıra eşit olacak ve tüketilen enerjinin tamamı aktif bileşenli olacaktır (Kocabaş, 2006).

Kompanzasyon yapılarak çekilen reaktif gücün şebekeden değil de, kurulan kompanzasyon sisteminden sağlanması ile şebekeden çekilen (S) görünür gücü azalmakta, böylece (S) görünür gücü ile (P) aktif gücü arasındaki φ açısı daralmaktadır, φ açısının daralarak sıfıra yaklaşması ise güç katsayısının $\cos \varphi = 1$ 'e yaklaşması anlamına gelmektedir (Bayram, 1991).

Güç faktörü, tesis, kullanılan cihaz ve makinelerle göre değişiklik gösterir. Ayrıca, güç faktörü cihazların tam yükte veya yarı yükte çalışmalarına göre de değişim göstermektedir.

Elektrik tüketiminin faturalandırılmasında $\tan \varphi$ terimi tercih edilmektedir. Enerji ölçüm cihazlarında aktif ve reaktif güç tüketimi $\tan \varphi$ değeri hesaplanarak çözümlenir.

Reaktif enerji ile aktif enerji arasındaki oran $\tan \varphi$ 'ye eşittir. Anlaşılacağı gibi $\tan \varphi$ değeri ne kadar küçük olursa şebekeden çekilen reaktif enerji o ölçüde düşük olur. Bu terim, $\cos \varphi$ terimine göre daha anlaşılır ve daha kolay hesaplanabilmektedir. $\cos \varphi$ ve $\tan \varphi$ değerleri arasındaki bağıntı denklem (2.36)'da verilmiştir (Demirkol, 2006).

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tan \varphi)^2}} \quad (2.36)$$

Reaktif güç sarfiyatı bakımından tüketicileri iki ana gruba ayırmak mümkündür. Bunlardan birincisi, elektrik enerjisinden yararlanarak saf ısı enerjisi üreten tüketiciler ile akkor flamanlı lambalar, elektroliz ve galvanoplasti tesisleridir. Bunlar sadece aktif güç tüketirler, reaktif güç çekmezler. İkinci gruba ise, elektrik tesislerinde kullanılan ve manyetik veya statik alan ile çalışan bütün işletme araçları girerler; bunlar aktif güç yanında reaktif güç de çekerler. En önemlileri şunlardır:

- ✓ Düşük uyarmalı senkron makineler,
- ✓ Transformatörler,
- ✓ Bobinler,
- ✓ Yer altı kabloları,
- ✓ Havai hatlar,
- ✓ Senkron motorlar,
- ✓ Redresörler,
- ✓ Endüstri fırınları, ark fırınları,
- ✓ Kaynak makineleri,
- ✓ Floresant lamba, sodyum ve civa buharlı lamba balastları ile neon lamba transformatörleri.

Her ne kadar aydınlatma cihazları aktif güç çekerlerse de, bunlara ait balast ve transformatörler reaktif güç çektiklerinden, bu tip aydınlatma düzenleri yukarıda izah edilen ikinci sınıfa girerler (Atmaca, 1995).

Yukarıdaki tüketicilerde söz konusu olan reaktif akım, endüktif karakterde olup, gerilime göre 90° geridedir. Bazı özel hallerde, işletme araçları bir kondansatör gibi tesir ederler ve kapasitif reaktif güç çekerler (Demirkol, 2006).

Yukarıda açıklandığı gibi, elektrik tesislerinin en önemli işletme araçları olan jeneratörler, transformatörler, besleme hatları, sanayi işletmelerindeki her nevi motorlar, fırınlar ve kaynak makineleri, bir balast yardımı ile çalışan floresant lambalar, civa ve sodyum buharlı lambalar ve deşarj lambaları çektikleri aktif güçlerin yanında oldukça önemli miktarda reaktif güç de çekerler. Reaktif güç üretiminin santralde, ham enerji maddesi sarfiyatına bağlı olmadığı gerekçesinden hareket edilerek reaktif güç sarfiyatı kontrolsüz ve başıboş bırakılır ise, güç katsayısı o kadar düşebilir ki, nihayet bütün üretici,

iletici ve dağıtıcı tesisler, aktif güç bakımından normal kapasitelerinin çok daha altında çalışmak zorunda kalırlar (Aydın, 2007).

Gelişmiş ülkelerde, yıllardan beri uygulanan reaktif güç tarifelerinin uygulanması ile enerji üretimi ve tüketimi bir düzene sokulmuştur. Ülkemizde de 9 Ocak 2007 tarihli ve 26398 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan yönetmelikle iletim sistemine doğrudan bağlı tüketiciler ve dağıtım lisansına sahip tüzel kişiler tarafından; iletim sistemine bağlantıyla ilgili her bir ölçüm noktasında ve her bir uzlaşma periyodunda, sistemden çekilen endüktif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı %20’yi, sisteme verilen kapasitif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranının ise %15’i geçemeyeceği, bu değerlere uyulmaması durumunda reaktif güç bedelinin tüketiciden talep edileceği hüküm altına alınmıştır. Bu yasal zorunluluğun yanı sıra güç faktörünün iyileştirilmesi işleminin, hat akımlarındaki azalma ile birlikte kayıp enerjinin azaltılması, trafo aktif gücünün daha verimli olarak kullanılabilmesi gibi faydaları da mevcuttur.

Reaktif enerji tüketimi özellikle;

- Düşük yüklü motorlar,
- Kaynak makineleri,
- Ark ve indüksiyon ocakları,
- Güç eviricileri, tarafından gerçekleştirilir.

Düşük güç katsayılı olarak çalışan alternatör ve transformatörlerin, güçleri ve verimleri düşer. 22 kVA’lık ve 220 V’luk bir fazlı alternatörü ele alalım. Alternatörün akımı;

$$I = 22000/220 = 100 \text{ A} \quad (2.37)$$

olur. Değişik güç katsayılı yükler bağlayarak alternatörden çekilen aktif güçleri hesaplayalım. Güç katsayısı 1 olan omik bir yük bağlandığında alternatör en büyük aktif gücünü verecektir (Ertan, 1994).

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 220 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 22 \text{ kW} \quad (2.38)$$

Güç katsayısı 0,80 olan bir motor bağlandığında alternatörden çekilen aktif güç,

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 220 \cdot 100 \cdot 0,8 = 17,6 \text{ kW} \quad (2.39)$$

olacaktır.

Görüldüğü üzere, düşük güç katsayılı bir yük bağlandığı zaman, alternatör normal akımını (100 A) verdiği halde, normal gücünü verememektedir. Dolayısıyla, düşük güçte çalıştığı için verimi de düşecektir (Ertan, 1994).

Güç katsayısının düşmesi oranında, şebekeyi besleyen alternatör ve transformatörlerin görünür güçlerinin (zahiri güçlerinin) büyümesi gerekir. Örneğin, bir fabrikadaki motorların toplam gücü 160 kW ve güç katsayısı 0,8 olsun. Bu motorları besleyecek olan trafonun görünür gücü,

$$S_1 = P / \cos \varphi = 160 / 0,80 = 200 \text{ kVA} \quad (2.40)$$

olmalıdır.

Güç katsayısı 0,6 ya düşerse, aynı 160 kW'ı besleyecek olan trafonun görünür gücü,

$$S_2 = 160 / 0,60 = 266,6 \text{ kVA} \quad (2.41)$$

olmalıdır.

Şu halde, güç katsayısı düştükçe, aynı aktif gücü görünür gücü (zahiri gücü) daha büyük olan bir trafo ile beslemek gerekecektir (Aydın, 2007).

Düşük güç katsayısında, besleme hatlarındaki güç kayıpları ve gerilim düşümleri artar. Örneğin, gücü 10 kW ve gerilimi 220 V olan bir fazlı alternatöre güç katsayısı 0,90 olan bir yük bağlanırsa çekilen akım,

$$I_1 = P / (U \cdot \cos \varphi) = 10000 / (220 \cdot 0,9) = 50,5 \text{ A} \quad (2.42)$$

olur (Aydın, 2007).

Aynı alternatöre güç katsayısı 0,60 olan tam yük (10 kW'lık yük) bağlandığında çekilen akım,

$$I_2 = P / (U \cdot \cos \varphi) = 10000 / (220 \cdot 0,60) = 75,75 \text{ A} \quad (2.43)$$

olur (Aydın, 2007).

Görülüyor ki, her iki durumda da gerilim ve harcanan güç aynı olduğu halde, güç katsayısının küçülmesi nedeniyle çekilen akım artmaktadır. Dolayısıyla, yükü besleyen hattaki ısı kaybı (RI^2) daha büyük olacak ve hattaki gerilim düşümü de artacaktır. Besleme hatlarında düşen gerilimi ve güç kaybını azaltmak için daha büyük kesitli iletken kullanmak gerekecektir. Bu durum maliyeti kademeli olarak artıracaktır (Ertan, 1994).

Çizelge 2.15. Bazı ana tüketicilerin güç faktörleri (Demirkol, 2006)

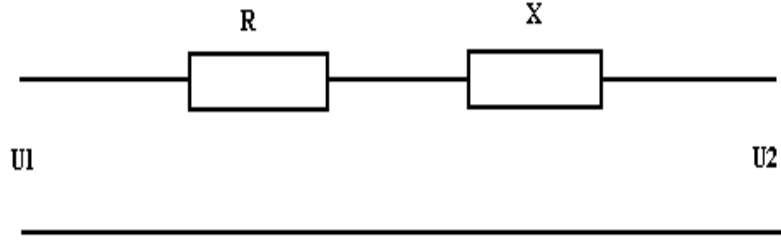
Tüketici		$\cos\phi$	$\tan\phi$
Genel	0%	0,17	5,8
Asenkron motor	25%	0,55	1,52
	50%	0,73	0,94
	75%	0,8	0,75
	100%	0,85	0,62
Akkor telli ampul		Yaklaşık 1	Yaklaşık 0
Flouresan ampul		Yaklaşık 0,5	Yaklaşık 1,73
Deşarj ampulleri		0,4-0,6	Yaklaşık 2,29-1,33
Omik ocak		Yaklaşık 1	Yaklaşık 0
Endüksiyon ocağı (kompanze edilmiş)		Yaklaşık 0,85	Yaklaşık 0,62
Dielektrik ısıtma ergitme ocakları		Yaklaşık 0,85	Yaklaşık 0,62
Omik kaynak makineleri		0,8-0,9	0,75-0,48
Tek fazlı statik ark kaynak makineleri		Yaklaşık 0,5	Yaklaşık 0,73
Ark kaynak üniteleri		0,7-0,9	1,02-0,75
Ark kaynakları için transformatör ve dönüştürücüler		0,7-0,8	1,02-0,75
Ark fırınları		0,8	0,75
Tristör tetiklemeli güç dönüştürücüleri		0,4-0,8	2,25-0,75

2.2.2. Kompanzasyonun faydaları

2.2.2.1. Sistem kapasitesi

Reaktif güç kompanzasyonu yapıldığında reaktif akım kondansatörler tarafından karşılanacağından, sistemden daha küçük akım çekilecektir.

Böylece kondansatörler mevcut sistemdeki aşırı yüklenmesi önleyecektir. Hesaplarda kullanılmak üzere Şekil 2.14'teki hat ile bu hattın sonunda beslenen tüketici örnek olarak ele alınmış olsun (Demirkol, 2006).



Şekil 2.14. Hattın sonunda beslenen bir tüketici

Hattan çekilen P aktif gücün sabit kalması halinde kompanzasyondan önce çekilen görünür güç,

$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \varphi_1} \quad (2.44)$$

kompanzasyondan sonra çekilen görünür güç,

$$S_2 = \frac{P_2}{\cos \varphi_2} \quad (2.45)$$

buna göre ikisi arasındaki fark,

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (2.46)$$

kompanzasyondan sonraki değere oranı,

$$\% \Delta S = \frac{\Delta S}{S_2} \cdot 100 = 100 \left(\frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} - 1 \right) \quad (2.47)$$

olarak elde edilir.

Kompanzasyonun yapılması ile tesisin yükü $\% \Delta S$ oranında azalır veya tesis aşırı zorlanmaksızın $\% \Delta S$ oranında yüklenebilir (Kocabaş, 2006).

Hat sonunda hattan çekilen görünür gücün sabit kalması halinde;
kompanzasyondan önce çekilen aktif güç,

$$P_1 = S_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (2.48)$$

kompanzasyondan sonra çekilen aktif güç,

$$P_2 = S_1 \cdot \cos \varphi_2 \quad (2.49)$$

buna göre ikisi arasındaki fark,

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (2.50)$$

bu değerin kompanzasyondan önceki değere oranı,

$$\% \Delta = \frac{\Delta P}{P_1} \cdot 100 = 100 \left(\frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} - 1 \right) \quad (2.51)$$

şeklindedir.

Kompanzasyonun yapılması ile görünür güç sabit kaldığı halde tesisin $\% \Delta P$ oranında artış gösterir (Bayram, 1991).

2.2.2.2. Isı kayıpları

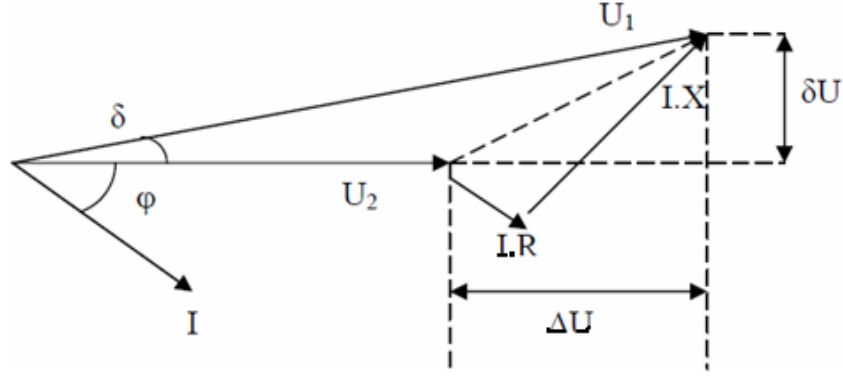
Her ne kadar sistemin ısı (Jul) kayıplarının azaltılması kompanzasyon tesisi kurmak için yeterli bir neden değilse de, bu da önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Genellikle endüstriyel ve iç dağıtım sistemlerinde ısı kayıpları (RI^2) puant ve minimum yük saatlerine, iletken kesitlerine ve uzunluklarına bağımlı olarak toplam kullanılan gücün $\%2,5- 7,5$ arasında bir değeri oluşturmaktadır. Kayıplar akımın karesine akımda güç katsayısına doğrudan bağlı olduğundan, dolayısı ile kayıplar güç katsayısının karesinin tersi ile orantılıdır (Kocabaş, 2006).

Eğer güç katsayısı düzeltilecek sistem kapasitesinde bir artış getirilip kullanılmışsa, görünür güç değeri her iki durumda da aynı kalacağından sistemdeki kayıplarda bir değişiklik olmayacak fakat aktif gücün büyümesi ile yüzde kayıplar azalacaktır (Demirkol, 2006).

2.2.2.3. Gerilim düşümü

Güç sistemlerinde gerilim kontrolü ilk aşamada generatörler ve transformatörler kademeleri ile yapılmalıdır, eğer bunlar yetersiz ise güç katsayısı kompanzasyonuna gidilmelidir. Şekil 2.15'te bir enerji iletim hattında boyuna ve enine gerilim düşümleri gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Bir gerilim hattının fazör diyagramının şematik çizimi

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (2.52)$$

Boyuna gerilim düşümü.

$$\Delta U = RI \cos \varphi + XI \sin \varphi \quad (2.53)$$

enine gerilim düşümü,

$$\delta U = XI \cos \varphi - RI \sin \varphi \quad (2.54)$$

hattın ısı kayıp gücü,

$$P_k = I^2 R \quad (2.55)$$

yüzde olarak bağıl gerilim düşümü,

$$\% \varepsilon = \% \frac{\Delta U}{U} = 100 \left(\frac{IR \cos \varphi}{U} + \frac{IX \sin \varphi}{U} \right) \quad (2.56)$$

şeklinde yazılır.

Denklem (2.56)'da birinci terimde U yerine: $P/I \cos \varphi$, ikinci terimde I yerine: $P/U \cos \varphi$ konursa;

Bağıl gerilim düşümü,

$$\% \varepsilon = 100 \left(\frac{P \cos^2 \varphi}{P} + \frac{PX \tan \varphi}{U^2} \right) \quad (2.57)$$

olarak elde edilir (Kocabaş, 2006).

2.2.2.4. Tüketici açısından faydası

Eğer tüketici, tesisini kurarken güç katsayısını düzeltecek önlemler alırsa veya mevcut tesisin güç katsayısı düzeltilirse, şu yararlar sağlar;

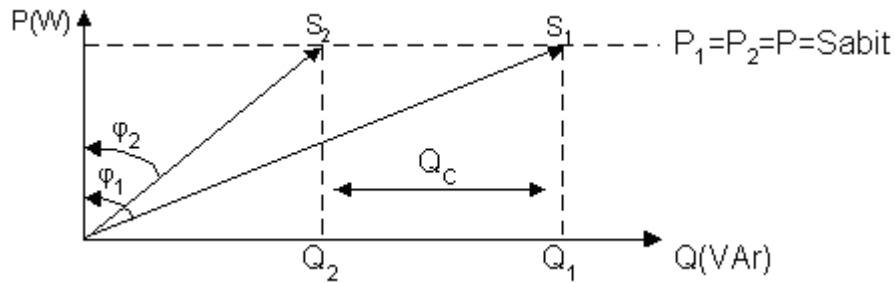
- Gereksiz yatırım yapmamış olur.
- Kayıplar azalır.
- Gerilim düşümü azalır.
- Reaktif enerji ücreti ödenmemiş olur.

2.2.3. Reaktif güç ihtiyacının saptanması

Bir tüketicinin veya tesisinin reaktif güç ihtiyacının tespiti için şebekeden çekilen (P) aktif gücünün veya (S₁) görünen gücün ve bunlara ait $\cos \varphi_1$ ile yeni güç katsayısı $\cos \varphi_2$ değerinin bilinmesi gereklidir. Reaktif gücü veya kondansatör gücünü hesaplamak için iki yol vardır.

2.2.3.1. P₁ gücünün sabit olması hali

Bu durumda Şekil 2.16' da görüldüğü gibi sistemden çekilen görünür güç azalır.



Şekil 2.16. P₁ gücünün sabit olması halini gösteren diyagram

Kompanzasyondan önceki reaktif güç,

$$Q_1 = P_1 \tan \varphi_1 \quad (2.58)$$

kompanzasyondan sonraki reaktif güç,

$$Q_2 = P_1 \tan \varphi_2 \quad (2.59)$$

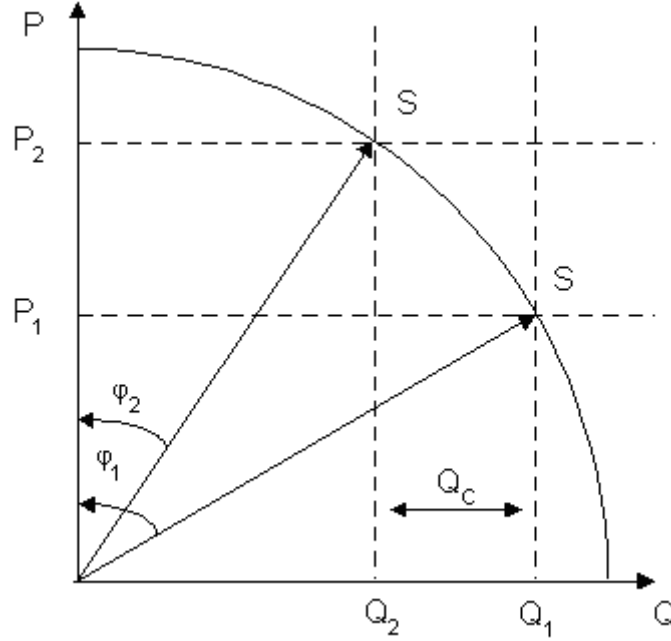
olduğuna göre gerekli kondansatör gücü,

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P_1(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (2.60)$$

olarak bulunur.

2.2.3.2. Sı gücünün sabit olması hali

Bu durumda sistemden çekilen aktif güç artırılır.



Şekil 2.17. Sı gücünün sabit olması halini gösteren diyagram

Kompanzasyondan önceki reaktif güç,

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (2.61)$$

kompanzasyondan sonraki reaktif güç,

$$Q_2 = S_1 \cdot \sin \varphi_2 \quad (2.62)$$

olmak üzere gerekli kondansatör gücü,

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = S_1 (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) \quad (2.63)$$

olarak bulunur.

2.2.4. Yeni bir kompanzasyon tesisin projelendirilmesinde dikkat edilmesi gereken hususlar

Tesisin projelendirilmesinde ilk göz önüne alınacak unsur tesis edilecek kompanzasyon gücünün paralel rezonans değerinden düşük olmasıdır. Paralel rezonans

gücü, denklem (2.64)'e göre hesaplanır.

$$Q_{pr} = \frac{S}{n^2 \% u_k \sin \varphi_k} \quad (2.64)$$

Eğer tesiste rezonans riski mevcut ise öncelikle tesisin fiili gücü, kurulu gücü, trafo gücü ve tüm harmonik kaynaklarının model ve güçleri tespit edilmelidir (Demirkol, 2006).

Bu tespitin ardından tesisin fiili gücüne oranı hesaplanarak, bu değerin %20'nin üzerinde çıkması durumunda tesiste kabaca da olsa harmonik sorununa sahip olunacağı söylenebilir (Demirkol, 2006).

Bu tip bir tesiste kompanzasyon sistemi tasarlandıktan ve tesis devreye alındıktan sonra bu değerin normal kuru tip kondansatörlerin aşın güç dayanım değeri olan %35'in üzerine çıkacağı unutulmamalıdır (Demirkol, 2006).

2.2.4.1. Kompanzasyon tesisi çeşitleri

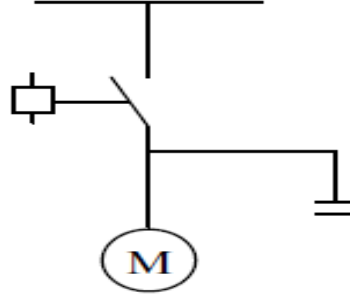
Sistemin ihtiyacı olan reaktif gücü karşılamak için kurulacak kompanzasyon sistemi tesisleri tasarlanırken, temel olarak 3 farklı uygulama söz konusudur.

- Bireysel Kompanzasyon
- Grup Kompanzasyon
- Merkezi Kompanzasyon

2.2.4.1.1. 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 (Engin, 2008).

Bireysel kompanzasyonun maliyeti yüksektir ve ayara elverişli değildir. Ancak sabit güçle sürekli çalışan tüketiciler için uygun ve ekonomik olabilir. Bireysel kompanzasyon, sembolik olarak Şekil 2.18'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.18. Bireysel kompanzasyon

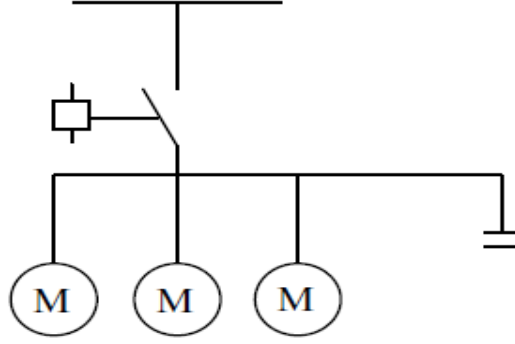
Bireysel kompanzasyonda yüke bağlanacak kondansatör gücü, denklem (2.65) ile bulunabilir. Burada Q_c , kondansatör gücünü, I_0 yükün boşa çektiği akımı ve U_N ise yükün nominal gerilimini gösterir (Engin, 2008).

$$Q_c = 0,9.I_0.U_N \quad (2.65)$$

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 (Engin, 2008).

2.2.4.1.2. Grup kompanzasyon

Beraber ve aynı kontaktör üzerinden devreye girip çıkan motor, lamba ve transformatörler beraber kompanze edilirler. Sigorta ve deşarj dirençlerine ihtiyaç yoktur. Birçok tüketicinin bulunduğu bir tesiste her tüketicinin ayrı ayrı kondansatörlerle donatılacağı yerde bunların ortak bir kompanzasyon tesisi tarafından beslenmesi pratik ve ekonomik olmasından dolayı kondansatörlerin özel anahtarlar üzerinden ve gerektiğinde kademeli olarak şebekeye bağlanması gerekir. Eğer bir grupta her motor ayrı ayrı kontaktörle devreye sokulup çıkarılıyorsa kondansatörleri de yine ayrı kontaktörlerle fakat motor kontaklarıyla paralel devreye girecek şekilde bağlamak gerekir. Bu durumda ayrı sigortalama ve deşarj dirençlerine gerek yoktur (Demirkol, 2006).



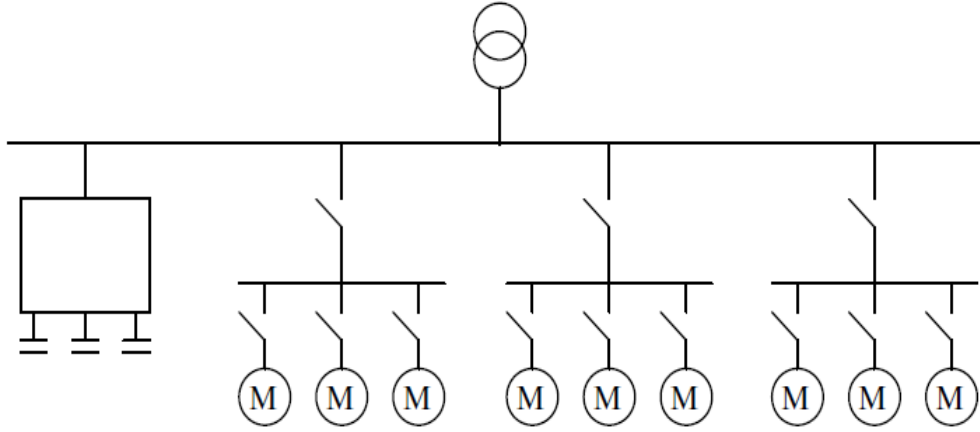
Şekil 2.19. Grup kompanzasyon

2.2.4.1.3. Merkezi kompanzasyon

Grup kompanzasyonun kapsam olarak biraz daha genişletilmiş şeklidir. 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, transformatörün sekonder barasında yüke paralel olarak uygulanır. Merkezi kompanzasyonda bulunan ayar düzeneği, ayar için gerekli olan bilgileri genellikle cosφ metre cihazından 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 (Engin, 2008).

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 (Engin, 2008).



Şekil 2.20. Merkezi kompanzasyon

2.2.5. Kondansatörler

Reaktif güç üretiminde statik faz kaydırıcı adı verilen kondansatörlerin üstünlükleri sayılamayacak kadar çoktur. Kondansatörlerin kayıpları çok düşük olup, nominal güçlerinin %0.5'inin altındadır; bakım masrafları yok denecek kadar azdır. Ayrıca kondansatörler ile istenilen her güçte bir reaktif güç kaynağı teşkil edilebildiği gibi bunları tüketicilerin yanlarına kadar götürüp hemen, alıcıların uçlarına bağlamak ve böylece orta ve alçak gerilim şebekelerini de reaktif gücün yükü altından kurtarmak mümkün olur. Onun için kondansatörler, kompanzasyon için en uygun araçtır. Kondansatörler bugün kuvvetli akım tesislerinde gittikçe artan bir önem kazanmıştır. Kondansatörlerin kVAR başına maliyet bedelleri orta büyüklükteki senkron kompanzatörlerden daha düşük olduğu gibi, bu fiyatta büyük bir artış olmadan her güçte imalatı mümkündür. Kondansatörlerin tesisi kolaydır ve gerektiğinde kolaylıkla genişletilerek kompanzasyon gücü artırılabilir. Ayrıca tüketici ihtiyacına göre rahat bir şekilde güç ayarı da yapılabilir. Kondansatörlerin işletme emniyeti çok iyi, ömürleri uzun ve bakımları kolaydır. Yerleştirilecekleri yerde hemen hemen hiç bir özellik aranmadığından yer temininde bir sorun oluşmaz. Gerekli kapasiteyi temin maksadıyla birçok kondansatör elemanı bir araya getirilerek istenen değerde bir grup teşkil edilebilir. Bir arıza halinde zarar gören eleman, çok kısa zamanda tespit edilip, az bir masrafla yenisi ile değiştirilerek, işletmeye fazla ara vermeden tamir edilmiş olur (Kocabaş, 2006).

Kondansatör tesisleri birçok elemanlardan meydana geldiğinden, bunların nakli kolay, tesisi ve bağlanması rahat ve istenilen kapasitenin elde edilmesi mümkündür.



Şekil 2.21. Orta gerilim güç kondansatörleri

Güç kondansatörlerinden beklenen özellikler şunlardır;

- ✓ Uzun ömürlü olması,
- ✓ Elektrik şebekesinde meydana gelen anormal akım, gerilim ve harmoniklerden asgari şekilde etkilenmesi,
- ✓ Geçici rejimlerde akım ve gerilim darbelerinden, dengelenme akımlarından etkilenmemesi,
- ✓ Aktif kayıplarının en az olması,
- ✓ Projelendirildiği asgari ve azami ortam sıcaklığında performanslarını yitirmemesi,
- ✓ Elektroteknik boyutlarının, anma değerlerinin zamanla değişmemesi,
- ✓ Can ve mal emniyeti yönünden bir tehlike kaynağı oluşturmaması,
- ✓ Kalıcı kısa devreye girme olasılığının en az olması,
- ✓ Bakımı kolay, arızası az, tamiri mümkün ve asgari bir maliyet oluşturması,
- ✓ Montajının kolay olması ve boyut yönünden herhangi bir yere monte edilebilecek bir modüler özellik göstermesi,
- ✓ Teknik ve iktisadi bir optimizasyon ürünü olması.

2.3. Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri

Harmonik distorsiyonu, enerji sisteminde ve enerji sistemine bağlanan elemanlar üzerinde olumsuz etkiler meydana getirir. Maalesef işletmelerde harmonik bileşenlerin tespit edilmesi ve analizi, ortaya çıkan bazı etkilerin ve arızaların sonucunda söz konusu olmaktadır. Harmonik bileşenlerin varlığını düşündüren etkilerin ve arızaların başında aşırı

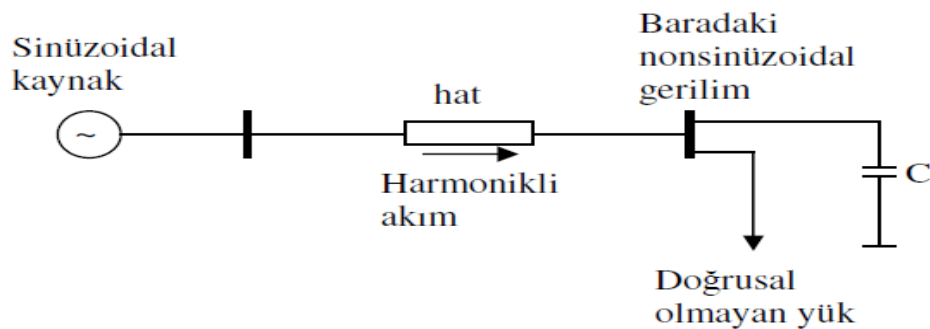
ısıyan motorlar, transformatörler, nötr hatları ile açan devre kesicileri, sigortalar, toprak rölesi açmaları, kondansatör ısınmaları ve delinmeleri bulunmaktadır. Enerji sisteminde çok önemli yeri olan elemanlardan kondansatörler de harmonik bileşenlerden oldukça etkilenirler. Hatta harmoniklerin meydana getirdiği olumsuzluklar, öncelikle kondansatörlerde görünür. Başka bir deyişle, bir elektrik sisteminde harmonik bileşenlerin varlığını ilk haber veren elemanlar genelde kondansatörlerdir (İnan, 2008).

Sistemi besleyen kaynak, sinüzoidal olsa bile harmonik akımları çeken nonlinear elemanlar, sistemde harmonik gerilimlere neden olurlar. Böylece nonlinear yükün bağlı olduğu baraya bağlanan kondansatörler ile eğer varsa lineer yükler nonsinüzoidal (harmonikli) gerilimle beslenirler (Şekil 2.22). Bu durumda kondansatör çalışma değerleri sinüzoidal besleme haline göre farklı değerler alacaktır (Engin, 2008).

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 (Engin, 2008):

- 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

Kondansatörler harmonik üreten bir eleman olmamakla birlikte sistemde bulunan harmonik seviyelerinin etkin bir biçimde artmasına neden olurlar. Harmonikler ise kondansatörlerde hem aşırı gerilimlere hem de aşırı akımlara ve bunların sonucunda da aşırı reaktif yüklenmeye yol açarlar. Ayrıca harmonik bileşenler sistemdeki kondansatörlerle selfler arasında rezonans meydana getirerek işletmenin sürekliliğini de etkilerler (İnan, 2008).



Şekil 2.22. Doğrusal olmayan yüklerle harmonikli gerilimin oluşması (Engin, 2008)

2.3.1. Aşırı gerilim

Harmonik distorsiyonunun mevcut olduğu, durumda, güç faktörü düzelten kondansatörlerin gerilimleri izin verilen değerlerin üzerine çıkabilir. Aşırı gerilim, gerilim harmonik bileşenleri (V_n) nedeniyle oluşmaktadır.

Enerji sistemlerinde simetriden dolayı tek dereceli harmonik bileşenler ($n=3,5,7,\dots$) bulunurlar. Bu şekilde harmonik bileşenler içeren bir gerilimin efektif değeri,

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + \dots} \quad (2.66)$$

denklemleri ile belirlenir. Bu denklemde de görüldüğü gibi, nonsinüzoidal durumda sinüzoidal gerilimde tek başına bulunan temel bileşene, gerilimin harmonik bileşenleri ilave olmaktadır. IEEE- 519 tarafından gerilim distorsiyonunun genel uygulamalar açısından %5 olarak sınırlandırılması tavsiye edilmektedir. Yüksek değerli harmonik bileşenli ya da harmoniklerle distorsiyona uğramış bir gerilim, kondansatörde aşırı gerilime ve bunun sonucunda da dielektrik malzemede zorlanmalara, arızalara neden olabilmektedir. Kondansatörlerin aşırı gerilimde hangi değerlere kadar çalışabilecekleri ya da çalışması gerektiği standartlarda belirlenmiştir (İnan, 2008).

Kondansatör TS 804'e göre geçici rejimler dışında nominal anma geriliminin 1,1 katına kadar dayanabilmelidir.

2.3.2. Aşırı akım

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

$$X_{cn} = \frac{X_c}{n} = \frac{1}{n\omega C} \quad (2.67)$$

denklemleri ile belirlenir. Görüldüğü gibi, harmonik derecesi arttıkça kapasitif reaktans azalacaktır. Buradan n . harmonik bileşenine ait kondansatör akımı,

$$I_n = \frac{V_n}{X_{cn}} = n\omega C V_n \quad (2.68)$$

olacaktır. Bu eşitlikten de anlaşılacağı üzere harmonik distorsiyonu kondansatör akımında kondansatörün geriliminden daha fazla olacaktır. Örneğin, temel bileşenin %20'si kadar olan bir üçüncü harmonik bileşen gerilimi sonucu (Denklem 2.68 gereği) kondansatörden geçen üçüncü harmonik akımının, temel bileşen akım içerisindeki oranı, harmonik derecesi kadar (3 kat) artış gösterecek yani %60 olacaktır. Kondansatörlerin n. harmonik için kapasitif reaktansları 1/n ile azalttığından n.harmonik için akım harmonik bileşeni yüzdesi, gerilim harmonik bileşeni yüzdesinden daha büyük olur (Kocatepe ve ark., 2003).

Başka bir deyişle kondansatöre uygulanan distorsiyonlu gerilim, distorsiyonlu bir akım meydana getirecektir; akım dalgası distorsiyonu gerilim distorsiyonundan daha büyük olacaktır. Omik bir alıcıda gerilim distorsiyonu ile akım distorsiyonu aynıdır. Kondansatörden geçen harmonikli bir akımın efektif değeri,

$$I = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N I_n^2 \right)} = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N n\omega C V_n^2 \right)} \quad (2.69)$$

ile bulunur. Tek dereceli harmonik bileşenler için kondansatör akımı,

$$I = \omega C \sqrt{V_1^2 + 9V_3^2 + 25V_5^2 + \dots} \quad (2.70)$$

olacaktır. Bu denklem bize, temel bileşene ilave gelen harmonik bileşen gerilimleriyle kondansatör akımının arttığını göstermektedir. Bu artışın sınırı ise Türk Standartları TS 804'de belirlenmiş olup bu standartta kondansatörün, nominal akımının 1,3 katı akıma dayanabilecek şekilde olması istenmektedir (Engin, 2008).

Kondansatörlerin akımları, aynı efektif değerdeki sinüzoidal ve nonsinüzoidal gerilimde farklı değerler almakta, nonsinüzoidal durumda daha büyük akım geçişi olmaktadır (Şekil 2.23). Örneğin, uygulanacak tek dereceli harmonik bileşenlere sahip nonsinüzoidal gerilim sonucu akacak kondansatör akımı,

$$I_{nonsin} = \omega C \sqrt{V_1^2 + 9V_3^2 + 25V_5^2 + \dots} \quad (2.71)$$

ile ifade edilebilir. Nonsinüzoidal gerilimle efektif değeri aynı olan,

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + \dots} \quad (2.72)$$

değerindeki sinüzoidal bir gerilim sonucunda akan kondansatör akımı,

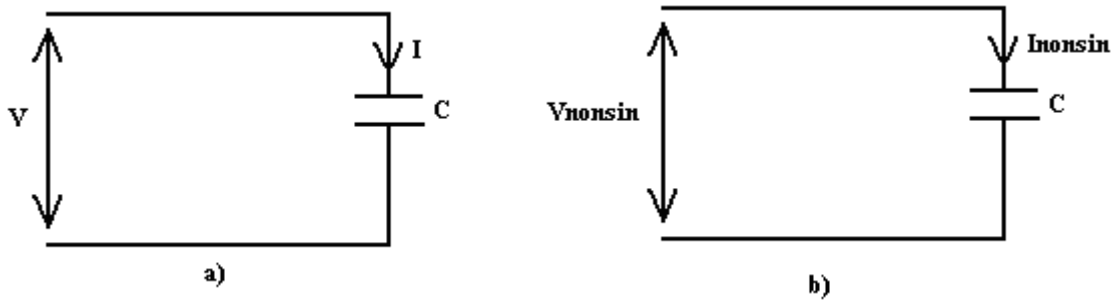
$$I = \omega CV \quad (2.73)$$

değerinde olacaktır. Bu iki akımların oranlanmasından,

$$\frac{I_{nonsin}}{I} = \frac{\sqrt{V_1^2 + 9V_3^2 + 25V_5^2 + \dots}}{\sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + \dots}} \quad (2.74)$$

elde edilir. Bu oran sonucunda kondansatörden geçen akımlar için şu söylenebilir: Pay değeri paydadan büyük olduğundan kondansatör için aynı efektif değere sahip nonsinüzoidal gerilimin akımı, sinüzoidal gerilimin akımından büyük olacaktır. Bu durum matematiksel olarak Denklem 2.75'teki gibi ifade edilebilir (Kocatepe ve ark., 2003).

$$|V| = |V_{nonsin}| \quad I_{nonsin} > I \quad (2.75)$$



Şekil 2.23. Kondansatörün farklı gerilimlerle beslenmesi halindeki akımı

- a) Aynı efektif değerde sinüzoidal beslenmesi
- b) Aynı efektif değerde nonsinüzoidal beslenmesi

2.3.3. Aşırı reaktif yük

Aşırı reaktif yüklenme, kondansatörlerin çeşitli nedenlerle etiket değerlerindeki güçlerinin üzerinde çalışması demektir. Kondansatörler nominal reaktif güç (Q) değerleri ile anılırlar. Bu değer C kondansatör kapasitesine ve V sinüzoidal gerilimine sahip bir kondansatör için,

$$Q = \omega CV^2 \quad (2.76)$$

ile tanımlanmaktadır. Gerilimdeki artış, reaktif güçteki artışı, karesi ile orantılı olarak etkilemektedir. Harmonik bileşenlere sahip bir gerilimde her bir harmonik bileşen gerilimi (V_n) için oluşan reaktif güç ise,

$$Q = n\omega CV_n^2 \quad (2.77)$$

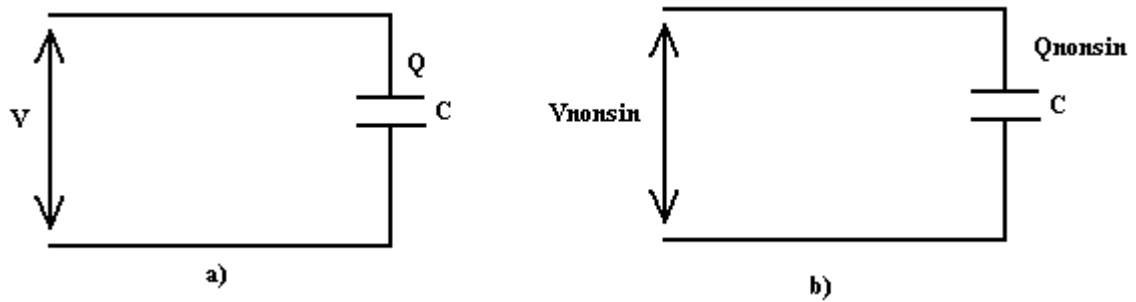
eşitliği ile tespit edilebilir. Nonsinüzoidal gerilimle beslendiklerinde kondansatörlerin reaktif güçleri, her bir harmonik bileşenin reaktif güçlerinin toplamından elde edilir (Engin, 2008). Aktif güç kaybı bulunmayan yani ideal kabul edilen kondansatörlerde, kondansatörün reaktif gücü artarak, toplam reaktif güç,

$$Q_T = \sum_{n=1}^N Q_n = Q + \sum_{n=2}^N Q_n \quad (2.78)$$

değerine ulaşacaktır (Engin, 2008). Denklem (2.78)'de açıkça görüldüğü gibi kondansatör, harmonik gerilimler sonucu ikinci terimle belirlenen ilave güç ile aşırı reaktif yüklenmiş olacaktır. Gerçek (ideal olmayan) kondansatörler için ise reaktif güç,

$$Q_T = \sum_{n=1}^N V_n I_n \sin \varphi_n \quad (2.79)$$

ifadesi ile elde edilir. Burada φ_n , n. harmonik gerilimi ile akımı arasındaki açıdır (İnan, 2008).



Şekil 2.24. Kondansatörün farklı gerilimlerle beslenmesi halinde reaktif gücü

- a) Aynı efektif değerde sinüzoidal beslenmesi
- b) Aynı efektif değerde nonsinüzoidal beslenmesi

Kondansatörlerin aynı efektif değerdeki sinüzoidal ve nonsinüzoidal gerilimde farklı reaktif güçlere sahip olacağı kolayca görülmektedir. Nonsinüzoidal durumda daha büyük reaktif gücün olduğu yani aşırı reaktif yükleneceği anlaşılmaktadır (Şekil 2.24).

Nonsinüzoidal gerilim sonucu kondansatörün gücü,

$$Q_{nonsin} = \omega C (V_1^2 + 3V_3^2 + 5V_5^2 + \dots) \quad (2.80)$$

olacaktır. Nonsinüzoidal gerilimin efektif değerine eşit sinüzoidal bir gerilim sonucunda ise kondansatör gücü,

$$Q = \omega CV^2 \quad (2.81)$$

olacaktır. Güçlerin oranlanmasından,

$$\frac{Q_{nonsin}}{Q} = \frac{V_1^2 + 3V_3^2 + 5V_5^2 + \dots}{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + \dots} \quad (2.82)$$

elde edilecektir. Bu eşitlikten de açıkça anlaşılacağı üzere pay değeri paydadadan büyük olduğundan aynı efektif değere sahip nonsinüzoidal gerilimli kondansatörün gücü sinüzoidal gerilimli güçten büyük olacaktır. Bu durum matematiksel olarak Denklem (2.83)'deki gibi ifade edilebilir (Kocatepe ve ark., 2003).

$$|V| = |V_{nonsin}| \quad Q_{nonsin} > Q \quad (2.83)$$

2.3.4. 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,

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega RC} = \frac{P}{Q} \quad (2.84)$$

ile verilir.

Burada P, kondansatör aktif kayıplarını, göstermektedir. Kondansatör uçlarında harmonikli gerilim bulunduğunda iyonizasyon ve polarizasyon kayıpları ihmal edilerek aktif kayıp güç değeri,

$$P = R \sum_{n=1}^N I_{Rn}^2 \quad (2.85)$$

olmaktadır. Burada I_{Rn} , n.harmoniğe ait direnç akımıdır. Tek dereceli harmonik bileşenler bulunduğunda aktif kayıp güç,

$$P = R (I_{R1}^2 + I_{R3}^2 + I_{R5}^2 + \dots) \quad (2.86)$$

ile belirlenebilir (Kocatepe, 2003).

Görüldüğü gibi, akım harmonik distorsiyonu değeri arttıkça, kayıp değeri artacak ve bunun sonucunda kondansatörde sıcaklık artışı olacaktır. Kondansatörün ömrü üzerinde sıcaklık artışının olumsuz etkileri bilinmektedir. Yapılan bir çalışmada, harmonik akımlarının neden olduğu %10'luk bir gerilim yükselmesinin bir kondansatör grubunun çalışma sıcaklığını %7 oranında arttırdığı, bunun da kondansatörün ömrünü %30 oranında azalttığı hesaplanmıştır (Engin, 2008).

Çeşitli kondansatörler için kayıp faktörleri standartlarda belirlenmiştir. Kayıp faktörü ($\tan \delta$) değerleri TS 804'e göre yaklaşık olarak,

- Öz onarımli kondansatörlerde $0,5 \times 10^{-3}$
- Karma yalıtkanlı kondansatörlerde $1,5 \times 10^{-3}$
- Kağıtlı kondansatörlerde 5×10^{-3}

Watt/kVAr değerlerinde verilmiş olup, bu değerlerin aşılması, büyük kayıp güç değerinin oluşmaması bakımından önemlidir (İnan, 2008).

2.3.5. Rezonans oluşumu

Çok büyük değerdeki harmonik distorsiyonu, güç sisteminde rezonans yolu ile problemlerin artmasına neden olabilir. Endüktif reaktansın frekansla doğru orantılı olarak arttığı, buna karşılık kapasitif reaktansın frekansla ters orantılı olarak değiştiği bilinmektedir. Endüktif reaktansın, kapasitif reaktansa eşit olduğu bir frekansta rezonans meydana gelmekte ve bu frekans rezonans frekansı olarak adlandırılmaktadır. Rezonans olayı, temel veya harmonik bileşenlerin herhangi birinde görülebilir. Eğer harmonik frekanslarından birine yakın bir değerde rezonans oluşursa, devrede aşırı harmonik gerilimler ve akımlar ortaya çıkacaktır. Bu ise sistemde çeşitli arızalara veya süreksizliğe yol açacaktır. Bu nedenle, bir güç sisteminde güç faktörünü düzeltmek için kullanılan çok büyük kondansatörlerin tesis edilmesi, sistemde çok önemli rezonans problemlerine yol açabilecektir (İnan, 2008).

Q_s sistemin kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücünü, Q_c ise kondansatörlerin toplam gücünü göstermek üzere, bir alçak gerilim güç sisteminin rezonans frekansına ait harmonik mertebesi, denklem (2.87) ile belirlenir (İnan, 2008).

$$n = \sqrt{\frac{Q_s}{Q_c}} \quad (2.87)$$

2.3.5.1. Rezonansın etkileri

Rezonans oluşumu, elektrik dağıtım sistemlerinde ciddi arıza ve hasarlar oluşturabilir. Harmonik rezonansının etkisi, sistemdeki yüklerin az olduğu zamanlarda daha fazladır (Kocatepe, 2003).

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 kısalmır.
- ✓ 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 sürücüleri, ark fırınları vb.) oranı, endüstriyel şebekelerde daha fazladır. Ayrıca rezonans frekansında harmonikleri bastıracak rezistif yük sayısı da daha azdır. Bu nedenle sistemde aşırı miktarda harmonik bozunumu meydana gelebilir (Engin, 2008).

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 (Engin, 2008).

Paralel rezonansa 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 (Kocatepe ve ark., 2003).

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, rezonanstan dolayı oluşacak sorunları azaltacaktır.

3. METOT

3.1. Giriş

Bu çalışmada, çalışma gerilimi 6,3 kV olan, orta gerilime göre tasarlanmış merkezi reaktif güç kompanzasyon sistemi bulunan ve aynı şalt merkezinden beslenen trafo güçleri aynı fakat motor güçleri farklı olan iki farklı tesise ait enerji kalitesi, kompanzasyon sisteminde bulunan orta gerilim sınıfı kondansatörlerin enerji kalitesine ve enerji kalitesinin de bu kondansatörlere olan etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle enerji kalitesini etkileyen harmonikler, reaktif güç kompanzasyonu ve reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan kondansatörler hakkında temel bilgiler verilmiştir. Harmoniklerin kondansatörler üzerindeki etkilerinden bahsedilerek, tesislerde kullanılan enerjinin kalitesine yönelik alınan ölçüm sonuçları analiz edilmiştir.

Orta gerilim şebekesine göre tasarlanmış bu tesislerde, şebekenin orta gerilim kısmındaki harmoniklerin, reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan orta gerilim kondansatörleri üzerindeki etkileri ve tesislerde uygulanan orta gerilim reaktif güç kompanzasyonunun orta gerilim şebekesinde meydana getirdiği geçici olaylar bir enerji analizör cihazı ile ölçülerek gözlemlenmiştir. Bu geçici olaylar; orta gerilim kondansatörlerinin devreye alınması ve devreden çıkarılması durumları için şebeke enerji kalitesi açısından incelenecektir. Gerekli ölçümleri yapabilmek için tesisteki mevcut akım trafoları ile gerilim trafoları kullanılmış ve bunlardan uygun bir enerji analizör cihazı alınan bilgilerin analizi metot olarak kullanılmıştır.

Çalışmanın yapıldığı bu tesisler, şehre içmesuyu pompalamak amacıyla yapılmış olup, içmesuyu farklı 3 tesiste bulunan motopomplarla 100'er metrenin üzerinde yüksekliğe (toplam 300 m.) çıkarılarak yaklaşık 50 km. olan içmesuyu hattı ile şehre ulaştırılmaktadır. Bu işyeri 3 farklı tesisten ibaret olup, ölçümler 1600 kW güce sahip 4 adet bilezikli asenkron motor bulunan 1. tesis ile 1200 kW güce sahip 4 adet bilezikli asenkron motor bulunan 2. tesiste yapılmıştır. Ölçüm yapılan bu tesislere ait güç transformatörleri, bilezikli asenkron motorlar ve reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan OG güç kondansatörlerine ilişkin etiket değerleri Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.1. Tesis motor dairesinden bir görüntü

Çizelge 3.1. Tesislerde bulunan güç transformatörlerinin etiket değerleri

		Primer	Sekonder
Nominal Güç (kVA)		8000	8000
Nominal Gerilim (kV)	Kademe 1	36	6,3
	Kademe 2	34,5	
	Kademe 3	33	
	Kademe 4	31,5	
	Kademe 5	30	
Nominal Akım (A)	Kademe 1	128,3	733,2
	Kademe 2	133,9	
	Kademe 3	140	
	Kademe 4	146,7	
	Kademe 5	154	
Boşta Akım (%)		0,45	
Boşta Kayıp (W)		8500	
Yükte Kayıp (W)		55000	

Çizelge 3.2. Tesislerdeki 1600 kW ve 1200 kW güçlerindeki 3 fazlı bilezikli asenkron motorların etiket değerleri

	1. Tesis	2. Tesis
Nominal Güç (kW)	1600	1200
Nominal Gerilim (kV)	6,3	6,3
Nominal Akım (A)	180	135
Verim (%)	96	96
Yol Verme	Direnç İle	Direnç İle
Kutup Sayısı	6	6
Cos φ	0,85	0,85
Devir Sayısı (1/min)	985	985
Frekans (Hz.)	50	50

Çizelge 3.3. OG kondansatör gruplarına ait kondansatör etiket değerleri

	1. Tesis			2. Tesis		
	1. Grup	2. Grup	3. Grup	1. Grup	2. Grup	3. Grup
Nominal Güç (kVAR)	726	364	364	636	318	318
Nominal Gerilim (kV)	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25
Nominal Kapasite (μF)	127,94	64,146	64,146	112,08	56,04	56,04
Frekans (Hz.)	50	50	50	50	50	50

Tesislere ait kondansatör gücü hesabı:

1. Tesis: 1600 kW'lık motor için η motorun verimini ifade etmek üzere kondansatör gücü,

$$\cos\varphi_1: 0,85 \text{ için } \tan \varphi_1 = 0,62$$

$$\cos\varphi_2: 0,99 \text{ için } \tan \varphi_2 = 0,14$$

buradan;

$$Q_c = \frac{P[kVar]}{\eta} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = \frac{1600}{0,96} (0,62 - 0,14) = 800 \text{ kVAR} \quad (3.1)$$

olarak bulunur.

Tesiste, kendi içinde yıldız bağlı olan 2 adet 800 kVAR ve 1 adet 1600 kVAR olmak üzere 3 adet kondansatör bankı bulunmaktadır.

2. Tesis: 1200 kW'lık motor için η motorun verimini ifade etmek üzere kondansatör gücü,

$$\cos\varphi_1: 0,85 \text{ için } \tan \varphi_1 = 0,62$$

$$\cos\varphi_2: 0,99 \text{ için } \tan \varphi_2 = 0,14$$

buradan;

$$Q_c = \frac{P[kVar]}{\eta} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = \frac{1200}{0,96} (0,62 - 0,14) = 600 \text{ kVAR} \quad (3.2)$$

olarak bulunur.

Tesiste, kendi içinde yıldız bağlı olan 2 adet 700 kVAR ve 1 adet 1400 kVAR olmak üzere 3 adet kondansatör bankı bulunmaktadır. Mevcut kondansatör gücü hesaplanandan yüksektir.



Şekil 3.2. 1600 kVAR, 800 kVAR ve 800 kVAR kondansatör bankları



Şekil 3.3. Zarar görmüş OG kondansatörler ve kondansatör plakaları

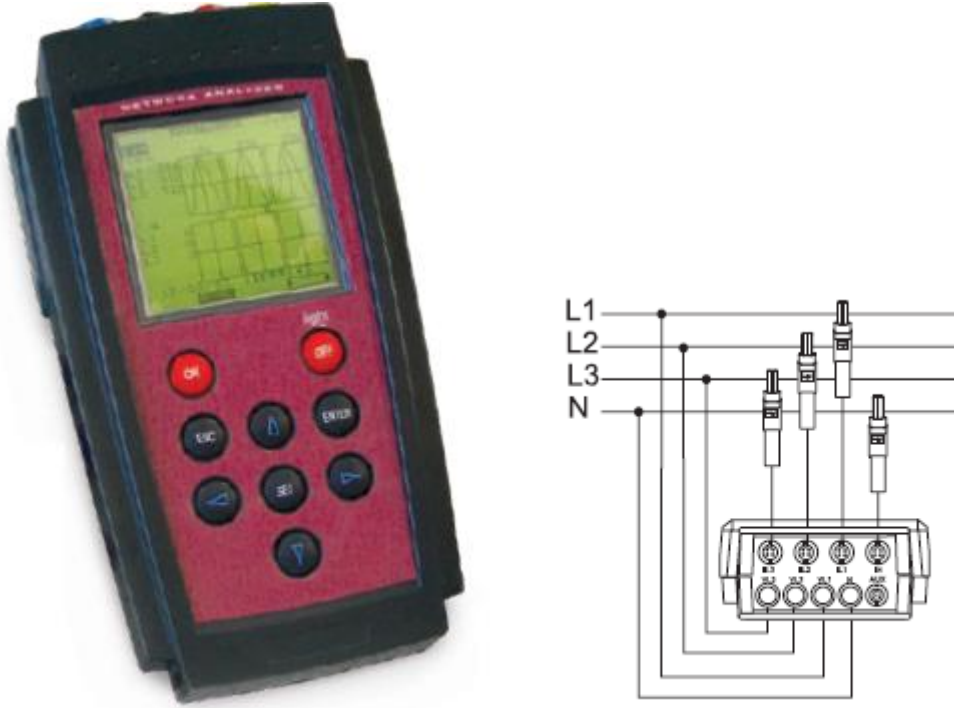
3.2. Enerji Analizör Cihazı ile Ölçümlerin Yapılması

3.2.1. Enerji analizör cihazı

Cihazın sahip olduğu bazı özellikler aşağıda verilmiştir.

- ✓ Tüm elektriksel parametrelerin analizi (voltaj, akım, güç, enerji vb.) yapılabilir,
- ✓ Aşırı ısınma analizi (trafo, kondansatör vb.) yapılabilir,
- ✓ Nötr akım tespiti yapılabilir,
- ✓ Dalga şekillerinin gerçek zamanda ekranda gösterilebilir,
- ✓ Dalga şeklinde zoom yapılabilir,
- ✓ Harmonik bozulmaların ekranda gösterilebilir (30 ya da 50 harmonik),
- ✓ Voltaj ve akım için toplam harmonik distorsiyonu hesaplanabilir,
- ✓ Dalga şekilleri ve harmonik bozulma görülebilir,
- ✓ Harmonik ayrışma (50 üzeri) yapılabilir,
- ✓ Voltaj ve akım için gerçek kök kare değerleri hesaplanabilir,

- ✓ Tablolar ve listeler hazırlamak için de kullanılabilir,
- ✓ Kesintiler, boşluklar, mikro kesintiler, zirve vb. algılama yapabilir,
- ✓ Bozuklukları farklı yakalamak için hassasiyet ayarı vardır,
- ✓ Bozuklukların sayısı ile ilgili bilgilerin tespiti yapılabilir.



Şekil 3.4. Ölçümlerde kullanılan enerji analizör cihazı ve tesisata bağlantı şekli



Şekil 3.5. Ölçümlerde kullanılan akım ve gerilim klempleri

Çizelge 3.4. Ölçümlerde kullanılan enerji analizör cihazına ait teknik özellikler

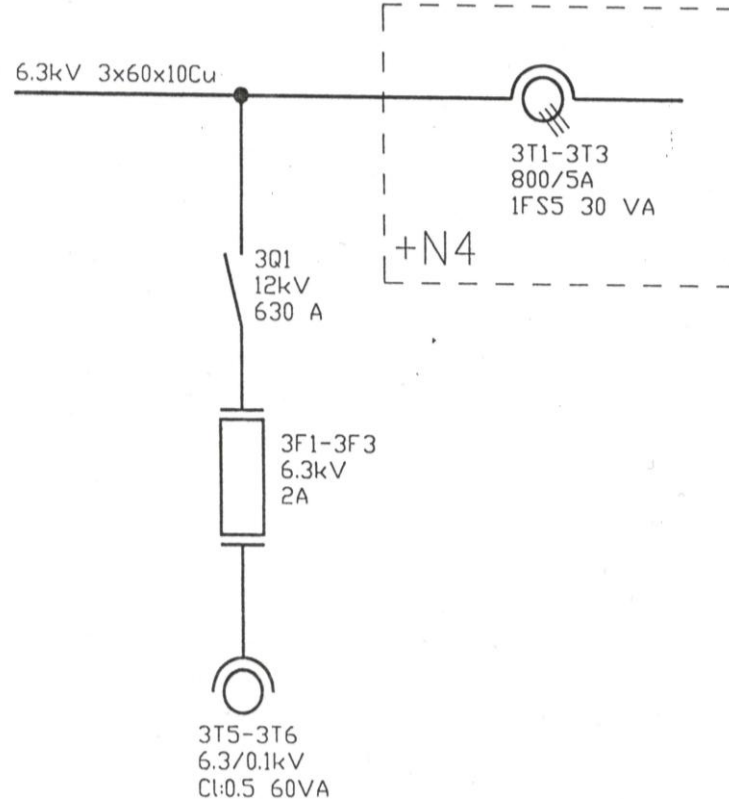
Güç devresi	
Harici besleme	100...240 VAC/12 VDC
Frekans	50...60 Hz
Çıkış gücü	15 VA
Çalışma sıcaklığı	0...+40 °C
Çalışma yüksekliği	≤ 2 000 m
Nemli ortamda çalışma	31 °C altı sıcaklık için %80, 40 °C için 50%
Ölçüm devresi	Üç faz (3 telli) veya Üç faz (3/4 telli)
Kirlilik seviyesi	2
Voltaj devresi	
Ölçüm aralığı	0.01 A...20 kA klemplerle ayarlanabilir
Voltaj ve akım trafosu aralığı	Programlanabilir.
Ölçüm ünitesi	Otomatik değişebilir skala
Dahili hafıza	1 Mb
Doğruluk sınıfı	
Voltaj	0.5 % ± 2 basamak
Akım	0.5 % ± 2 basamak
Aktif güç	1 % ± 2 basamak
Güç faktörü	1 % ± 2 basamak
Yapısal özellikleri	
Gövde	Güçlendirilmiş yalıtım
Tuş takımı / Ekran	Ön panelde
Ekran	LCD 160 x 160 piksel (bakalit)
Akım klemp bağlantıları	3 veya 3/4
Ebatlar	220 x 60 x 130 mm
Ağırlık	800 g
RS-232 çıkış	Seri çıkış

3.2.2. Ölçümlerin yapılması

Şekil 3.6’da görülen akım ve gerilim trafolarına bağlı olan kablolar Şekil 3.5’te görülen ve enerji analizör cihazına ait olan akım ve gerilim klemplerinin bağlanmasını takiben, enerji analizör cihazına tesisle ilgili gerekli parametreler girilerek (Tesisin çalışma gerilimleri, trafo gücü, akım ve gerilim trafolarının çevirme oranları) cihaz çalıştırılmış ve ölçüme başlanmıştır.

Öncelikle kondansatörler devreye alınmadan tüm motorlar çalıştırılarak yüklenmiştir. Bir müddet sonra kondansatör grupları devreye alınmış ve bir müddette bu şekilde kondansatörler devrede iken çalışılmış ve motorlar yüklü iken kondansatör grupları aniden sırayla devreden çıkarılmıştır.

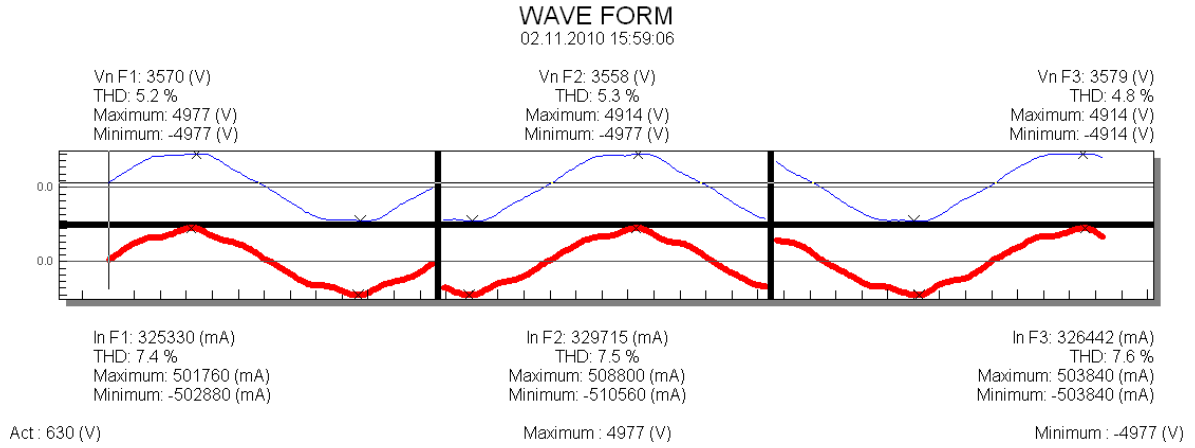
Bu işlemler her iki tesiste de ayrı ayrı yapılmış olup, burada amaç; yükte iken devrede kondansatör olmadan, yükte iken devreye kondansatör alınması anında ve yükte iken aniden kondansatör çıkarma durumunda şebeke enerji kalitesini ve geçici olayları gözlemlemektir.



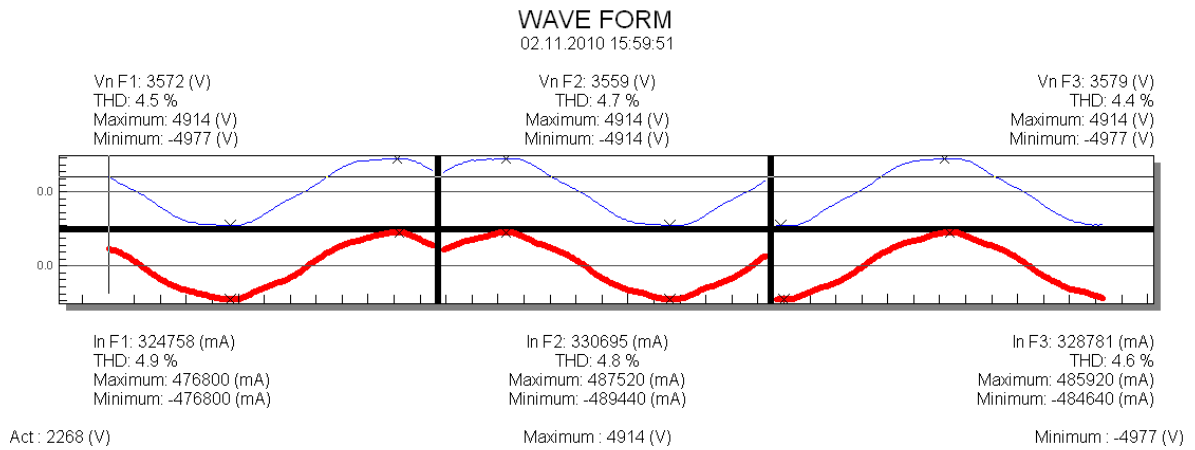
Şekil 3.6. Ölçümün yapıldığı akım ve gerilim trafo değerlerini gösteren tek hat şeması

3.3. Bulgular

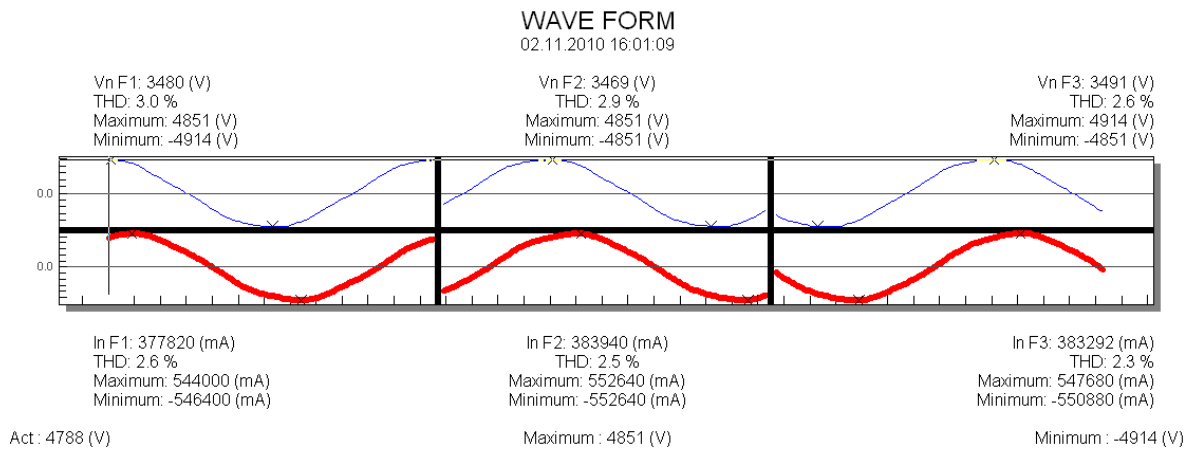
1. Tesis İçin



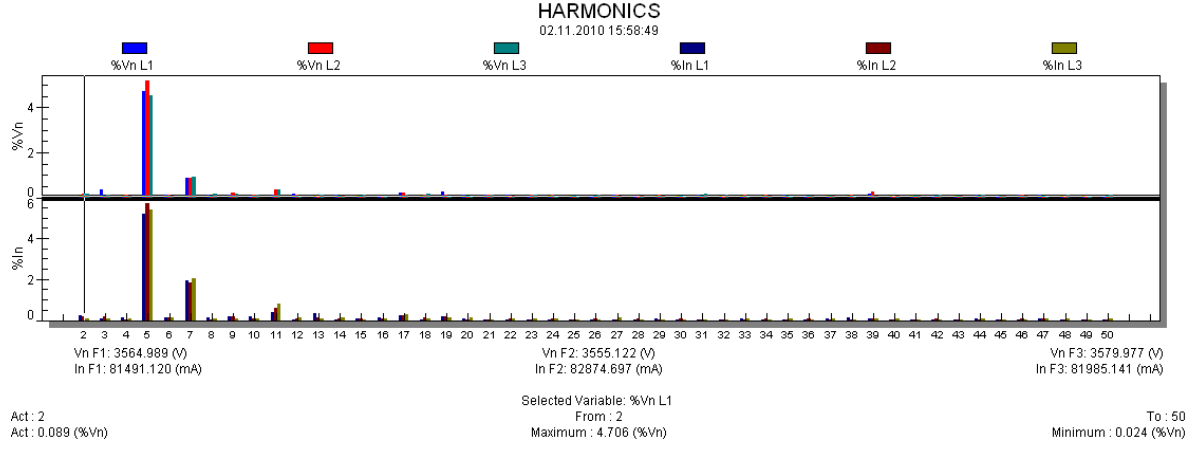
Şekil 3.7. Akım ve gerilim dalga formu grafiği (Kondansatörler devrede iken)



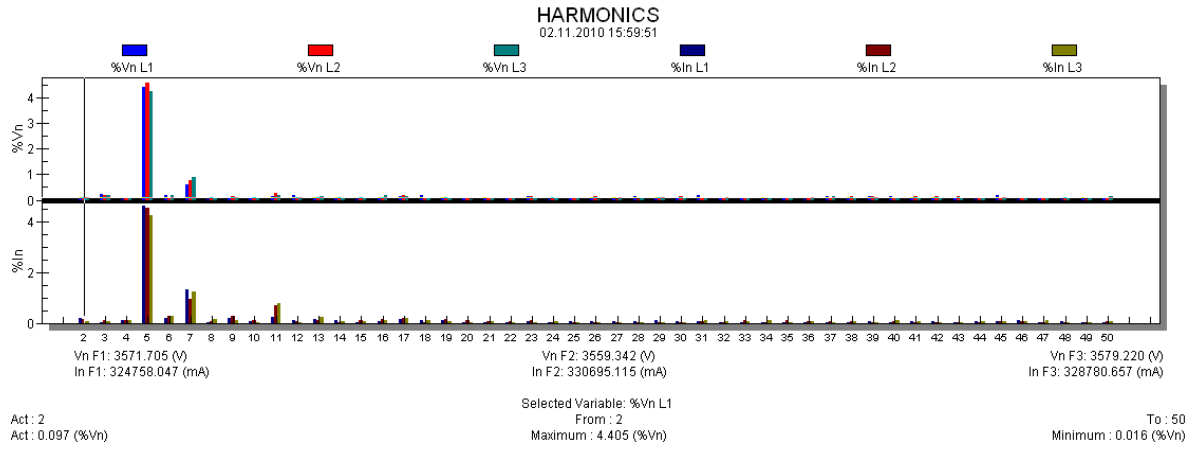
Şekil 3.8. Akım ve gerilim dalga formu grafiği (Kondansatörler devreden çıktığı an)



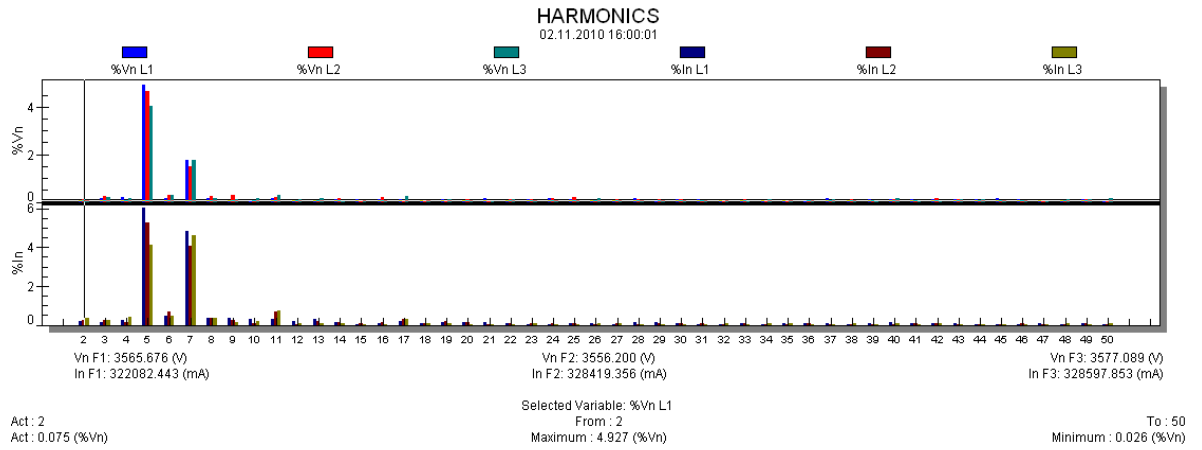
Şekil 3.9. Akım ve gerilim dalga formu grafiği (Kondansatörler devrede değil)



Şekil 3.10. Akım ve gerilim harmonik grafiği (Kondansatörler devrede iken)



Şekil 3.11. Akım ve gerilim harmonik grafiği (Kondansatörler devreden çıktığı an)



Şekil 3.12. Akım ve gerilim harmonik grafiği (Kondansatörler devrede değil)

Tesiste ölçüm alındığı sırada, 3500 kW ile 3510 kW aralığındaki yük değişimlerine karşılık gerilim seviyesinin 6000 V- 6150 V seviyelerinde değiştiği, Akım değerinin ise 325A- 375A aralığındaki değerinde seyrettiği gözlemlenmiştir.

Motorlar ve kondansatörler devrede iken toplam harmonik distorsiyonu;

$$\%THD(V)=\%5,3$$

$$\%THD(I)=\%7,6- 8,2$$

Bu değerler; uluslararası IEC 519- 1992 standartlarında izin verilen gerilim için %3 ve akım için %5 değerlerinin üzerindedir.

Motorlar devrede ve kondansatörler devre dışı iken toplam harmonik distorsiyonu;

$$\%THD(V)=\%2,7$$

$$\%THD(I)=\%2,4$$

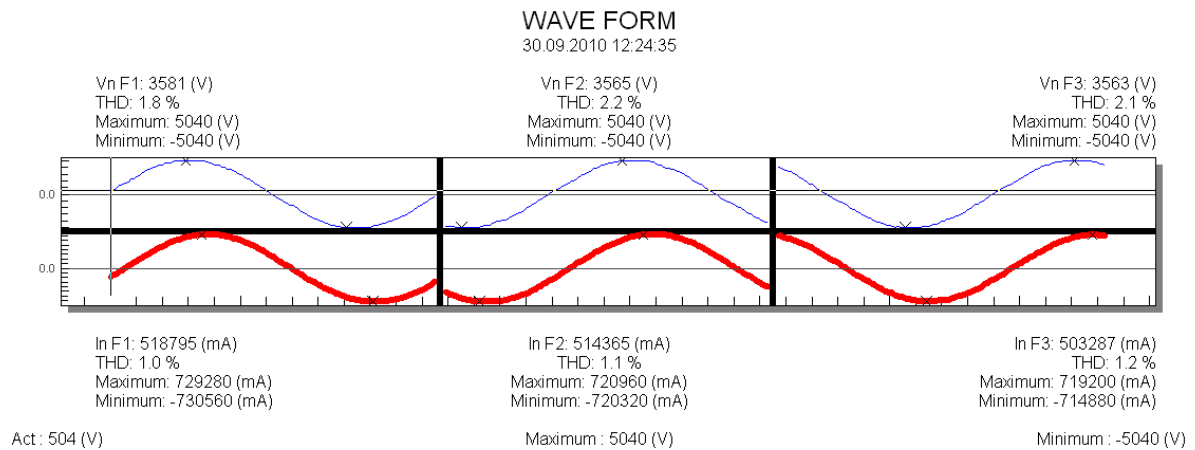
Bu değerler; uluslararası IEC 519- 1992 standartlarında izin verilen gerilim için %3 ve akım için %5 değerlerinin altındadır.

Bu verilere göre; kondansatörlerin devreye girmesiyle 0,87 olan güç faktörü değeri Şekil C.8’de görüldüğü gibi 0,99 istenen değere ulaşmıştır. Kondansatörlerin devreye girmesiyle birlikte harmonik değerleri yükselmektedir.

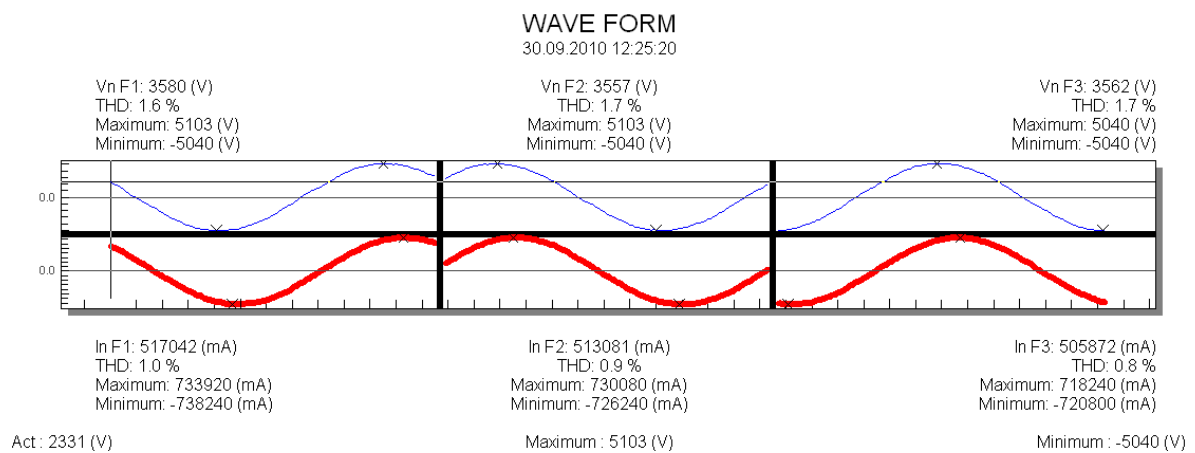
Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da görüldüğü gibi kondansatörler devrede iken akım ve gerilim dalga formlarında harmonik kaynaklı bozulmalar olduğu, kondansatörlerin devreden çıkarıldığı 15.59 anından itibaren akım ve gerilim dalga formlarındaki bozulmalar düzelmeye başlamıştır.

Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de görüldüğü gibi kondansatörler devrede iken akım ve gerilime ait 5. ve 7. harmonik değerleri yüksekken kondansatörler devreden çıkarıldıktan sonra 5. ve 7. harmonik değerleri düşmüştür.

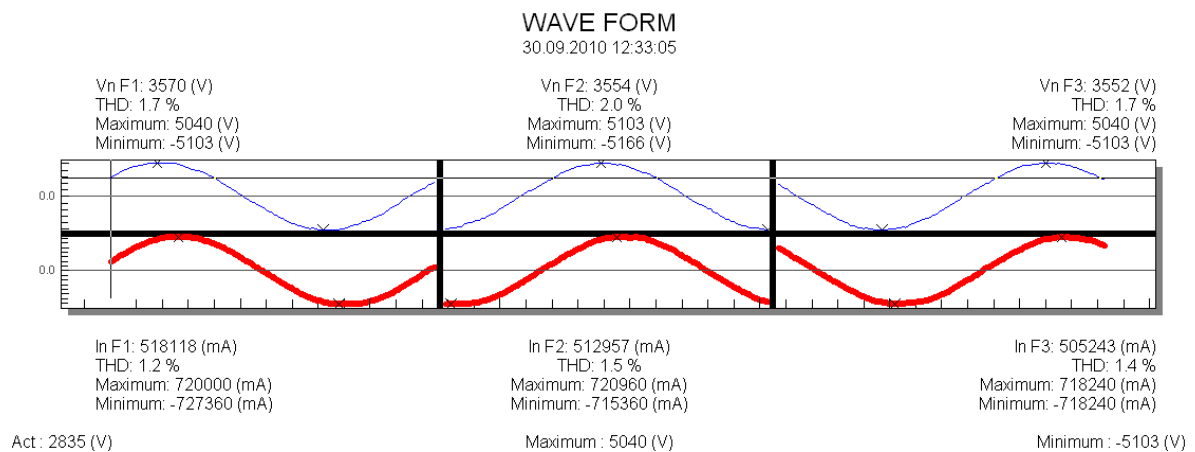
2. Tesis İçin



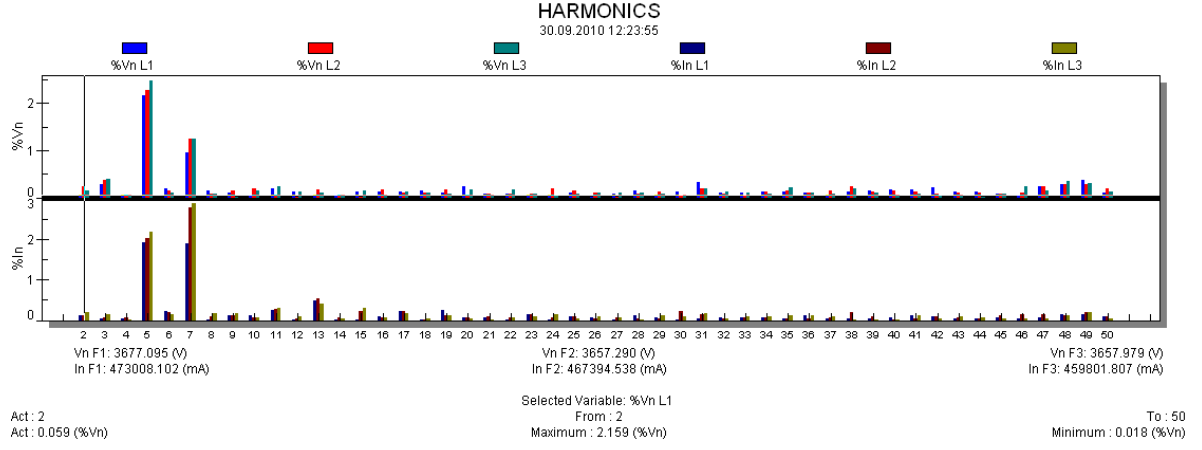
Şekil 3.13. Akım ve gerilim dalga formu grafiği (Kondansatörler devrede iken)



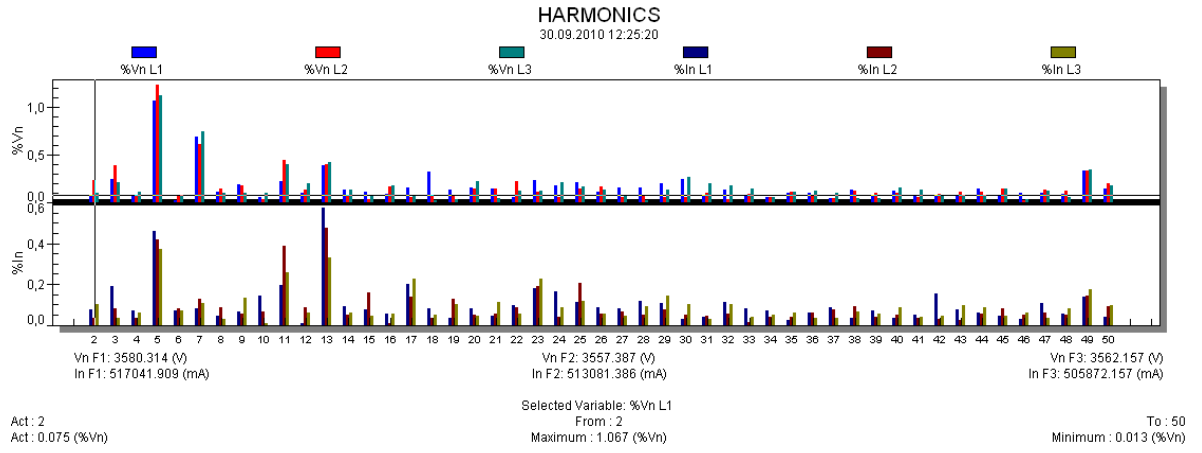
Şekil 3.14. Akım ve gerilim dalga formu grafiği (Kondansatörler devreden çıktığı an)



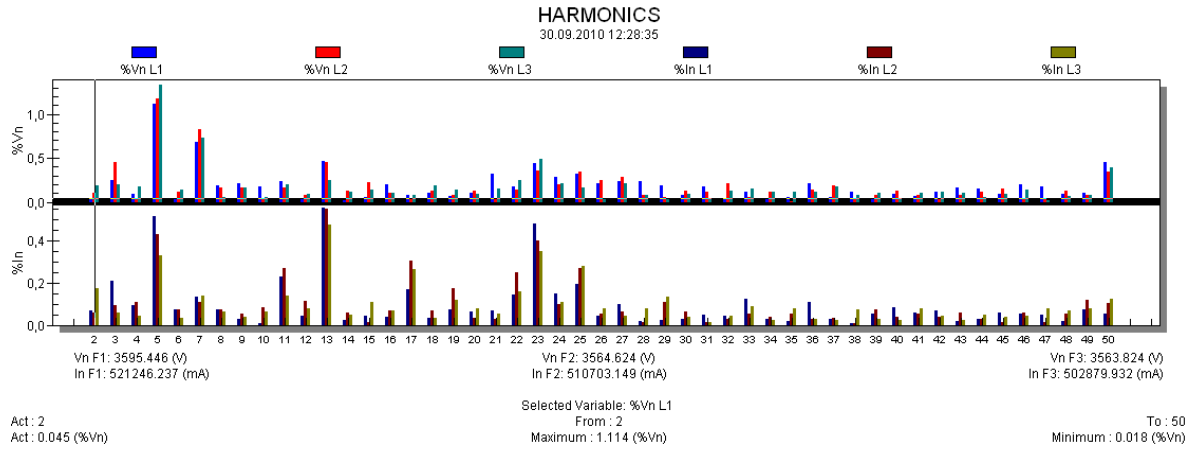
Şekil 3.15. Akım ve gerilim dalga formu grafiği (Kondansatörler devrede değil)



Şekil 3.16. Akım ve gerilim harmonik grafiği (Kondansatörler devrede iken)



Şekil 3.17. Akım ve gerilim harmonik grafiği (Kondansatörler devreden çıktığı an)



Şekil 3.18. Akım ve gerilim harmonik grafiği (Kondansatörler devrede değil)

Tesiste ölçüm alındığı sırada, 5130 kW ile 5180 kW aralığındaki yük değişimlerine karşılık gerilim seviyesinin 6000 V- 6300 V seviyelerinde değiştiği, Akım değerinin ise 470 A- 545 A aralığındaki değerinde seyrettiği gözlemlenmiştir.

Motorlar ve kondansatörler devrede iken toplam harmonik distorsiyonu;

$$\%THD(V)=\%2,9$$

$$\%THD(I)=\%3,8$$

Bu değerler; uluslararası IEC 519- 1992 standartlarında izin verilen gerilim için %3 ve akım için %5 değerlerinin altındadır.

Motorlar devrede ve kondansatörler devre dışı iken toplam harmonik distorsiyonu;

$$\%THD(V)=\%1,8$$

$$\%THD(I)=\%1,4$$

Bu değerler; uluslararası IEC 519- 1992 standartlarında izin verilen gerilim için %3 ve akım için %5 değerlerinin altındadır.

Bu verilere göre; kondansatörlerin devreye girmesiyle 0,89 olan güç faktörü değeri Şekil D.8’de görüldüğü gibi 0,99 istenen değere ulaşmıştır. Kondansatörlerin devreye girmesiyle birlikte harmonik değerleri yükselmektedir.

Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de görüldüğü gibi kondansatörler devrede iken akım ve gerilim dalga formlarında harmonik kaynaklı bozulmalar olduğu, kondansatörlerin devreden çıkarıldığı 12.25 anından itibaren akım ve gerilim dalga formlarındaki bozulmalar düzelmeye başlamıştır.

Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de görüldüğü gibi kondansatörler devrede iken akım ve gerilime ait 5. ve 7. harmonik değerleri düşükken kondansatörler devreden çıkarıldıktan sonra 5. ve 7. harmonik değerleri yükselmiştir.

4. SONUÇLAR

1. Tesiste motorlar ve kondansatörler devrede iken toplam harmonik distorsiyonu;

$$\%THD(V)=\%5,3$$

$$\%THD(I)=\%7,6- 8,2$$

şeklinde çıkmış olup, bu değerler; uluslar arası IEC 519- 1992 standartlarında izin verilen (gerilim için %3 ve akım için %5) değerlerinin üzerindedir. Kondansatörlerin devreye girmesiyle birlikte harmonik değerleri yükselmektedir. Bu değerlere göre kondansatörler aşırı harmonik altında çalışmaktadır. Kondansatörlerin devreye girmesiyle 0,87 olan güç faktörü değeri 0,99 istenen değere ulaşmıştır.

Bu tesisin kompanzasyon sisteminin gözden geçirilmesi ve uygun bir filtre tasarımı ile harmoniklerin filtrelenmesi gerekmektedir.

2. Tesiste motorlar ve kondansatörler devrede iken toplam harmonik distorsiyonu;

$$\%THD(V)=\%2,9$$

$$\%THD(I)=\%3,8$$

şeklinde çıkmış olup, bu değerler; uluslar arası IEC 519- 1992 standartlarında izin verilen gerilim için %3 ve akım için %5 değerlerinin altındadır. Kondansatörlerin devreye girmesiyle birlikte harmonik değerleri yükselmektedir. Kondansatörlerin devreye girmesiyle 0,89 olan güç faktörü değeri 0,99 istenen değere ulaşmıştır.

Tesislerde kullanılan enerji, oldukça harmonik olup, gerilim düşümü olması nedeniyle motorlar zaman zaman düşük gerilim altında çalışmaktadır.

Harmonik değerleri yüksek olan bir gerilim altında çalışan OG kondansatörlerinde zaman içerisinde şu durumların olması kaçınılmazdır:

✓ Kondansatörlerin nominal şartlardaki değerleri (akım, gerilim ve reaktif güç değerleri) değişecektir.

✓ Kondansatörlerin dielektrik malzemesinde zorlanmalar olacak ve dielektrik kayıplarının artacaktır.

✓ Sinüzoidal besleme ile aynı efektif değerli nonsinüzoidal besleme durumunda kondansatörün akım değeri ve reaktif güç değeri artış göstermektedir; yani kondansatör aşırı akım ve aşırı reaktif yükü yüklenmektedir. Artan akım ile birlikte tesiste bulunan tüm

kablolarda, transformatör sargılarında ve motor sargılarında ısınmaların artması, transformatörlerdeki bakır ve demir kayıplarında artışlar olması ve verimin düşmesi durumu kaçınılmazdır. Örneğin; iki harmonik bileşenin temel bileşen içerisindeki yüzdesi aynı olsa bile büyük dereceli harmonik bileşenlerin küçük dereceli harmonik bileşenlere göre oluşturacağı aşırı akım değeri ve aşırı reaktif güç değeri daha fazla olacaktır. Bu durum kondansatörlerin ömrünü kısaltacaktır.

✓ Kondansatörler bağlı olduğu sistemde gerilim yükselmesine neden olduklarından yüklerin az bulunduğu bir zaman diliminde, sistemdeki transformatörleri doyma bölgesine sokarak harmonik bileşenlerin artmasına da neden olabileceklerdir.

Kondansatörlere seri olarak bağlanan harmonik filtre rezonans reaktörleri, sistemin kompanzasyon gücünü de etkilemektedirler. Piyasada değişik salınım frekanslarına göre ayarlanmış harmonik rezonans reaktörleri bulunmaktadır. Bir kompanzasyon sistemi tasarlanırken bütün bu etkiler göz önünde bulundurularak kondansatör ve reaktör seçimi buna göre yapılmalıdır.

Kondansatörler devre dışı olduktan sonra muhakkak boşaltılmalıdır. Boşaltılmamışsa üzerinde kalan gerilime, tekrar devreye girmede, şebeke gerilimi de ilave olarak gelecek ve kondansatör gücü gerilimin karesi ile orantılı olduğundan kondansatör kendi gücünden daha fazla bir güçteymiş gibi akım çekecektir.

Kondansatörler şebekedeki harmoniklerden en çok etkilenen elemanlardır. Kondansatörün kapasitif direnci frekans arttıkça azalır. Kondansatör reaktansı,

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (4.1)$$

şeklinde gösterilir.

Harmonik barındıran gerilimin varlığı, kondansatörlerin büyük bir akım çekerek aşırı yüklenmesine ve sonucunda sistemde var olan harmoniklerin artmasına sebep olmaktadır. Oluşan bu yüksek akım nedeniyle kondansatörlerde aşırı ısınma ve dielektrik kayıplar meydana gelecektir.

Harmonikler nedeniyle, tesislerdeki efektif akım değerinin arttığı görülmüştür. Harmonik içeren bir şebekede, kompanzasyon ünitesi olmayan bir tesiste harmonik üretici yüklerin oluşturduğu harmonik akımların çoğu transformatör üzerine yönelir, az bir kısmı ise yük seviyesinde belirir. Kompanzasyon ünitesi olan tesislerde ise kondansatörlerin

direncinin düşük olması nedeniyle harmonik akımların çoğunluğu kondansatörler üzerine yönelir (Şekil C.1, Şekil C.2, Şekil D.1 ve Şekil D.2). Kondansatörler lineer yüklerdir ve harmonik üretmezler ancak, şebekede var olan harmoniklerin genliklerini artırır (Şekil C.9 ve Şekil D.9). Endüktif karakteristikteki şebekeye paralel bağlanan kondansatörler, paralel rezonansa sebep olurlar. Bu durumda rezonans frekansında empedans artışı görülür ve böylelikle sistemde var olan harmoniklerin genliğinde artışlar olur.

Kondansatörlerin enerjideki bozulmalardan etkilenmemeleri için tesislerde muhakkak iyi tasarlanmış filtreler olmalı ve belli periyotlarda gerekli ölçümler yapılarak tedbirler alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- ABB Elk. San. A.Ş., 2006. Enerji Kalitesi Kataloğu, İstanbul. 24s.
- Adak, S., 2003. Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonunun Azaltılması. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 139s.
- Akpınar, E., 2007. Kompanzasyon ve Harmonik Filtreleme- 2. EMO İzmir Şubesi Teknik Dergi, İzmir. 21- 23.
- Arrillaga, J., Bradley, D.A. ve Bodger, P.S., 1985. Power System Harmonics, John Wiley&Sons, Norwich, New York.
- Atmaca, E., 1995. Harmoniklerin Elektrik Donanımları Üzerine Etkileri, İstanbul. 3e, s.59- 65.
- Aydın, U., 2006. Kampüs Tipi Yerleşim Birimlerinde Kompanzasyon ve Harmonik Açısından Güç Analizleri. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya. 93s.
- Bayram, M., 1991. Güç Katsayısının Düzeltilmesi ve Güç Kondansatörleri, İstanbul.
- Bayram, M., 2004. Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu, İstanbul.
- Başman, F., 2006. Elektrik Enerji Sistemlerinde Harmonikler ve Filtreleme. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya. 99s.
- Bilge, M., 2008. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Eliminasyonu. Yüksek Lisans Tezi Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kahramanmaraş. 54s.
- Demirkol, Ö., 2006. Harmonik İçeren ve Dengesiz Şebekelerde Ölçme ve Kompanzasyon. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya. 78s.
- Doggan, E. ve Morrison, E.R., 1993. Prediction of Harmonic Voltage Distortion When a Nonlinear Loads is Connected to an Already Distorted Supply. IEE Proceedings-C, Vol 140 No.3, pp. 161- 166.
- Dommel, H.V., Yan, A. ve Wei, S., 1986. Harmonics from Transformer Saturation. IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRD-1, No.2: 209-215.

- Efe, S.B., 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi. Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Malatya. 69s.
- Engin, B., 2008. Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Kompanzasyon ve Enerji Kalitesi Sorunları. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü. İstanbul. 115s.
- Erkan, E., 1996. Nonlineer Yüklerde Güç Faktörünün İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 85s.
- Ertan, U., 1994 Elektrik Şebekelerinde Harmonikler. Kaynak Elektrik, İstanbul. s.109- 115.
- Filiz, C., 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Filtrelemelerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kırıkkale. 76s.
- Hidayetoğlu, S., 2006. Orta ve Yüksek Gerilim Kondansatör Dizisi Tasarımı. Elektrik Mühendisliği Dergisi, İstanbul. 332 I 333: s.109- 112.
- İnan, A. 2008. Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri, İstanbul.
- Kakilli, A., Tunçalp, K., Sucu, M., 2008. Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, Elazığ. 20 (1), 110.
- Kaypmaz, A., Engin, B., 2009. Enerji Verimliliği ve Tasarrufu Açısından Kompanzasyon ve Enerji Kalitesi Çalışmaları, İstanbul.
- Kocabaş, E., 2006. Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya. 185s.
- Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O., 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler. Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Kocatepe, C., 1995. Sinüzoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), 2007. Kompanzasyon Sistemi, Ankara. 77s.

- MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi)., 2007. Kompanzasyon Cihazları ve Montajı, Ankara. 43s.
- Onur, A., Kasım, E., 2005. Harmonikler ve Harmoniklerin Çözümünde Farklı Yöntemler. WIN'05 Endüstriyel Etkinlikleri, İstanbul.
- Rps Mühendislik., 2009. Reaktif Güç Kompanzasyonu. Teknik Doküman, İstanbul.
- Schneider Elk. San. ve Tic. A.Ş., 2004. Merlin Gerin Kompanzasyon Çözümleri ve Harmonikler Kataloğu, İstanbul. 15s.
- Sucu, M., 2003. Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu. Doktora Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 110s.
- Szabados, B. ve Lee, J., 1981. Harmonic Impedance Measurements on Transformers. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-100: pp.5020-5026.
- Tanrıöven, M., İnce, R., 2007. Elektrik Güç Sisteminin Kalitesini Bozan Faktörlerin İncelenmesi, İstanbul.
- TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, 2009. III. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli.
- Tunçalp, K., Sucu, M., 2006. Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinde Pasif Filtre ve Filtreli Kompanzasyonun Kullanımı ve Simülasyon Örnekleri. Politeknik Dergisi, İstanbul. c 9, s 4: 263- 269.
- Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş., 2007 Trafo Merkezleri OG-AG Güç Kalitesi Ölçüm Teknik Şartnamesi, Ankara.

EKLER

Ekler Dizini

	Sayfa No
Ek-A. Ülkemizde O.G., Y.G. ve Ç.Y.G. güç sistemlerinde kabul edilebilir akım harmonik limitleri.....	80
Çizelge A.1. Ülkemizde O.G., Y.G. ve Ç.Y.G. güç sistemlerinde akım harmonik limitleri	80
Ek-B. Ölçümlerin yapıldığı tesislere ait tek hat şemaları	81
Şekil B.1. Tesise ait OG reaktif güç kompanzasyon sisteminin tek hat şeması	81
Şekil B.2. Tesisin 34,5/6,3 kV şalt merkezi tek hat şeması	82
Şekil B.3. 6,3 kV giriş ve ölçü hücreleri tek hat şeması	83
Şekil B.4. 1600 kW'lık 1, 2 ve 3 nolu motorlara ait tek hat şeması	84
Şekil B.5. 1600 kW'lık 4 nolu motora ait tek hat şeması	85
Şekil B.6. Ölçümlerin yapıldığı akım ve gerilim trafolarının bulunduğu ölçü hücresine ait tek hat şeması.....	86
Ek-C. 1. Tesiste yapılan ölçümlere ait grafikler	87
Şekil C.1. Fazlar arası ve 3 faza ait toplam gerilim grafiği	87
Şekil C.2. Fazlar arası gerilim grafiği	87
Şekil C.3. Her faza ve toplam akıma ait grafik	88
Şekil C.4. 3 faz toplam akım grafiği	88
Şekil C.5. Aktif güç, reaktif güç ve görünür güç grafiği	89
Şekil C.6. Aktif güç grafiği	89
Şekil C.7. Aktif enerji, reaktif enerji ve frekans grafiği	90
Şekil C.8. Güç faktörü grafiği	90
Şekil C.9. Akım ve gerilim toplam harmonik distorsiyon (THD) grafiği.....	91
Şekil C.10. Gerilim disturbances grafiği.....	91
Ek-D. 2. Tesiste yapılan ölçümlere ait grafikler	92
Şekil D.1. Fazlar arası ve 3 faza ait toplam gerilim grafiği	92

Şekil D.2. Fazlar arası gerilim grafiği.....	92
Şekil D.3. Her faza ve toplam akıma ait grafik.....	93
Şekil D.4. 3 faz toplam akım grafiği.....	93
Şekil D.5. Aktif güç, reaktif güç ve görünür güç grafiği	94
Şekil D.6. Aktif güç grafiği.....	94
Şekil D.7. Aktif enerji, reaktif enerji ve frekans grafiği	95
Şekil D.8. Güç faktörü grafiği.....	95
Şekil D.9. Akım ve gerilim toplam harmonik distorsiyon (THD) grafiği	96
Şekil D.10. Gerilim disturbances grafiği	96

Ek-A: Ülkemizde O.G., Y.G. ve Ç.Y.G. güç sistemlerinde kabul edilebilir akım harmonik limitleri

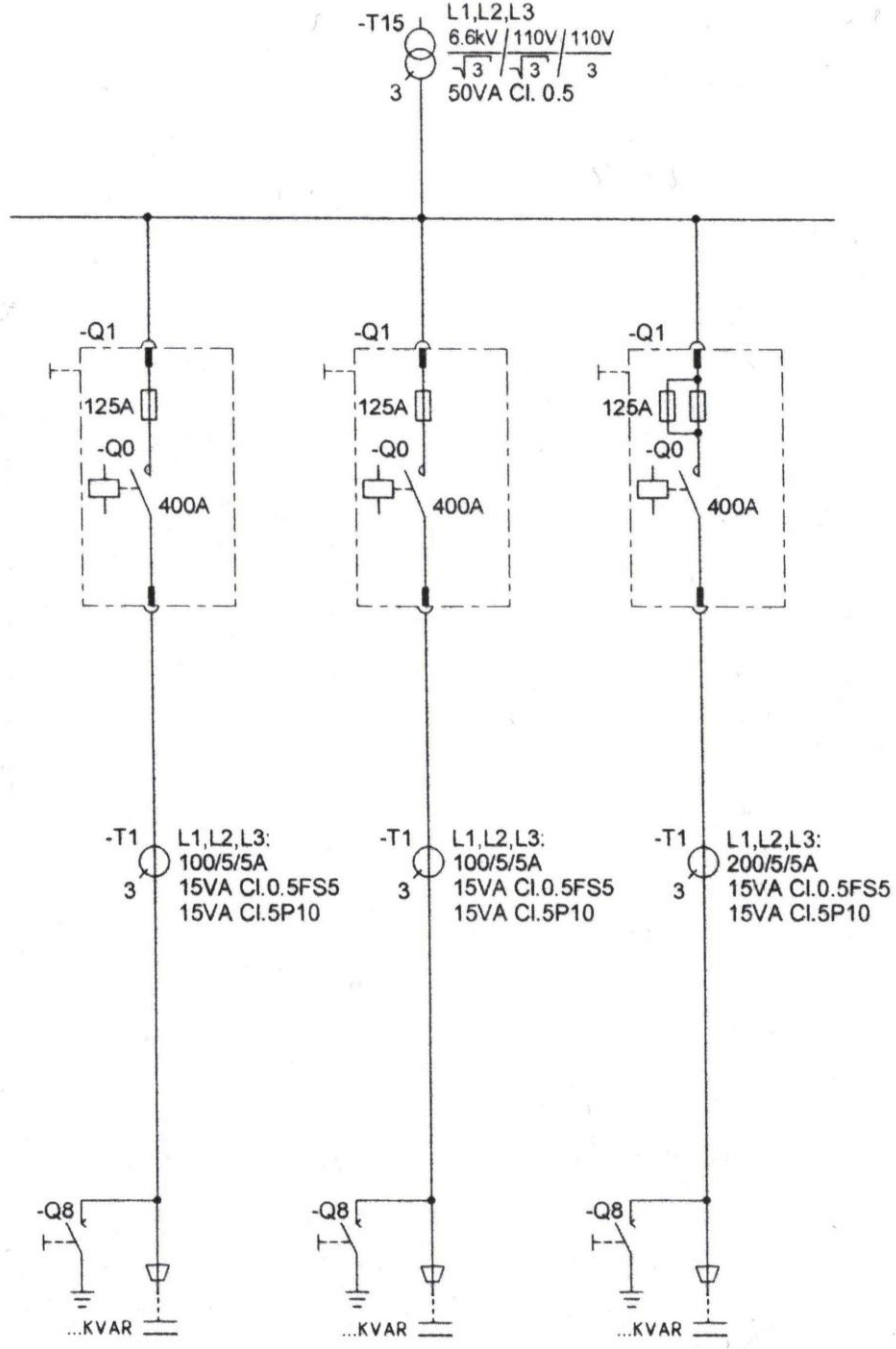
Çizelge A.1. Ülkemizde O.G., Y.G. ve Ç.Y.G. güç sistemlerinde akım harmonik limitleri

Harmonik Sırası		OG 1<Un<34.5					YG 34.5<Un<154					ÇYG Un>154				
Grup	No	Ik/II					Ik/II					Ik/II				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
T	3	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	5	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	7	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
E	9	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	11	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	13	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
K	15	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	17	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	19	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
H	21	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	23	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	25	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
A	27	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	29	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	31	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
R	33	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	h>33	0,3	0,5	0,7	1	1,4	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7	0,75	0,12	0,17	0,25	0,35
Çift harmonikler izleyen tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.																
Toplam Akım Distorsiyonu		5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5
Bu değerler 3 saniyelik ortalamalardır.																

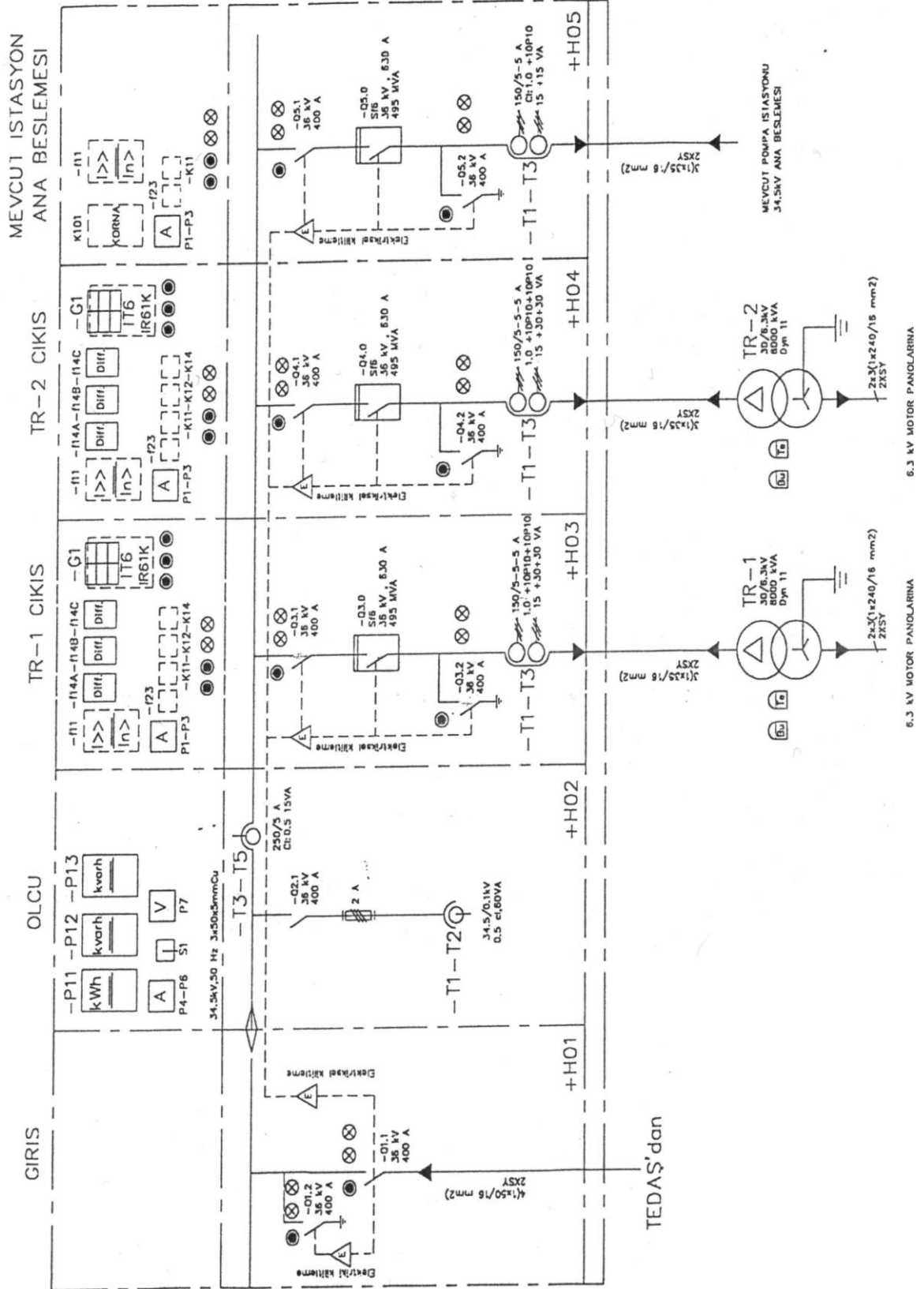
Ik: Ortak kuplaj noktasındaki maksimum sistem kısa devre akımı

II: Ortak kuplaj noktasındaki maksimum yük akımının en büyük bileşeni

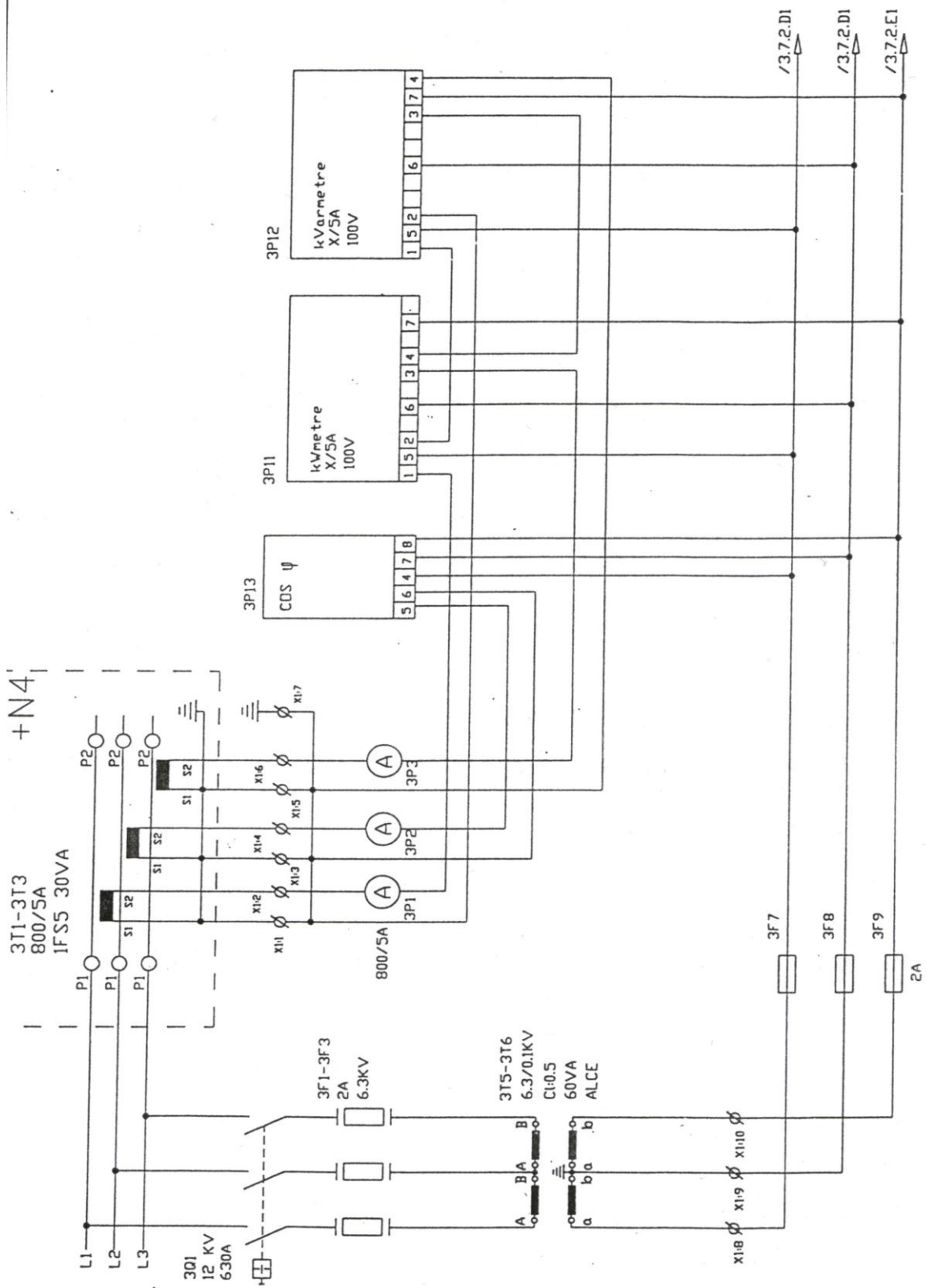
Ek-B: Ölçümlerin yapıldığı tesislere ait tek hat şemaları



Şekil B.1. Tesise ait OG reaktif güç kompanzasyon sisteminin tek hat şeması

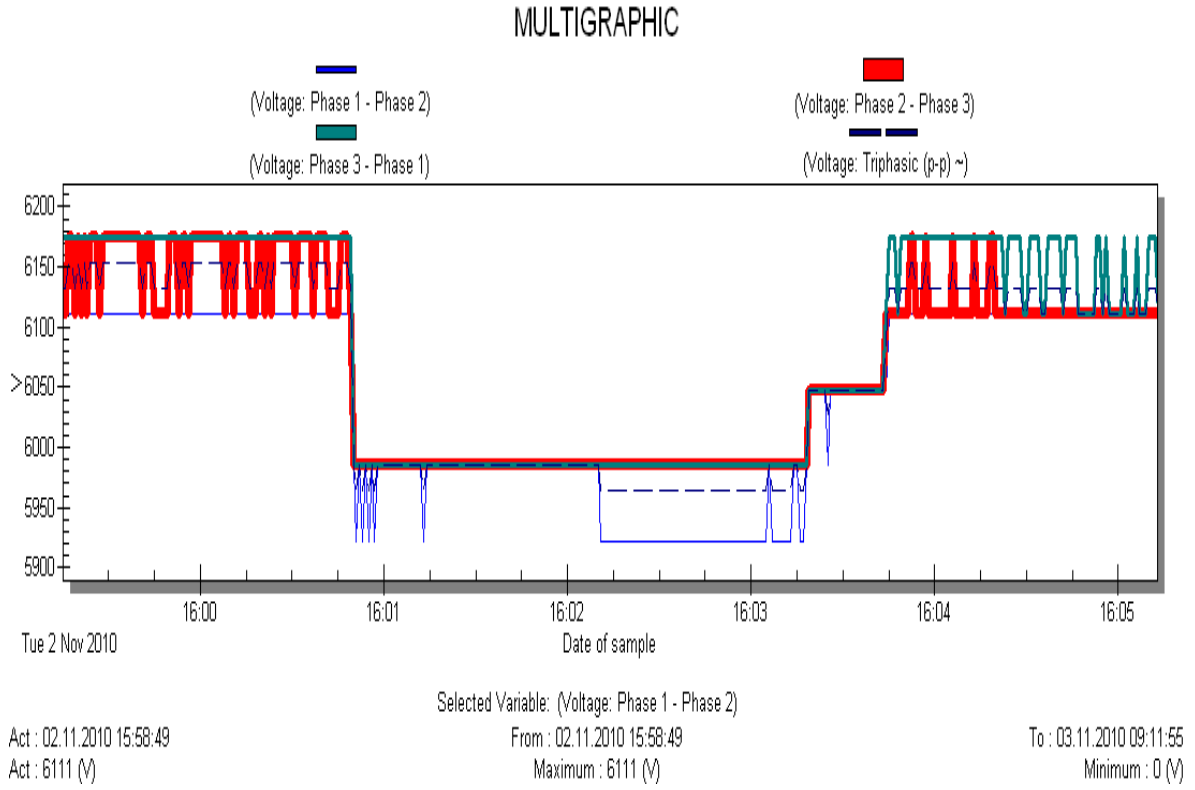


Şekil B.2. Tesisin 34,5/6,3 kV şalt merkezi tek hat şeması

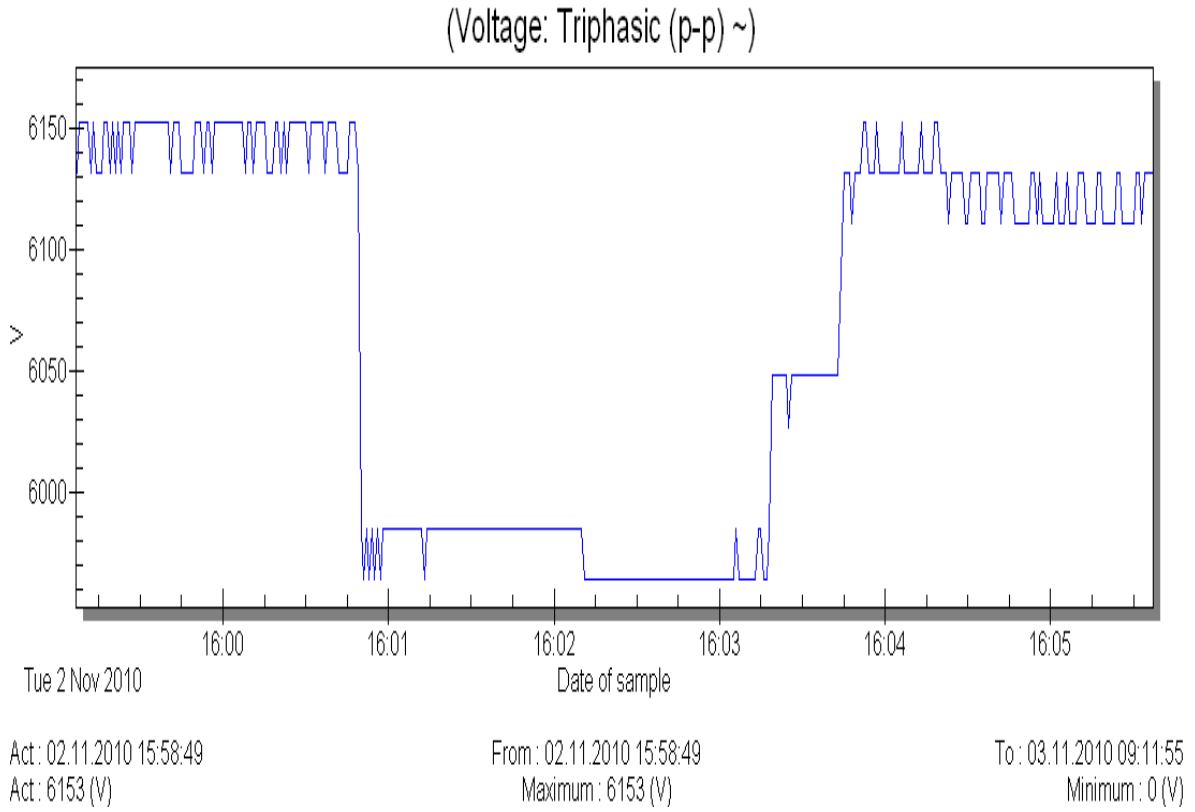


Şekil B.6. Ölçümlerin yapıldığı akım ve gerilim trafolarının bulunduğu ölçü hücresine ait tek hat şeması

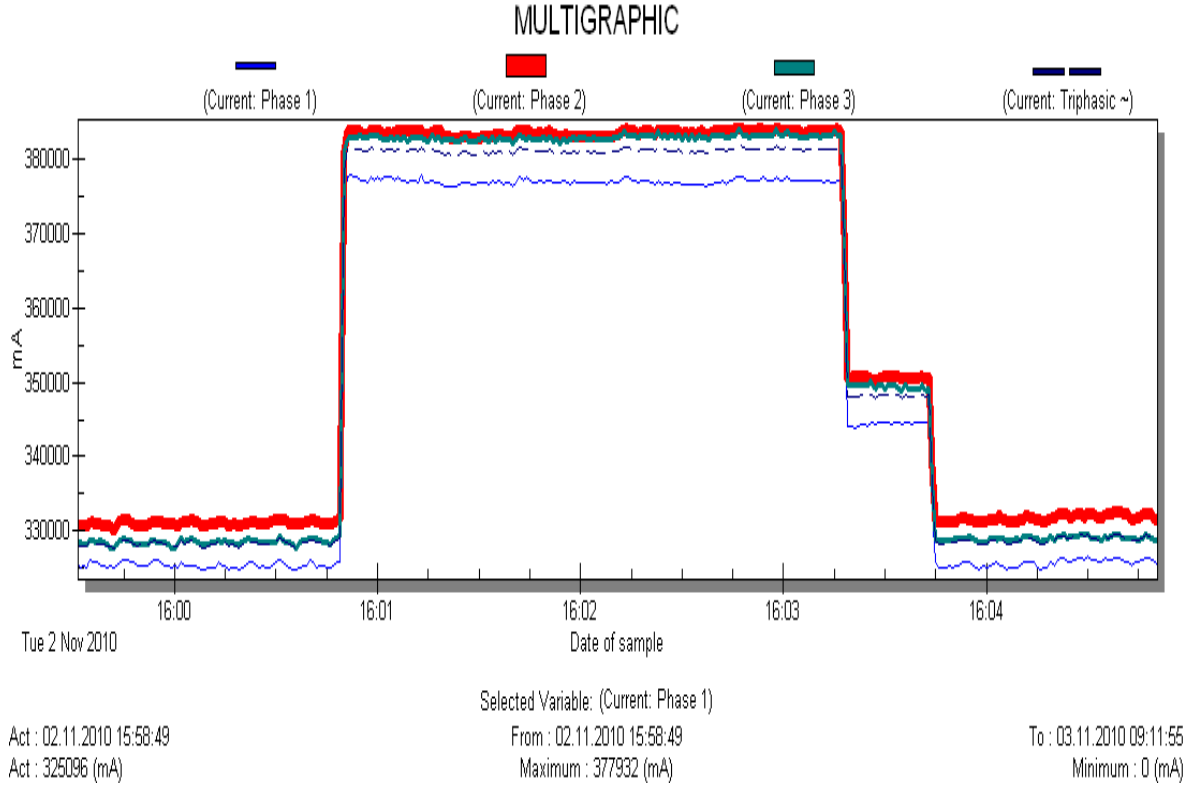
Ek-C: 1. Tesiste yapılan ölçümlere ait grafikler



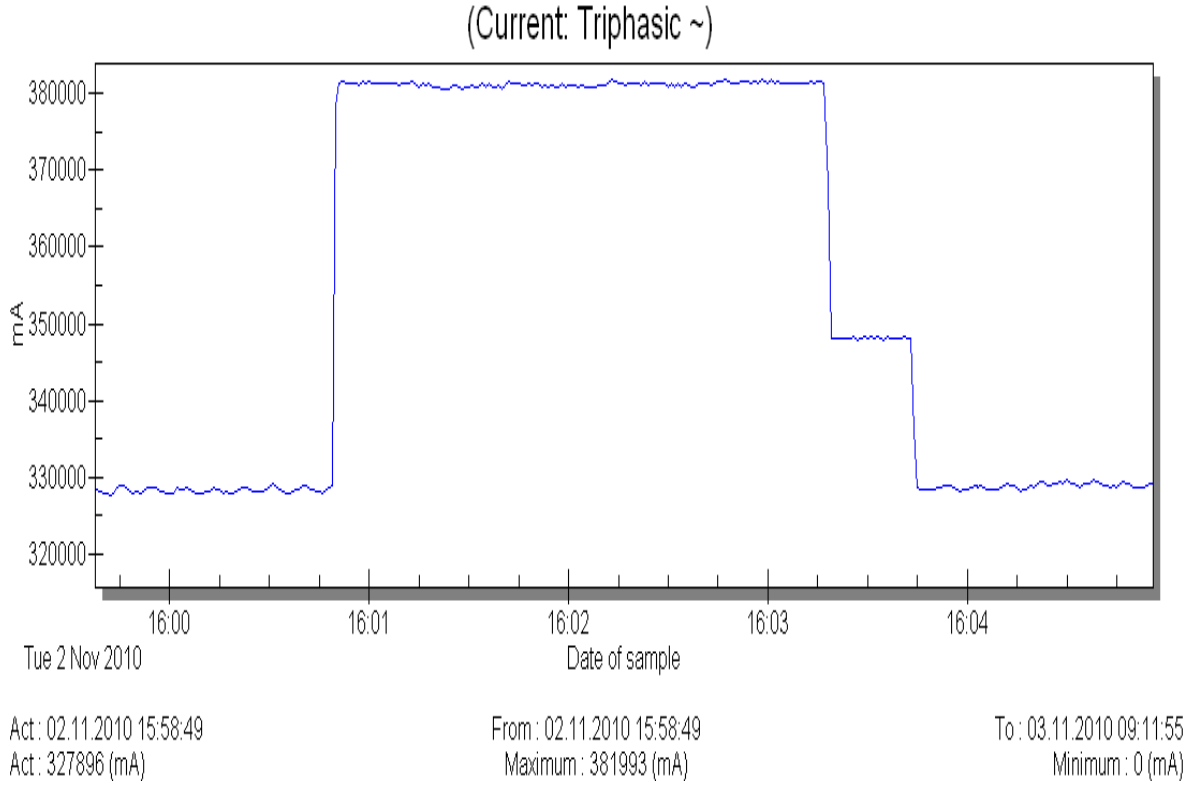
Şekil C.1. Fazlar arası ve 3 faza ait toplam gerilim grafiği



Şekil C.2. Fazlar arası gerilim grafiği

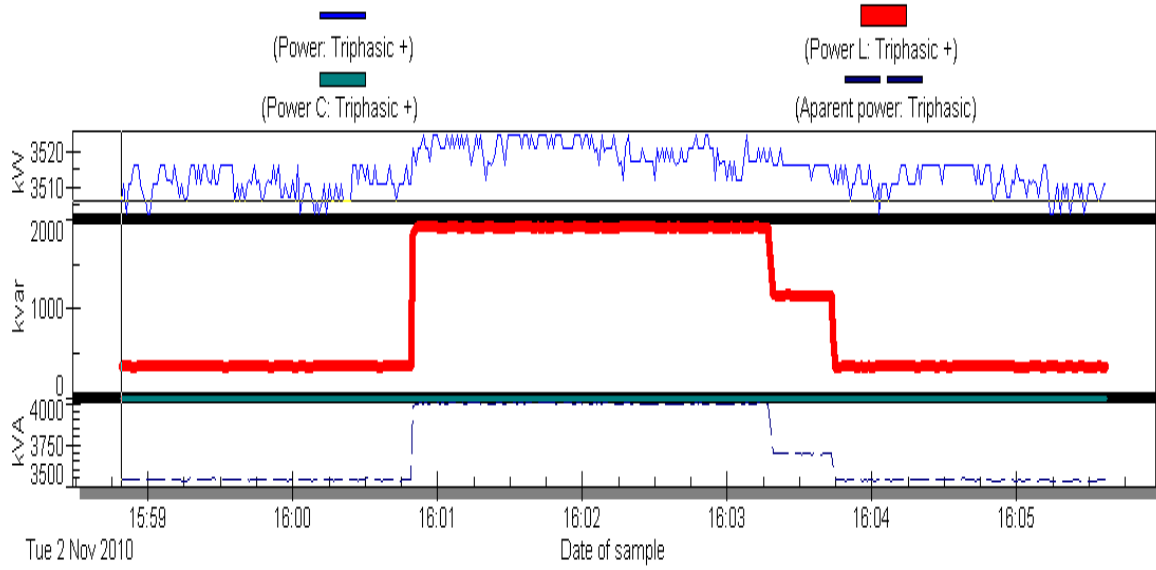


Şekil C.3. Her faza ve toplam akıma ait grafik



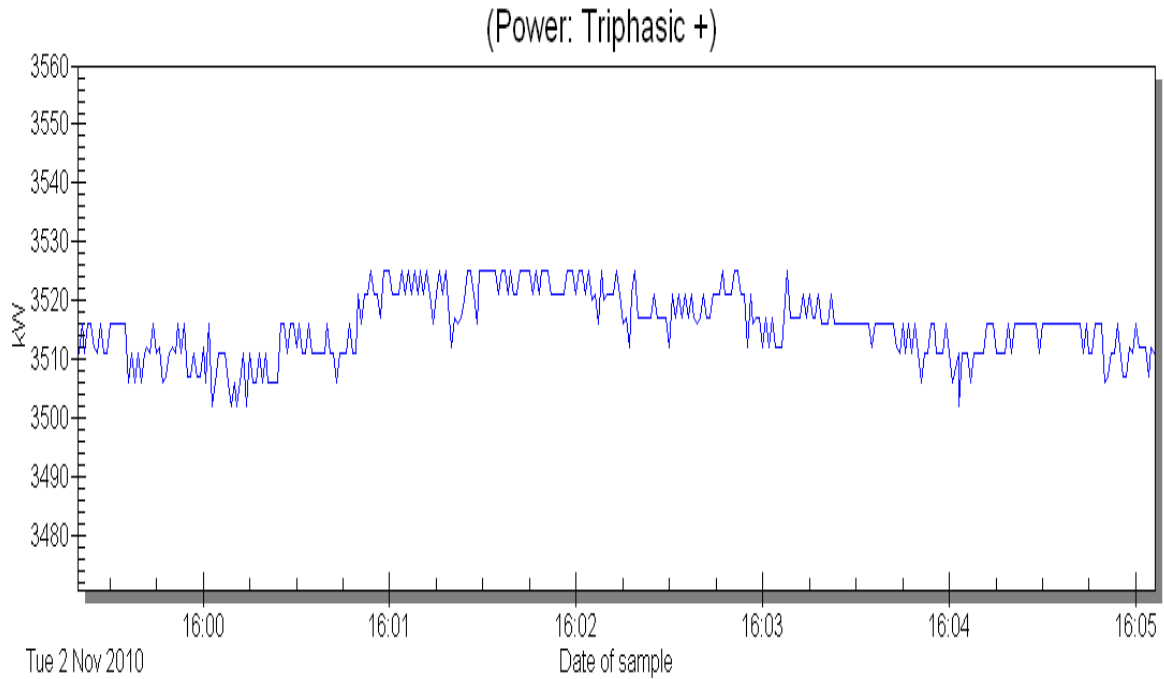
Şekil C.4. 3 faz toplam akım grafiği

MULTIGRAPHIC



Selected Variable: (Power: Triphasic +)
 Act: 02.11.2010 15:58:49 From: 02.11.2010 15:58:49 To: 02.11.2010 16:05:37
 Act: 3506 (kW) Maximum: 3525 (kW) Minimum: 3502 (kW)

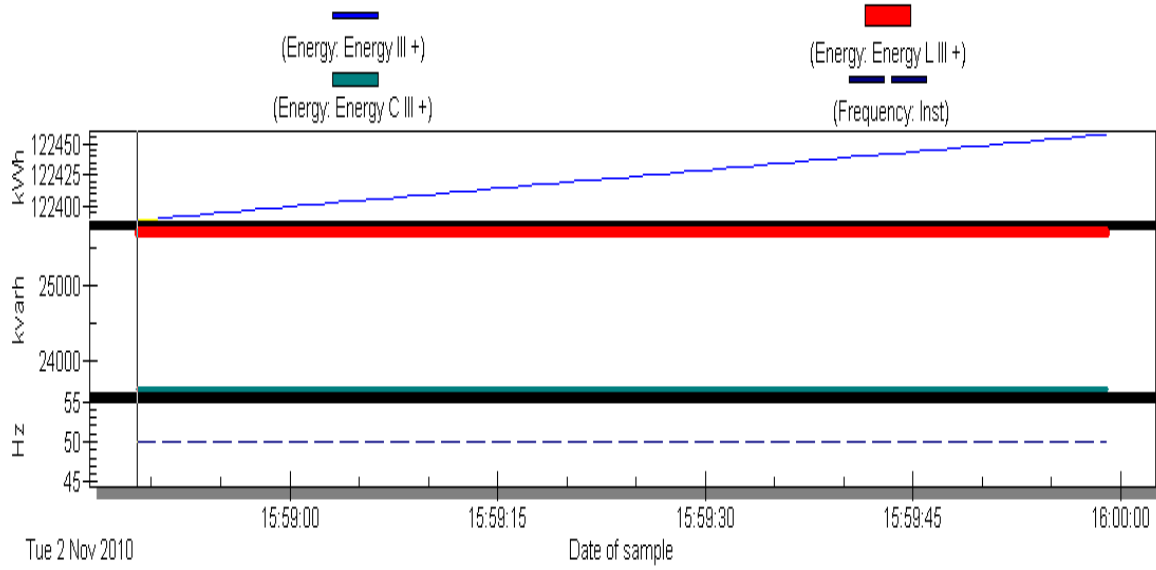
Şekil C.5. Aktif güç, reaktif güç ve görünür güç grafiği



Act: 02.11.2010 15:58:49 From: 02.11.2010 15:58:49 To: 03.11.2010 09:11:55
 Act: 3506 (kW) Maximum: 3525 (kW) Minimum: 0 (kW)

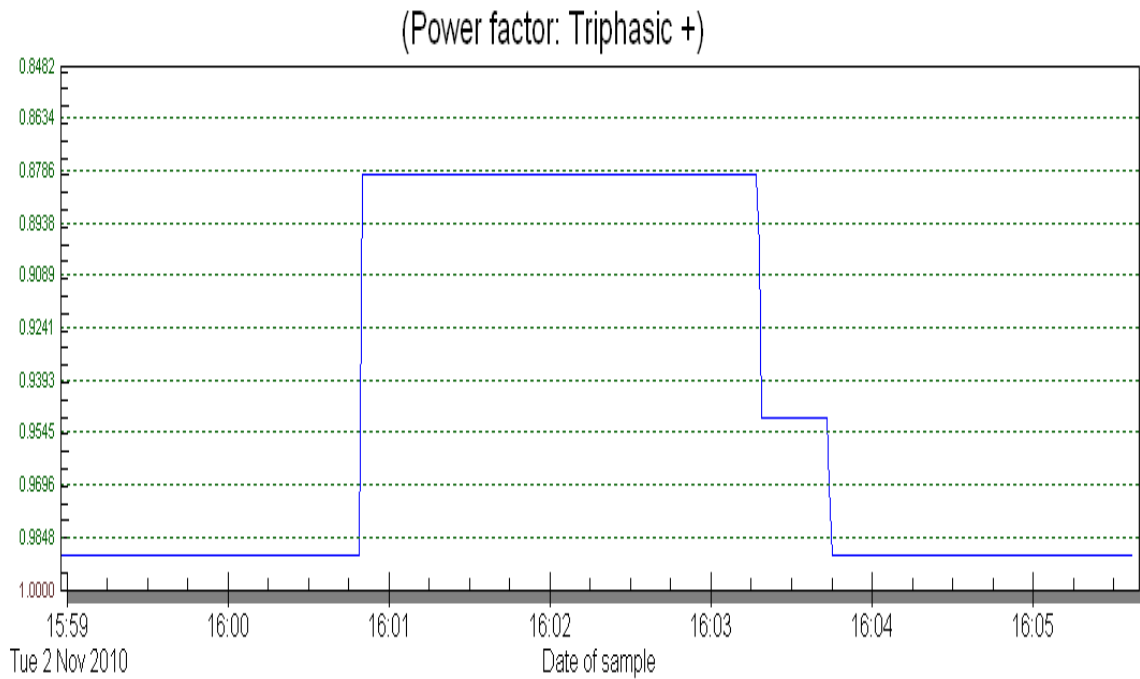
Şekil C.6. Aktif güç grafiği

MULTIGRAPHIC



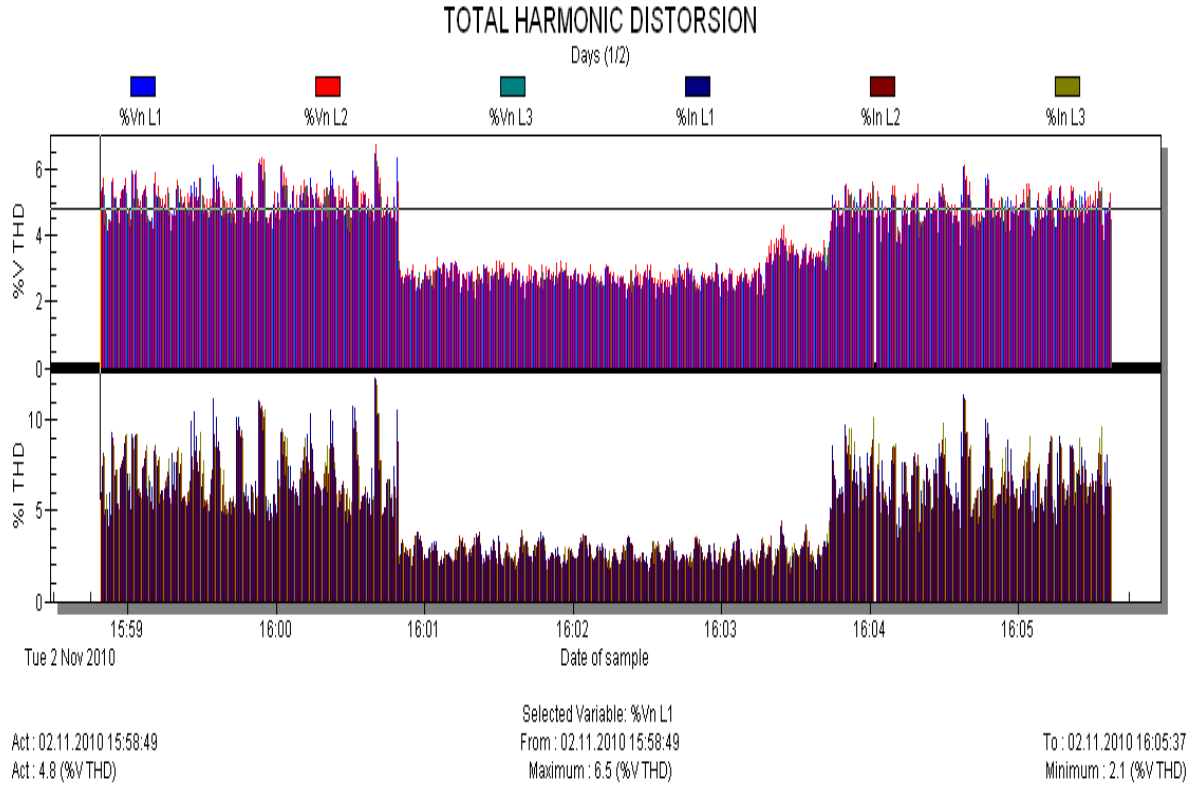
Selected Variable: (Energy: Energy III +)
 Act: 02.11.2010 15:58:49 From: 02.11.2010 15:58:49 To: 02.11.2010 15:59:59
 Act: 122389.123 (kWh) Maximum: 122457.267 (kWh) Minimum: 122389.123 (kWh)

Şekil C.7. Aktif enerji, reaktif enerji ve frekans grafiği

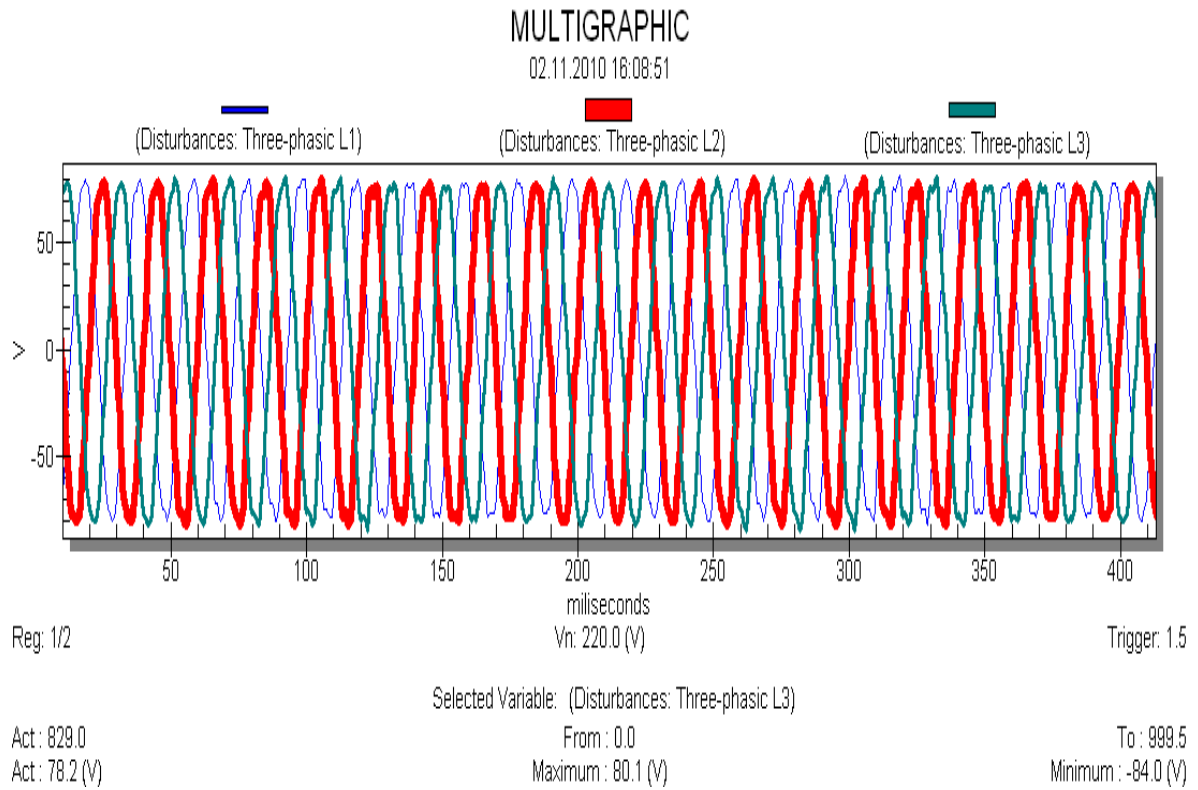


Act: 02.11.2010 15:58:49 From: 02.11.2010 15:58:49 To: 03.11.2010 09:11:55
 Act: 0.99 Maximum: 0.00 Minimum: 0.99

Şekil C.8. Güç faktörü grafiği

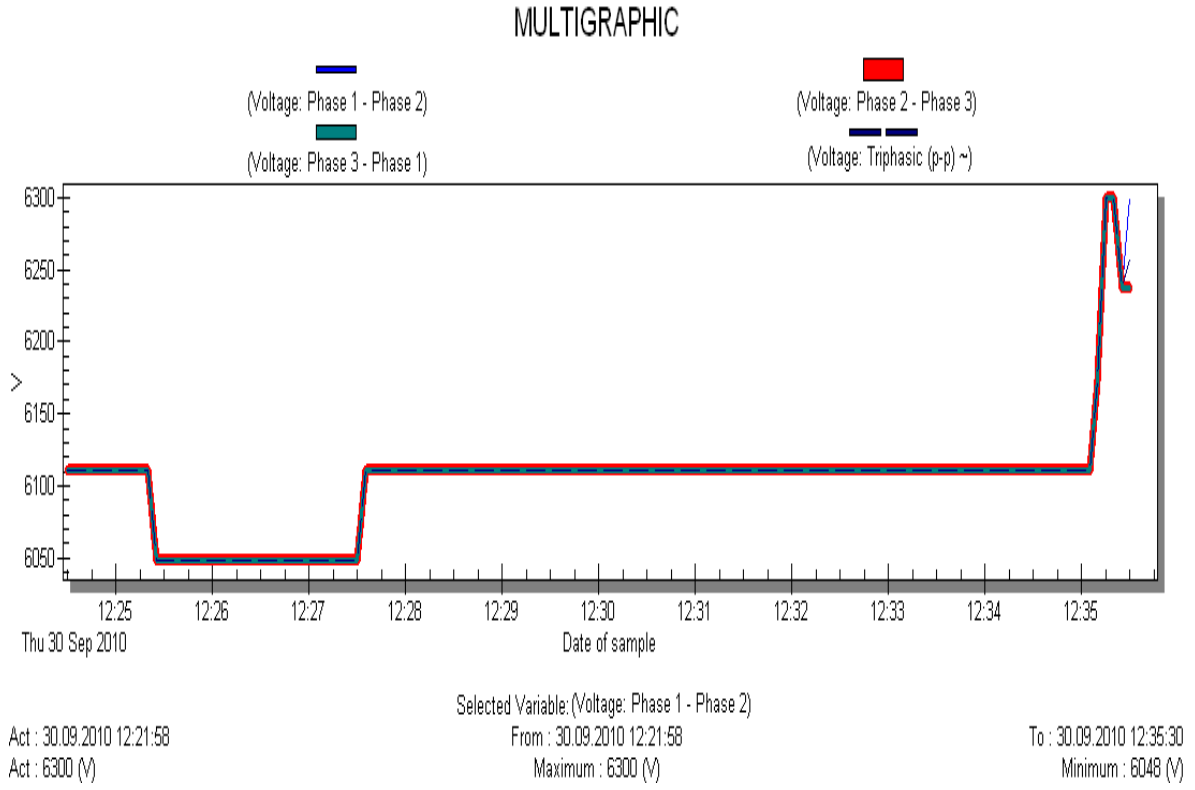


Şekil C.9. Akım ve gerilim toplam harmonik distorsiyon (THD) grafiği

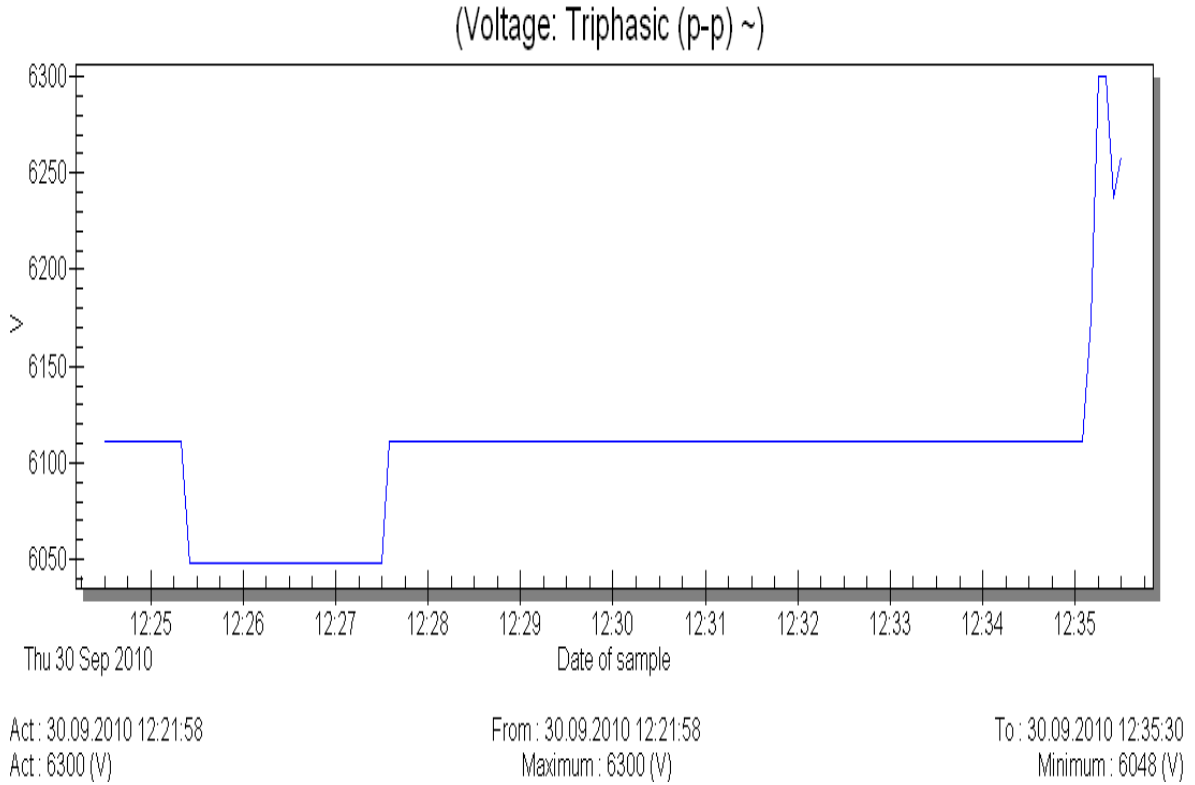


Şekil C.10. Gerilim disturbances grafiği

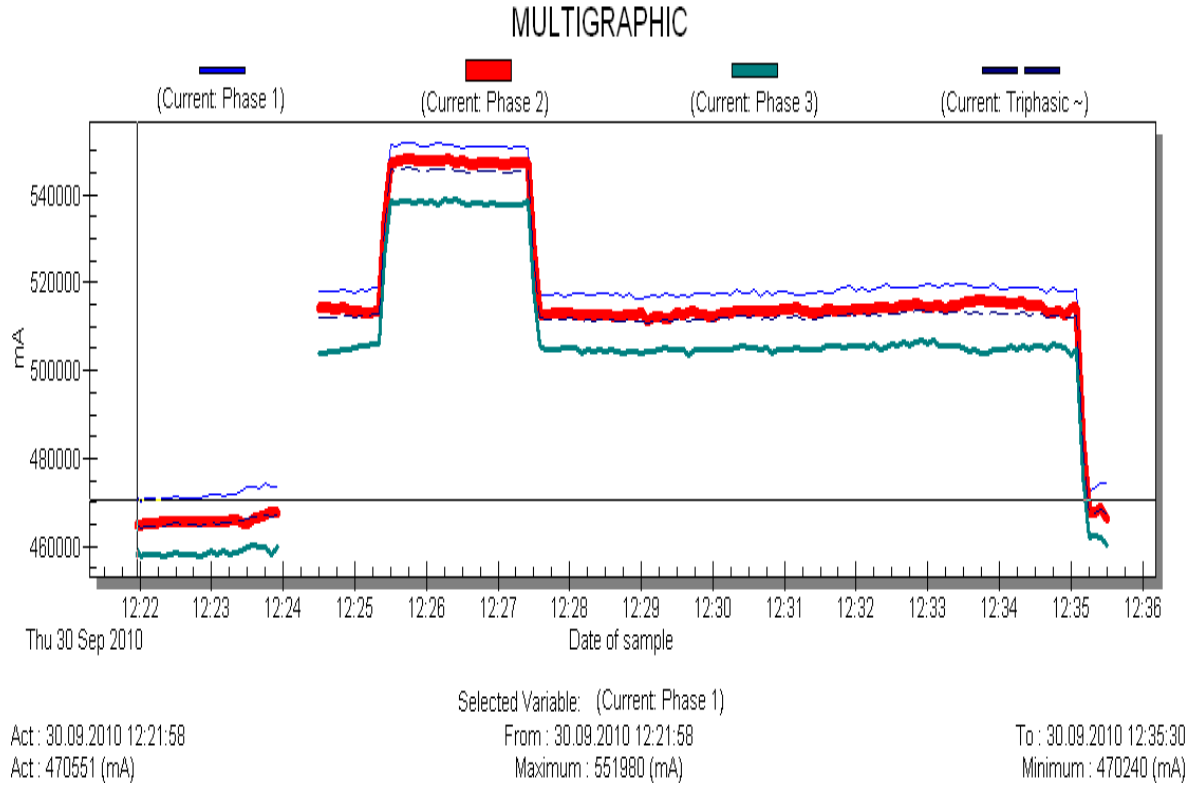
Ek-D: 2. Tesiste yapılan ölçümlere ait grafikler



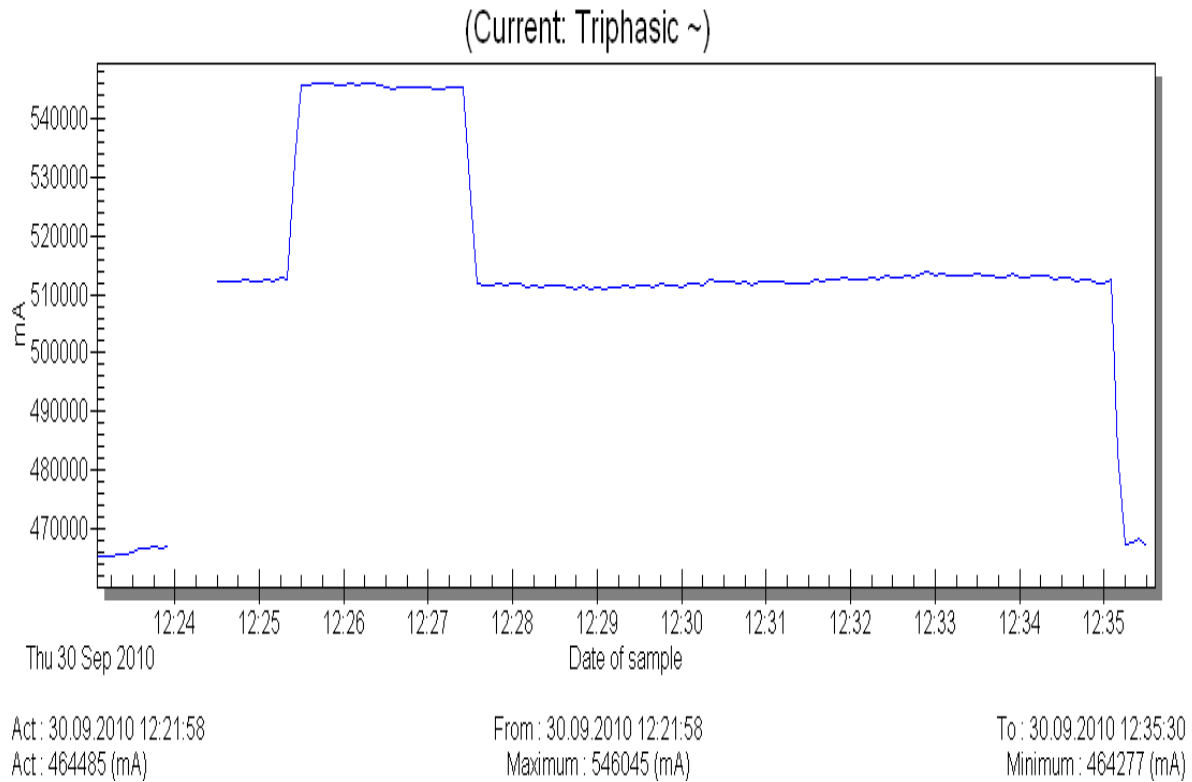
Şekil D.1. Fazlar arası ve 3 faza ait toplam gerilim grafiği



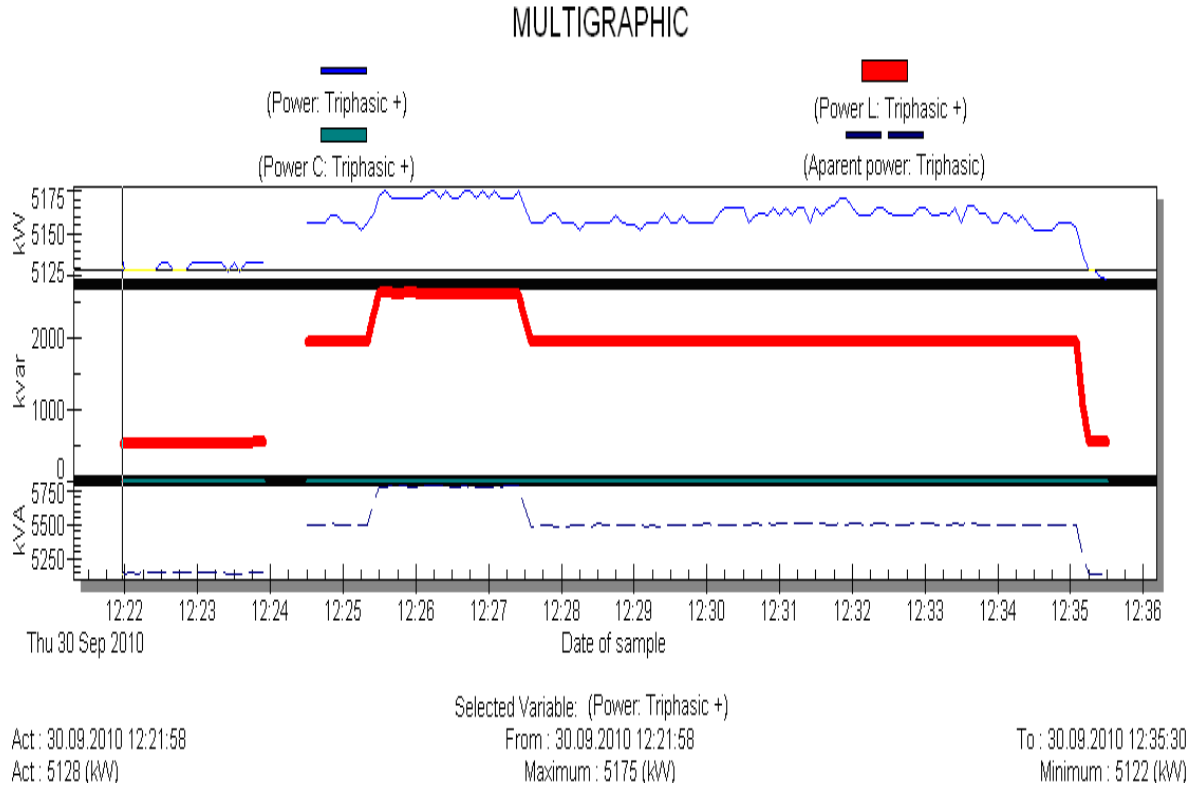
Şekil D.2. Fazlar arası gerilim grafiği



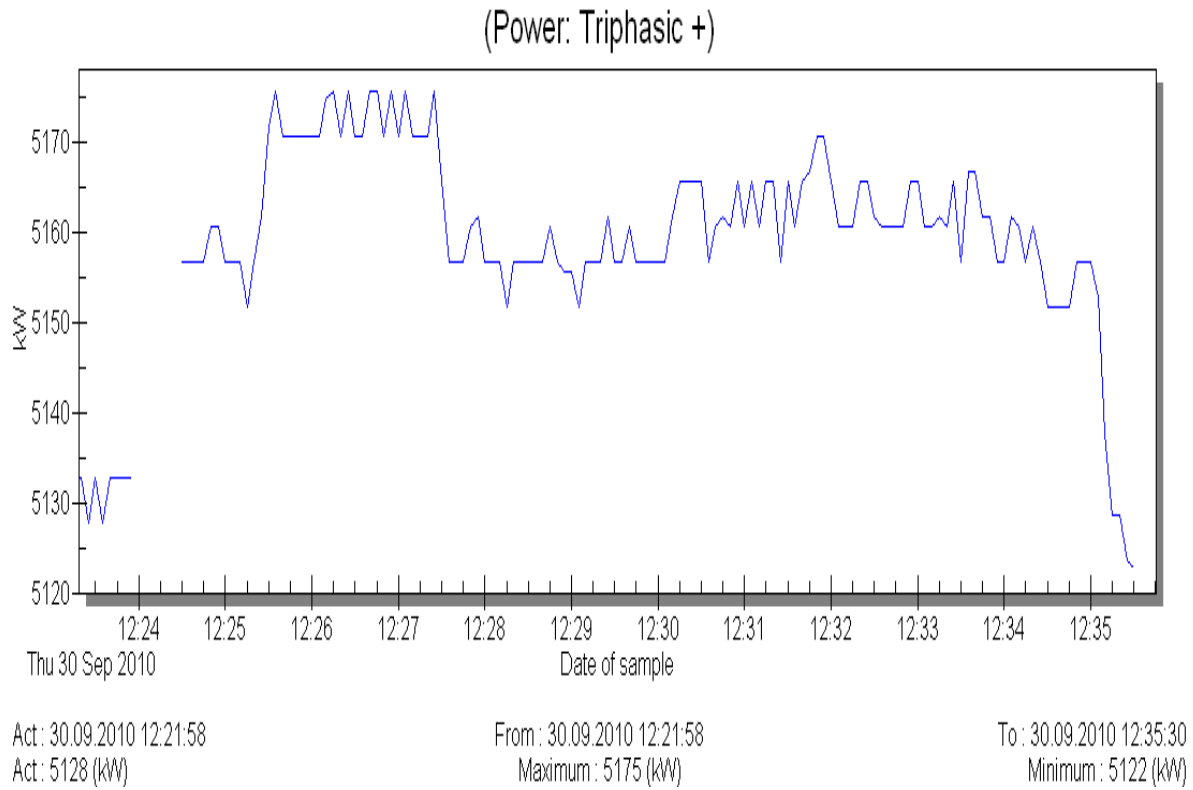
Şekil D.3. Her faza ve toplam akıma ait grafik



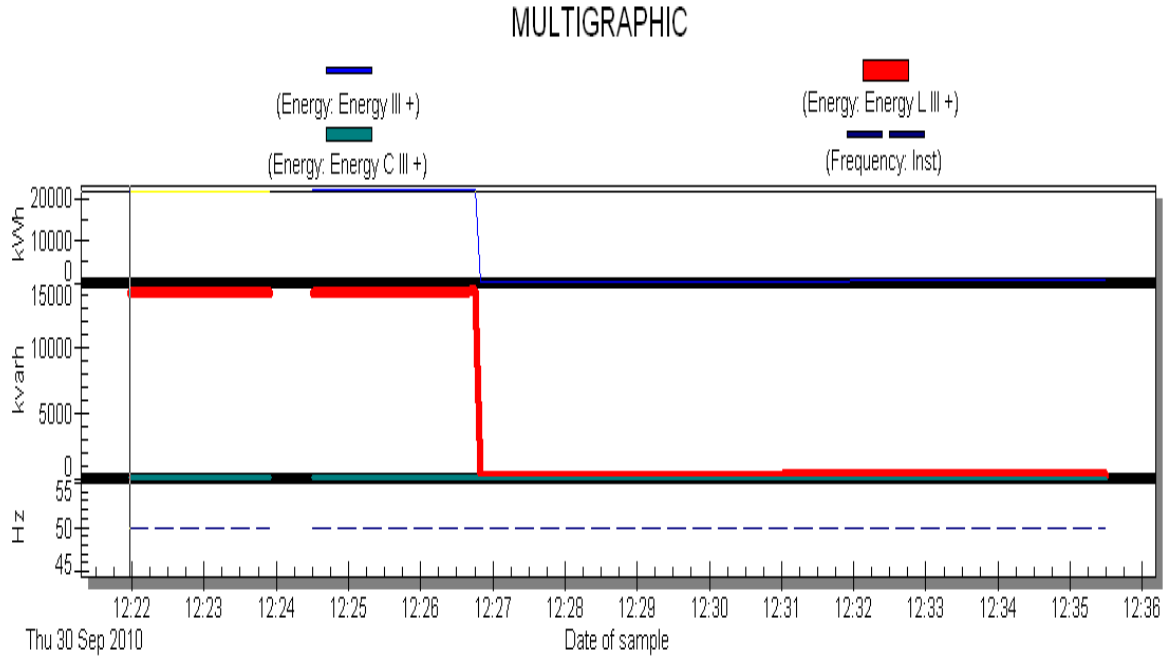
Şekil D.4. 3 faz toplam akım grafiği



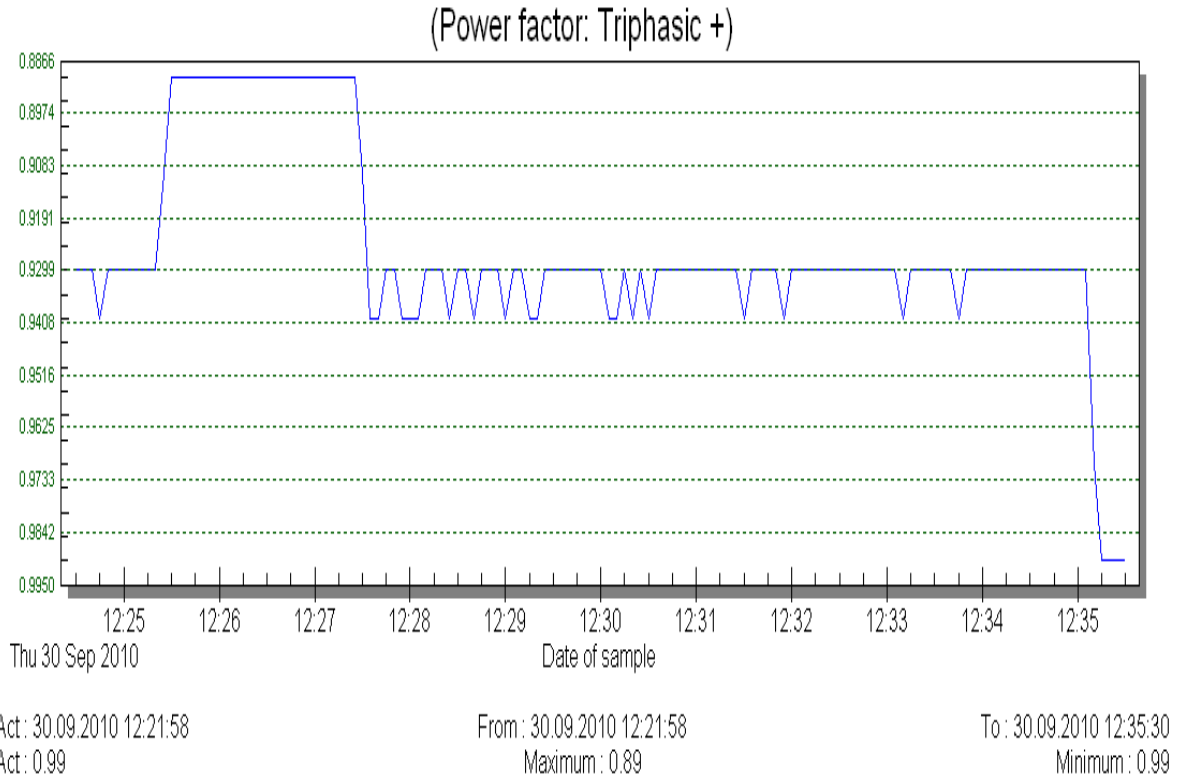
Şekil D.5. Aktif güç, reaktif güç ve görünür güç grafiği



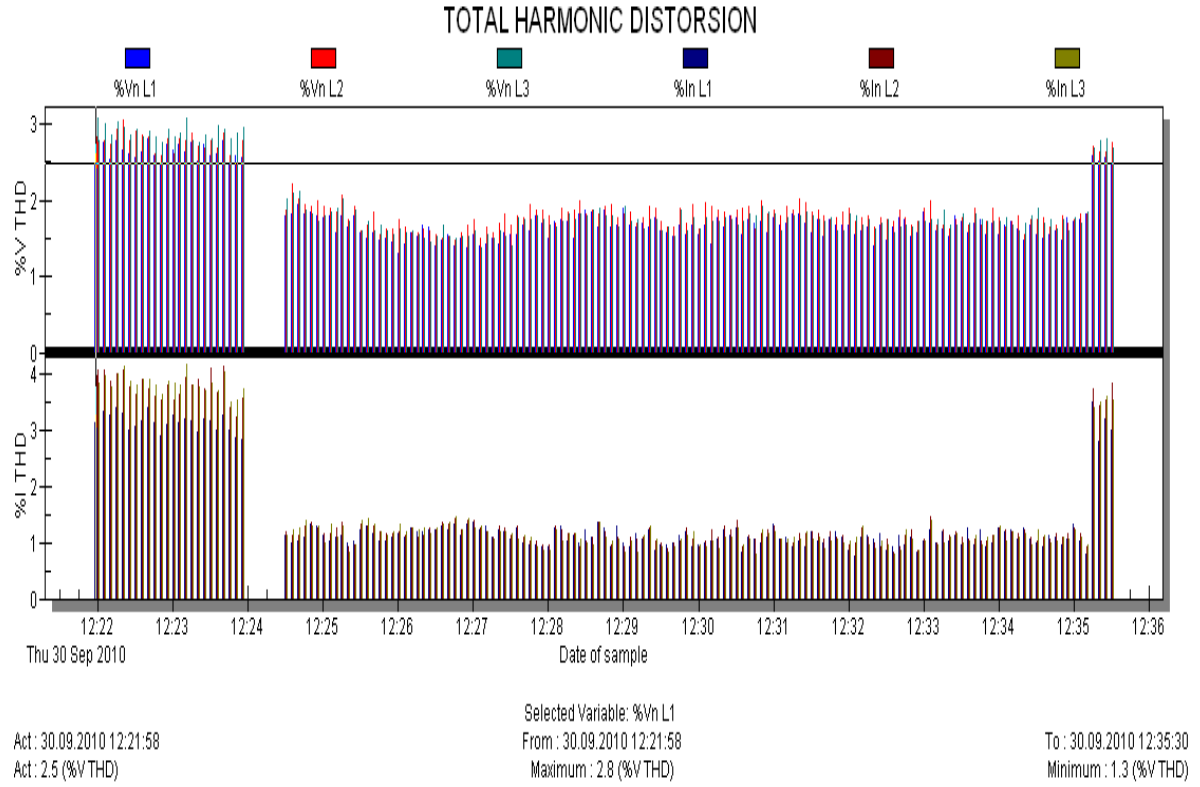
Şekil D.6. Aktif güç grafiği



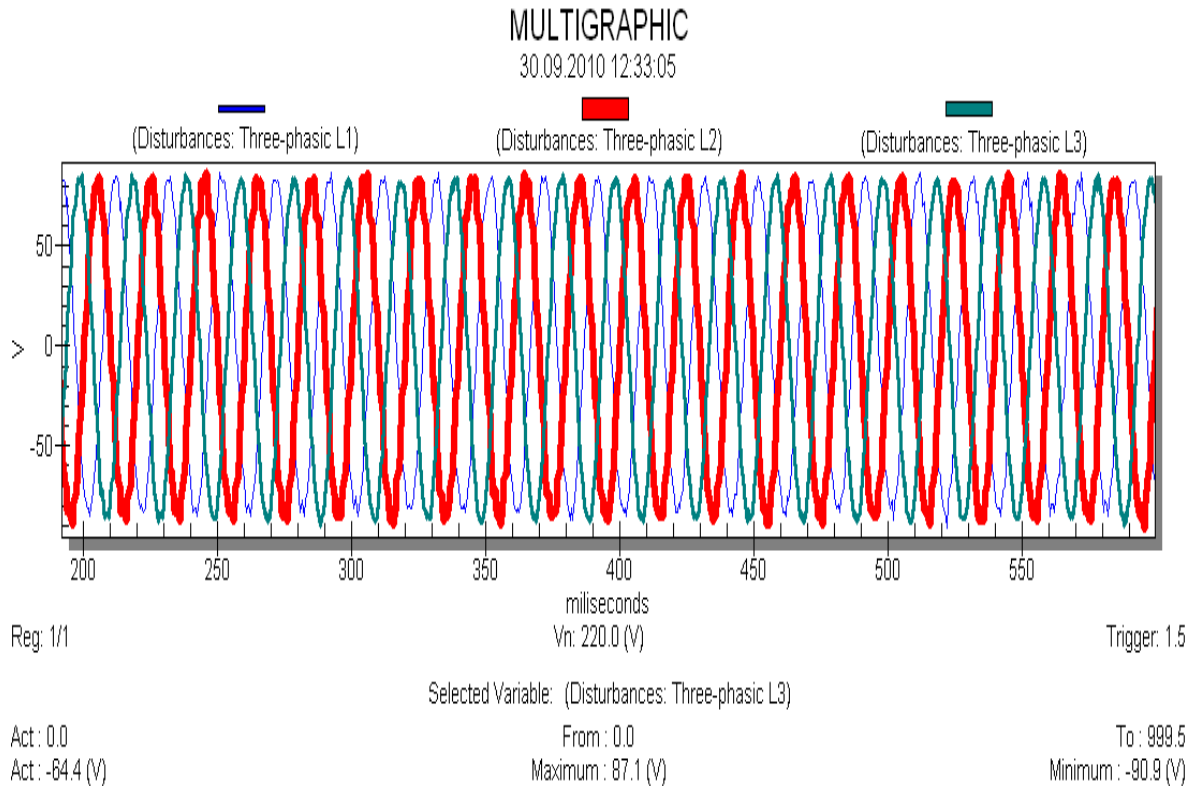
Şekil D.7. Aktif enerji, reaktif enerji ve frekans grafiği



Şekil D.8. Güç faktörü grafiği



Şekil D.9. Akım ve gerilim toplam harmonik distorsiyon (THD) grafiği



Şekil D.10. Gerilim disturbances grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, soyadı : Muhammet Erkan MÜFTÜOĞULLARI
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 1979 Hassa
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (342) 3289400
e-posta : erkan2088@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	KSÜ/ Elektrik-Elektronik Müh. A. B. D.	2011
Lisans	KSÜ/ Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü	2004
Lise	Cumhuriyet Lisesi	1996

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005- 2006	Şanlıurfa HES	Elektrik-Elektronik Müh.
2006- ...	Gaziantep Büyükşehir Belediyesi	Elektrik-Elektronik Müh.

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Doğa bilimleri, Basketbol, Sinema