

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HARMONİK İÇEREN VE DENGESİZ
ŞEBEKELERDE ÖLÇME VE KOMPANZASYON**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk.-Elektronik Müh. Özlem DEMİRKOL

**Enstitü Anabilim Dalı : ELK.-ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Mehmet BAYRAK**

Eylül 2006

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HARMONİK İÇEREN VE DENGESİZ
ŞEBEKELERDE ÖLÇME VE KOMPANZASYON**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk.-Elektronik Müh. Özlem DEMİRKOL

**Enstitü Anabilim Dalı : ELK.-ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK**

Bu tez 12/09/2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Yrd.Doç.Dr.Mehmet
BAYRAK
Jüri Başkanı**

**Prof.Dr.M.Ali YALÇIN
Üye**

**Doç.Dr.Nejat
YUMUŞAK
Üye**

TEŐEKKÖR

Tezin hazırlanması aŐamasında bana her tÖrlÖ desteği veren danıŐman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAYRAK'a, sayın Bahadır YALÇIN'a her zaman yanımda olup moralimi hep yÖksek tutmamı sağlayan sevgili Serkan OCAK'a ve bana hem maddi hem manevi destek veren anneme ve babama teŐekkÖr ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU.....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Reaktif Güç.....	4
2.3. Yük Kompanzasyonu.....	4
2.4. Yük Kompanzasyonunun Amacı.....	5
2.5. Reaktif Güç Kompanzasyonunda Bazı Hesaplamalar.....	7
2.6. Reaktif Güce Neden Olan Kaynaklar.....	8
2.6.1. Bazı ana tüketicilerin güç faktörleri.....	9
2.7. Reaktif Güç Tarifesi.....	10
2.8. Harmonik Kaynaklı Reaktif Güç Bedeli.....	11
2.9. Reaktif Güç Kompanzasyonunun Faydaları.....	12
2.9.1. Sistem kapasitesi.....	12
2.9.2. Isı kayıpları.....	14
2.9.3. Gerilim düşümü.....	14

2.9.4. Tüketici açısından faydası.....	16
2.9.5. Reaktif güç ihtiyacının saptanması.....	16
2.9.5.1. P_1 gücünün sabit olması hali.....	16
2.9.5.2. S_1 gücünün sabit olması hali.....	17
2.10.Yeni Bir Tesisin Projelendirilmesinde Dikkat Edilmesi	18
Gereken Hususlar.....	
2.10.1. Lokal kompanzasyon.....	18
2.10.2. Grup kompanzasyon.....	19
2.10.3. Merkezi kompanzasyon.....	19
2.10.3.1. Reaktif rölenin seçimi.....	20
BÖLÜM 3.	
ENERJİ KALİTESİ VE HARMONİKLER	21
3.1. Giriş.....	21
3.2. Enerji Kalitesi.....	22
3.3. Harmonik Tanımı.....	22
3.4. Harmonik Seviyeleri.....	23
3.5. Harmonik Üreten Elemanlar.....	24
3.5.1. Generatörler.....	25
3.5.2. Transformatörler	26
3.5.3. Doğrultucular.....	28
3.5.4. Ark fırınları.....	29
3.5.5 Gaz deşarjı prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları.....	29
3.5.6 Diğer harmonik haynaklar	30
3.6. Harmoniklerin Matematiksel Analizi.....	31
3.6.1 Fourier analizi.....	31
3.6.2 Harmonikli sistemlere ait matematiksel tanımlamalar.....	32
3.6.2.1. Distorsiyon gücü (D).....	33
3.6.2.2. Toplam harmonik distorsiyonu gücü (THD).....	33
3.6.2.3. Tekil harmonik distorsiyonu (HD).....	34
3.6.2.4. Toplam talep distorsiyonu (TDD).....	35
3.7. Harmonik Standartları.....	35

3.8. Harmoniklerin Elektrik Güç Sistemlerine Etkileri.....	36
3.9. Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları.....	37
3.9.1. Paralel rezonans.....	38
3.9.1.1. Paralel rezonans frekansı.....	40
3.9.2. Seri rezonans.....	40
3.10. Harmonik Ölçüm Teknikleri.....	42
3.10.1. Ölçümlerin yorumlanması.....	42
3.11. Harmoniklerin Giderilmesi.....	43
3.11.1. Harmoniklerin filtrelenmesi.....	43
3.11.1.1. Pasif filtre.....	44
3.11.1.2. Aktif filtre.....	45
3.11.1.3. Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması.....	47

BÖLÜM 4.

DENGESİZ YÜKLERDE VE HIZLI DEĞİŞEN

YÜKLERDE GÜÇ KATSAYISI KOMPANZASYONU.....	48
4.1. Giriş.....	48
4.2. Dengesiz Yük İçeren Sistemlerde Güç Bağlılıkları.....	48
4.3. Ölçüm ve Analiz.....	51
4.3.1. Ölçülen reaktif gücün analizi.....	52
4.3.2. Dengesiz sistemde reaktif rölenin seçimi.....	52
4.3.3. Dengesiz sistemde kondansatör rölenin seçimi.....	53
4.4. Dengesiz ve Hızlı Değişen Yükler.....	54
4.4.1. Punto kaynağı.....	54
4.5. Dengesiz Hızlı Değişen Yükte Dengeli Yavaş Kompanzasyon.....	55
4.5.1. Çözüm önerileri.....	57

BÖLÜM 5.

ENDÜSTRİYEL BİR TESİSTEN ALINAN ÖLÇÜM VERİLERİNİN

İNCELENMESİ.....	58
5.1. Giriş.....	58

5.2. Güç Faktörü.....	58
5.3. Gerilim.....	59
5.4. Reaktif Enerji.....	59
5.5. Ölçüm Sonucu Alınan Hat Parametreleri	59
5.6. Ölçüm Sonucu Alınan Hat Parametreleri	59
5.6.1. Problemin açıklanması.....	60
5.6.2. Çözüm önerileri.....	60
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

f	: Frekans
DC	:Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
h	: Harmonik Derecesi
t	: Zaman
T	: Peryot
A ₀	: '0' indisi ile gösterilen sabit terim
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyonu
THD _v	: Gerilimin Toplam Harmonik Distorsiyonu
THD _I	: Akımın Toplam Harmonik Distorsiyonu
TDD	: Toplam Talep Distorsiyonu
HD _v	: Gerilimin Tekil Harmonik Distorsiyonu
HD _I	: Akımın Tekil Harmonik Distorsiyonu
n	: Harmonik Mertebesi
D	: Distorsiyon Gücü
C	: Kompanzasyon Sisteminin Kapasitansı
P	: Aktif Güç
S	: Görünür Güç
Q	: Reaktif Güç
U	: Şebeke Gerilimi
U _c	: Kapasitans Gerilimi
U _{RT}	: Toplam Omik Direnç Üzerine Düşen Gerilim (V)
U _{XLT}	: Toplam Endüktif Reaktans Üzerine Düşen Gerilim (V)
U _{XC}	: Toplam Kapasitif Reaktans Üzerine Düşen Gerilim (V)

Z	: Sistemin Toplam Empedansı
K	: K Faktörü
Y	: Admitans Genliđi
PF	: Güç Faktörü
P_z	: Aktif Kayıplar
Q_z	: Reaktif Kayıplar
φ	: Gerilimin Faz Açısı
ω	: Açısal Frekans
V	: Gerilim Fazörü
I	: Akım Fazörü
S	: Görünür Güç Fazörü
Y	: Admitans Fazörü
Z	: Empedans Fazörü
Tan φ_1	: Sistemin Kompanzasyon Yapılmadan Önceki Güç Açısının Tanjantı
Tan φ_2	: Sistemde Kompanzasyon Yapıldıktan Sonraki Elde Edilmek İstenen Güç Açısının Tanjantı
Q	: Sistemin İstenilen Güç Faktörü Değerine Ulaşabilmesi İçin Sisteme Bağlanması Gereken Kondansatörün Gücü

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Bazı ana tüketicilerin güç faktörleri.....	10
Tablo 3.1. Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu.....	26
Tablo 3.2. Magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu.....	30
Tablo 3.3. Dağıtım sistemleri için akım distorsiyonu limitleri.....	36
Tablo 3.4. IEEE 519'a göre maksimum gerilim distorsiyon oranları.....	36
Tablo 3.5. Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması.....	47
Tablo 5.1. Hat parametreleri.....	59

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Reaktif güç sisteminde çekilen akım ve şebeke gerilimi.....	5
Şekil 2.2. Kompanzasyonlu sistemin düzelttiği gerilim ve akım şekilleri.....	5
Şekil 2.3. Aktif güç, reaktif güç fazör diyagramı.....	7
Şekil 2.4. Hattın sonunda beslenen bir tüketici.....	12
Şekil 2.5. Bir gerilim hattının fazör diyagramının şematik çizimi.....	15
Şekil 2.6. Taşınan görünür gücün azaltılması.....	16
Şekil 3.1. Paralel rezonans durumu.....	39
Şekil 3.2. Seri rezonans devresi.....	41
Şekil 3.3. Aktif harmonik filtrenin çalışma prensibi.....	45
Şekil 4.1. Dengesiz yük örneği.....	55

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Enerji Kalitesi, Reaktif Güç Kompanzasyonu, Enerji Sistemlerinde Harmonikler, Dengeiz Yük İçeren Sistemlerde Kompanzasyon

Reaktif güç kompanzasyonu elektriksel yükler için yapılan bir sistemdir. Genel olarak, bu sistem enerjinin kalesini arttırmak ve bakanlıkça zorunlu kılınan güç faktörü değerini yakalamak için kullanılır.

Reaktif güç kompanzasyonu voltaj ile akım arasındaki faz farkını ortadan kaldırmayı amaçlar. Bunun için kondansatörler yüklerin bulunduğu baralara bağlanırlar. Bu bağlantı yüklerle paralel yapılır. Ancak dengesiz yüklerin bulunduğu sistemlerde sadece kondansatörleri bağlamak ve kondansatörleri kontaktörlerle kontrol etmek doğru değildir. Böyle sistemlerde her faz için reaktif güç ihtiyacı farklıdır. Reaktif güç ihtiyacını karşılamak için her faz teker teker ölçülmeli ve kompanze edilmelidir. Hızlı değişen yük içeren sistemlerde, statik hızlı ve filtreli kompanzasyonlar gerekir. Bu kompanzasyon da kontaktörler ve basit reaktif güç röleleri yerine, tristörler, filtreler ve yüksek hızlı kompanzasyon röleleri kullanılır.

Bu tez çalışmasında reaktif güç kompanzasyonunun tanımı, güç sistemlerindeki harmonik problemleri, çözümleri, dengesiz yüklerde ve hızlı değişen simetrik olmayan yüklerde kompanzasyon konularını ele alınmıştır.

MEASUREMENT AND COMPANSATION IN UNBALANCED POWER SYSTEM CONTAINING HARMONICS

SUMMARY

Key Words: Energy Quality, Reactive Power Compansation, Harmonics in Energy Systems, Reactive Power Compensation in Unbalanced Systems.

Reactive power compensation is a system which is applied to electrical loads. In general, this system is used to increase energy quality and to provide the value of power factor ministry oblige

Reactive power compensation is applied to abate phase difference between voltage and current. Thus, capacitors are connected to network loads are connected. In this connection, capacitors are parallel to loads. However, in systems where loads are unsymmetrical, the reactive power necessity is different for each phase, in order to correspond reactive power necessity, every has to measure and compansate. In systems where loads are changed rapidly and they are unsymmetrical connecting only capacitors and controlling capacitors with contactors are not correct. For this systems static high speed and filter compensation is necessary. In this compensation, thyristors, filters, and high speed compensation relay are used instead of contactors and simple reactive power relay.

In this thesis, I will take on definition of reactive power compensation, harmonics problems and solutions in power systems and compensation which is design in rapidly changing unsymmetrical loads.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde elektrik enerjisini verimli kullanmak, üretim maliyetlerini düşürmek ve enerji tüketimini azaltarak çevreyi korumak açısından büyük önem kazanmıştır.

Elektrik şebekesine bağlanan cihazların hemen hemen tamamı endüksiyon prensibine göre çalıştığı için magnetik alanının meydana getirilmesi için mıknatıslama akımı çekerler, mıknatıslama akımı ise reaktif akımdır. Bu nedenle aktif gücün yanında reaktif güce de ihtiyaç vardır. Şebekeden çekilen ve hemen ardından şebekeye tekrar geri verilen reaktif güç şebekeyi gereksiz yere yükler ve şebekenin işletme maliyetlerini yükseltir. Bu nedenle her işletme şebekeden çektiği reaktif gücü kontrol etmeli, bir başka deyişle güç faktörünü belli sınırlar içinde tutmalıdır. Reaktif güç kompanzasyonu teknik ve ekonomik bir zorunluluktur.

Güç elektroniğinin gelişmesi ile motor sürücüler, frekans dönüştürücüler ve doğrultucular gibi güç elektroniği devreleri içeren cihazlar ile birçok endüstriyel uygulamalarda karşılaşmak mümkündür. Elektrik enerjisini oldukça verimli kullanan bu cihazlar şebekeden doğrusal olmayan (non-lineer) akım çekerler. Lineer olmayan yük, akımı ile gerilimi arasında bir ilişki olmayan yük demektir. Yük kaynağı olan gerilim ve akım eğrileri sinüsoidal değildir. Fourier analizine göre, sinüsoidal olmayan bu terimler harmonik olarak adlandırılırlar. İdeal bir alternatif akım şebekesi için şebekenin her noktasında akım ve gerilimin, frekans sabit ve harmoniksiz olmalıdır. Ayrıca güç katsayısı da bir veya bire yakın olmalıdır. 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. Akımdaki dalgalanma ve sinüzoidal dalga şeklinden uzaklaşma, gerilimi de etkilemekte ve enerji kalitesi bozulmaktadır.

Kompanzasyon hesaplamaları yapılırken dikkat edilmesi gereken diğer bir konu da dengesiz yüklenmedir. Genellikle faz, gerilim ve akım değerlerinin simetrik olduğu düşünülür. Fakat enerji sistemlerinin her zaman dengeli yüklendiği farz edilemez. Örnek olarak; ark ocakları, reaktif üniteler, tek fazlı demiryolu tesisleri vb. şebekede düzensiz akımlara sebep olabilir. Yükler dengesiz, yani fazlar arasında simetri yoksa, ve bir de yükler hızlı değişiyor ise, güç katsayısı kompanzasyonu klasik yöntemlerle yapılmamalıdır. Birinci adım olarak, her faza kompanzasyon uygulamak gerekir. Yapılan ölçme sonucunda akımların simetrik olmadığı görülüyorsa veya akımlar hızlı değişiyorsa, faz akımlarını ayrı ayrı dikkate almak ve her faza ayrı ayrı kompanzasyon uygulamak gerekir. Eğer sadece konvansiyonel metotlarla enerji kalitesi ya da güç katsayısı düzeltilmek istenirse, en başta istenmeyen enerji kayıpları meydana gelir. sadece güç katsayısını düzeltmek enerji kalitesini yükseltmek için yeterli değildir. İhtiyaç duyulan enerji kalitesini sağlamak için yukarıda bahsedilen bütün faktörler göz önüne alınarak çalışma yapılmalıdır.

BÖLÜM 2. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

2.1. Giriş

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.

Elektrik enerjisi genellikle alternatif akım olarak üretilir ve dağıtılır. Tüketicilerin şebekeden çektikleri alternatif akım, aktif ve reaktif akım olarak iki bileşenden oluşur. Aktif akımın meydana getirdiği aktif güç tüketici tarafından faydalı hale getirilir. Örneğin; motorlarda mekanik enerjiye, ısıtıcılarda termik enerjiye, aydınlatma cihazlarında ışık enerjisine dönüşür. Reaktif güç ise faydalı güce çevrilemez ise de bundan da vazgeçilemez. Çünkü makinalarının normal çalışmaları için reaktif akım gereklidir. Bilindiği gibi endüksiyon prensibine göre çalışan bütün elektrik makinaları magnetik alanının meydana getirilmesi için mıknatıslama akımı çekerler, mıknatıslama akımı ise reaktif akımdır. Bu nedenle aktif gücü yanında reaktif güce ihtiyaç vardır.

Günümüzde reaktif güç kompanzasyonu teknik ve ekonomik bir zorunluluktur. İdeal bir alternatif akım şebekesi için şebekenin her noktasında akım ve gerilimin, frekans sabit ve harmoniksiz olmalıdır. Ayrıca güç katsayısı da bir veya bire yakın olmalıdır. Bu kaliteyi sağlamak için alternatif akım şebekesinde reaktif güç kompanzasyonu yapmak gerekir. Kompanzasyon üreticilere ve tüketicilere getirdiği büyük avantajların yanında kompanzasyon sistemleri uygulandıkları işletmelerde bazı

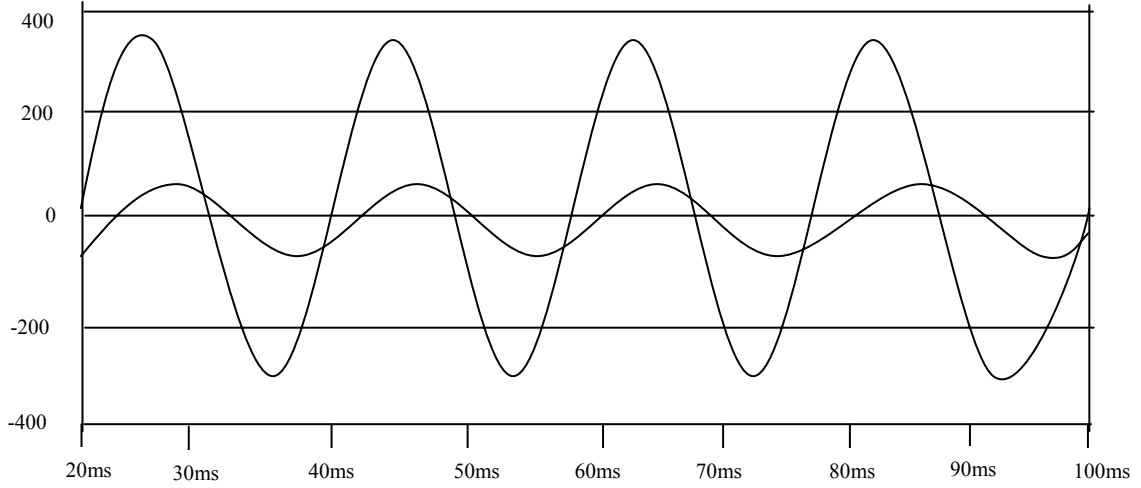
teknik problemlerin doğmasına neden olmaktadır. Özellikle büyük güçlü tristör kontrollü doğrultucular, ark fırınları kaynak generatörleri gibi harmonik üreten cihazların bulunduğu işletmelerde kompanzasyon tesisi kurmadan önce gerekli incelemelerin yapılması ve bir takım önlemlerin alınması gerekir. Aksi halde sistemde rezonans olayları baş gösterebilir.

2.2. Reaktif Güç

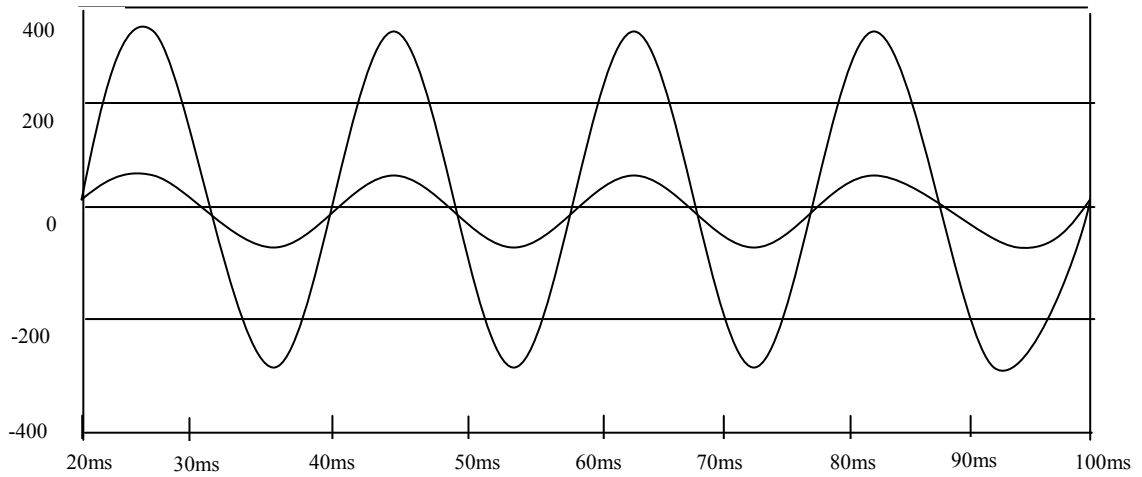
Alternatif akım tüketicileri şebekeden alternatif akım çekerler. Bu akım aktif (etkin) akım ve reaktif akım olmak üzere iki bileşenden oluşur. Aktif akımın meydana getirdiği aktif güç motorlarda mekanik güce, ısıtıcı cihazlarında ısı enerjisine ve termik güce, aydınlatma cihazlarında ışık enerjisine dönüşür. Reaktif akımın meydana getirdiği reaktif güç ise faydalı güce çevrilemez. Fakat endüksiyon prensibe göre çalışan generatör, transformator, 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 akımın meydana getirmesi için bir mıknatıslanma akımı çekerler, bu mıknatıslanma akımı reaktif akımdır [1].

2.3. Yük Kompanzasyonu

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 gözükten güç katsayısı ($\cos\phi$) düzeltilecek, başka bir deyişle güç katsayısı ile yaklaştırılacaktır [2].



Şekil 2.1. Reaktif güç sisteminde çekilen akım ve şebeke gerilimi



Şekil 2.2. Kompanzasyonlu sistemin düzelttiği gerilim ve akım şekilleri

2.4. Yük Kompanzasyonunun Amacı

Yük kompanzasyonunun üç ana amacı vardır:

1. Güç katsayısını düzeltmek.
2. Gerilim düşümü ve güç kaybını azaltılmak.
3. Boş yere hattın yüklenmesini önlenmek.

Güç katsayısının düzeltilmesi, yüke gerekli olan reaktif gücün hemen yükün yanında güç kompanzasyon sistemi yardımı ile üretilmesi olarak tanımlanabilir.

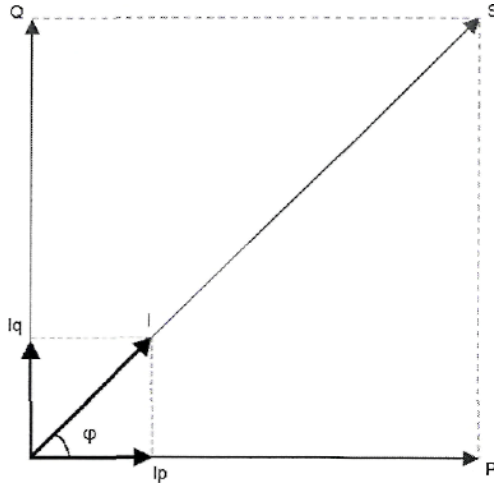
Reaktif gücün var olması, enerji iletim hatlarının, transformatörlerin ve generatörlerin gerçek faydalı güce karşı düşen akımdan daha büyük akım taşımalarına yol açar. Bu da sistemin aşırı yüklenmesine neden olur. Bu nedenle güç katsayısının 0.95 civarında olması istenir [2].

Gerilim düşümü ve güç kaybı azaltılmasında eğer bir alternatif akım şebekesi sonsuz güçte olursa iç empedansı sıfıra yakın bir değer alır. Bu nedenlerle gerilim değişmelerini 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. Gerilim değeri değişmesinin %5'den az olması istenir.

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 $J=I$ kayıpları da en aza indirilmelidir.

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.

2.5. Reaktif Güç Kompanzasyonunda Bazı Hesaplamalar



Şekil 2.3. Aktif güç, reaktif güç fazör diyagramı

Bir tüketicinin şebekeden çektiği görünür güç:

$$S = \sqrt{3} U \cdot I \quad (2.1)$$

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

$$\text{Aktif akım} \quad I_p = I \cdot \cos\varphi \quad (2.2)$$

$$\text{Aktif güç} \quad P = S \cdot \cos\varphi \quad (2.3)$$

$$\text{Reaktif akım} \quad I_q = I \cdot \sin\varphi \quad (2.4)$$

$$\text{Reaktif güç} \quad Q = S \cdot \sin\varphi \quad (2.5)$$

Böylece;

$$\text{Hat akımı} \quad I_h = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (2.6)$$

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

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 sifira eşit olacak ve tüketilen enerjinin tamamı aktif bileşenli olacaktır.

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 sifira yaklaşması ise güç katsayısının $\cos\varphi = 1$ 'e yaklaşması anlamına gelmektedir [1, 2].

Güç faktörü, tesis, kullanılan cihaz ve makinelere 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 aşağıda verilmiştir.

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tan\varphi)^2}} \quad (2.8)$$

2.6. Reaktif Güce Neden Olan Kaynaklar

Elektrik tesislerinde kullanılan ve magnetik veya statik alan ile çalışan bütün elektrikli araçlar şebekeden aktif güç akımı çekerken, reaktif güce neden oldukları

için reaktif güç akımı da çekerler ve bu reaktif gücü 1/4 periyotta magnetik alanında depo edip 1/4 periyot sonunda tekrar şebekeye iade ederler [1,2].

Bunlardan önemli olanların bazıları şunlardır:

- Düşük ve yüksek uyarmalı senkron makineler
- Transformatörler
- Bobinler
- Doğrultmaçlar
- Endüksiyon fırınları, ark fırınları
- Kaynak makineleri
- Floresant lambalar
- Sodyum ve civa buharlı lamba balastları
- Neon lamba transformatörleri.
- Kondansatörler
- Reaktörler
- Boşta çalışan havai hatları
- Yeraltı kabloları

Yukarıda belirtilen kaynakların neden oldukları reaktif gücün bazıları endüktif karakterde olup gerilim reel ekseninde var sayıldığında gerilime göre 90° geri fazda bazıları da kapasitif karakterde olup gerilime göre 90° ileri fazdadır [2].

2.6.1. Bazı ana tüketicilerin güç faktörleri

Reaktif enerji tüketimi özellikle ;

1. Düşük yüklü motorlar,
2. Kaynak makineleri,
3. Ark ve İndüksiyon ocakları.

Güç eviricileri, tarafından gerçekleştirilir.

Tablo 2.1. Bazı ana tüketicilerin güç faktörleri

TÜKETİCİ		Cos φ	Tg φ
Genel	%0	0,17	5,80
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
Floresan 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 makinaları		0,8 – 0,9	0,75 – 0,48
Tek fazlı statik ark kaynak makinaları		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

2.7. Reaktif Güç Tarifesi

15.01.2004 tarih, 25247 sayılı resmi gazetede yayınlanan yeni reaktif güç tarifesine göre reaktif enerjinin aktif enerjiye oranının;

$$-0,20 < \frac{E_r}{E_a} < 0,33$$

değerleri arasında tutulması gerekir.

Reaktif enerji uygulaması 9 kW üzeri tüm işyerleri için geçerli olup;

1. Müsaade edilen sınır güç katsayısı 0,95'dir.

2. Aboneden çektiği Aktif enerjinin %33 katına kadar reaktif enerji bedeli alınmaz. Bu sınır aşılsa çekilen Reaktif enerjinin tamamına Reaktif enerji tarifesi uygulanır.
3. Abonenin sisteme vereceği reaktif enerji Aktif enerji miktarının %20'sinden fazla olmayacaktır. Bu sınır aşılsa çekilen Aktif enerjinin %90 katı kadar reaktif enerji tükettiği kabul edilir ve reaktif enerji tarifesi uygulanır.

EPDK (Enerji Piyasası Denetleme Kurumu), Kasım 2004 “Elektrik iletimi Arz Güvenirliliği ve Kalitesi Yönetmeliği” ne göre 01.01.2007 tarihinden itibaren ceza sınır değerleri endüktif reaktif güçte %33’ ten %25’ e, kapasitif reaktif güçte %25’ten %15’e indirileceğini ve 01.01.2009 tarihinden itibaren ceza sınır değerleri endüktif reaktif güçte %25’ten %14’e, kapasitif reaktif güçte %15’ en %10’a indirileceğini bildirmiştir [3].

2.8. Harmonik Kaynaklı Reaktif Güç Bedeli

Enerji dağıtım sistemlerinde temel şebeke frekansındaki akım ile gerilim arasındaki faz farkını işaret eden büyüklüğü “cos φ” denir ve bu değer bir endüstriyel hattın enerji aldığı üreticiye ödeyeceği reaktif güç bedelini belirler.

Döner telli konvansiyonel elektrik sayaçları ile faturalandırma yapan sistemlerde durum yukarıda bahsedildiği gibidir. Ancak son yıllarda kanunla da zorunlu olan dijital sayaçlara geçilmesi ile bu durum farklılık göstermiştir. Zira dijital sayaçlarda güç faktörü ile bilinen yukarıdaki değer hesaplanması için sadece temel şebeke frekansındaki akım ve gerilim arasındaki açığa bakılmaz, harmonik denilen diğer frekanslardaki akım ve gerilimin etkisi de göz önüne alınır.

Kısaca güç faktörü, cosφ değerinden farklı olarak, harmonikler dahil olan akım ile harmonikler dahil olan gerilim arasındaki faz farkıdır. Bu iki değer arasında harmonikli ortamlarda aşağıdaki formül kadar bir fark oluşur.

$$PF = \mu \cdot \cos \varphi \quad (2.9)$$

$$\mu = 1 / 1 + (THD(I))^2 \quad (2.10)$$

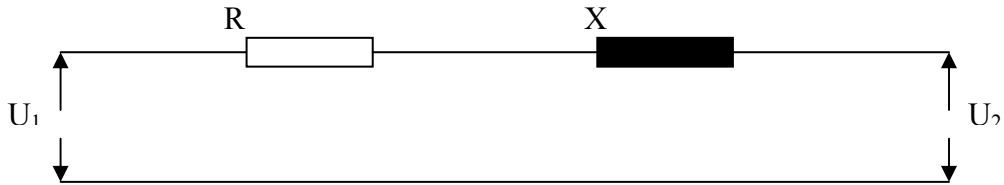
Bunun temel sonucu olarak döner telli bir sayaçtan dijital sayaca geçmesi ile aynı yük ve kondansatör sistemi ile daha önce ödemediği reaktif güç bedelini ceza olarak ödeyecektir [4].

2.9. Reaktif Güç Kompanzasyonunun Faydaları

2.9.1. 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 2.4'deki hat ile bu hattın sonunda beslenen tüketici örnek olarak ele alınmış olsun.



Şekil 2.4. Hattın sonunda beslenen bir tüketici

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

$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \varphi_1} \quad (2.11)$$

Kompanzasyondan sonra çekilen görünür güç;

$$S_2 = \frac{P_2}{\cos \varphi_2} \quad (2.12)$$

Buna göre ikisi arasındaki fark;

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (2.13)$$

Kompanzasyondan sonraki değere oranı;

$$\% \Delta S = \frac{\Delta S}{S_2} \cdot 100 = 100 \left(\frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} - 1 \right) \quad (2.14)$$

olarak elde edilir.

Kompanzasyonun yapılması ile tesisin yükü $\% \Delta S$ oranında azalır veya tesis aşırı zorlanmaksızın $\% \Delta S$ oranında yüklenebilir.

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

$$P_1 = S_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (2.15)$$

Kompanzasyondan sonra çekilen aktif güç,

$$P_2 = S_1 \cdot \cos \varphi_2 \quad (2.16)$$

Buna göre ikisi arasındaki fark

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (2.17)$$

Bu değerlerin kompanzasyondan önceki değere oranı

$$\% \Delta = \frac{\Delta P}{P_1} \cdot 100 = 100 \left(\frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} - 1 \right) \quad (2.18)$$

şeklindedir.

Kompanzasyonun yapılması ile görünür güç sabit kaldığı halde tesisin $\% \Delta P$ oranında artış gösterir [5].

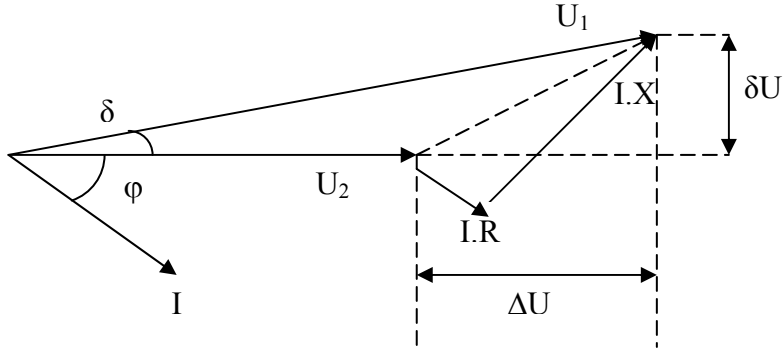
2.9.2. Isı kayıpları

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 $I^2.R$ ısı kayıpları puant ve minimum yük saatlerine, iletken kesitlerine ve uzunluklarına bağlı 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 [1].

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.

2.9.3. Gerilim düşümü

Güç sistemlerinde gerilim kontrolü ilk aşamada generatörler ve transformatörler kademeleri ile yapılmalıdır, eğer bunlar yetersiz ise güç katsayısı kompanzasyonuna gidilmelidir. Şekil 2.5’de bir enerji iletim hattında boyuna ve enine gerilim düşümleri gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Bir gerilim hattının fazör diyagramının şematik çizimi

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (2.19)$$

Boyuna gerilim düşümü;

$$\Delta U = R.I.\cos\varphi + X.I.\sin\varphi \quad (2.20)$$

Enine gerilim düşümü;

$$\delta U = X.I.\cos\varphi - R.I.\sin\varphi \quad (2.21)$$

Hattın ısı kayıp gücü;

$$P_k = I^2 \cdot R \quad (2.22)$$

Yüzde olarak bağlı gerilim düşümü;

$$\% \varepsilon = \% \frac{\Delta U}{U} = 100 \cdot \left(\frac{I.R.\cos\varphi}{U} + \frac{I.X.\sin\varphi}{U} \right) \quad (2.23)$$

şeklinde yazılır.

Bu eşitlikteki birinci terimde U yerine: $P/I.\cos\varphi$, ikinci terimde I yerine: $P/U.\cos\varphi$ konursa;

Bağıl gerilim düşümü;

$$\% \varepsilon = 100 \cdot \left(\frac{P \cdot \cos^2 \varphi}{P} + \frac{P \cdot X \cdot \operatorname{tg} \varphi}{U^2} \right) \quad (2.24)$$

olarak elde edilir.

2.9.4. Tüketici açısından faydası

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

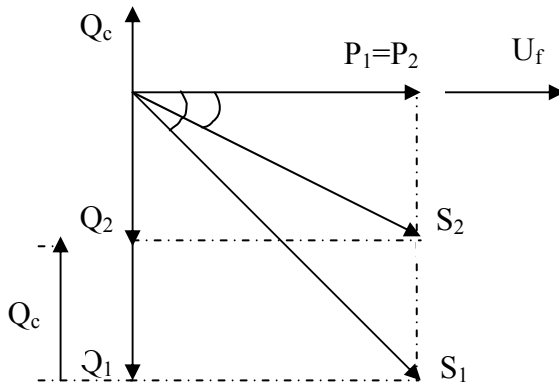
1. Gereksiz yatırım yapmamış olur.
2. Kayıplar azalır.
3. Gerilim düşümü azalır.
4. Reaktif enerji ücreti ödenmemiş olur.

2.9.5. 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 Cosφ₁ ile yeni güç katsayısı Cosφ₂ değerinin bilinmesi gereklidir. Reaktif gücü veya kondansatör gücünü hesaplamak için iki yol vardır.

2.9.5.1. P₁ gücünün sabit olması hali

Bu durumda şekil 2.6'da görüldüğü gibi sistemden çekilen görünür güç azalır.



Şekil 2.6 Taşınan görünür gücün azaltılması

Kompanzasyondan önceki reaktif güç;

$$Q_1 = P_1 \cdot \text{Tg}\varphi_1 \quad (2.25)$$

Kompanzasyondan sonraki reaktif güç;

$$Q_2 = P_1 \cdot \text{Tg}\varphi_2 \quad (2.26)$$

olduğuna göre gerekli kondansatör gücü;

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P_1(\text{Tg}\varphi_1 - \text{Tg}\varphi_2) \quad (2.27)$$

olarak bulunur.

2.9.5.2. S₁ gücünün sabit olması hali

Bu durumda sistemden çekilen aktif güç artırılır. Kompanzasyondan önceki reaktif güç;

$$Q_1 = S_1 \cdot \text{Sin}\varphi_1 \quad (2.28)$$

Kompanzasyondan sonraki reaktif güç;

$$Q_2 = S_1 \cdot \text{Sin}\varphi_2 \quad (2.29)$$

olmak üzere gerekli kondansatör gücü;

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = S_1 \cdot (\text{Sin}\varphi_1 - \text{Sin}\varphi_2) \quad (2.30)$$

olarak bulunur.

2.10. Yeni Bir 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 aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$Q_{pr} = \frac{S}{n^2 \cdot \%u_k \cdot \text{Sin} \varphi_k} \quad (2.31)$$

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

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

Bu tip bir tesiste kompanzasyon sistemi tasarlandıktan ve tesis devreye alındıktan sonra bu değer normal kuru tip kondansatörlerin aşın güç dayanım değeri olan %35'in üzerine çıkacağı unutulmamalıdır [1, 2].

Alçak Gerilim sistemlerinde, harmonik sorunu yoksa sistemin ihtiyacı olan reaktif gücü karşılamak için kurulacak kompanzasyon sistemi tasarlanırken, temel olarak 3 farklı uygulama söz konusudur.

1. Lokal Kompanzasyon
2. Grup Kompanzasyon
3. Merkezi Kompanzasyon

2.10.1. Lokal kompanzasyon

Sürekli olarak işletmede bulunan, oldukça büyük güçlü tüketicilerin reaktif güç ihtiyacını temin edebilmek için lokal kompanzasyon yapılır. Kondansatörler tüketicinin uçlarına doğrudan doğruya paralel bağlanırlar. En önemli büyük güçlü

tüketiciler asenkron motorlar, transformatörler, arkla çalışan sistemler (Kaynaklar, deşarj lambaları, ark fırınları)'dır. [6]

Lokal kompanzasyonun faydası, ilgili kısmı kendi içinde kompanze ediyor olmasıdır. Dezavantajı ise, münferit olarak kısmi kompanze edilmiş bölümün kondansatörü arızalanırsa, abonenin durumu geç fark etmesi durumunda indüktif cezaya düşme olasılığı vardır. Aynı şekilde, cihaz ya da cihaz grubunda arıza olursa sistemden indüktif yük çekilmeyeceği için, geç fark edilmesi ya da fark edilmemesi durumunda, kapasitif reaktif güç nedeni ile kapasitif sayaç ilerleyebilir. Bu neden ile belli bakım aralıkları ile lokal kompanzasyon kontrol edilmelidir.

2.10.2. Grup kompanzasyon

Beraber ve aynı kontaktör üzerinden devreye girip çıkan motor, lamba ve transformatörler beraber kompanze edilirler. Sigorta ve deşarj dirençlerine ihtiyaç yoktur. Bir çok tüketicinin bulunduğu bir tesiste her tüketicinin ayrı ayrı kondansatörler ile 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[1].

2.10.3. Merkezi kompanzasyon

Çok sayıda tüketici olan sistemlerde her tüketicinin sabit ve sürekli reaktif güç tüketmesi söz konusu değildir. Bu nedenle reaktif güç ihtiyacına cevap verebilmek için trafonun sekonder tarafında kompanzasyon sistemi kurulur. Bu sistem değişken reaktif güç ihtiyacını karşılayabilmek için kademeli olarak tasarlanır. Ayrıca kademelerin ihtiyaca göre, $\cos\phi$ 'yi istenilen değerde tutacak şekilde devreye alınmasını sağlayacak otomatik bir düzenek, bir reaktif güç kontrol rölesi kullanılır.

Reaktif güç kompanzasyonu için kullanılacak rölenin, mikroşlemcili ve hassas olması ihtiyaca en uygun reaktif gücün en kısa sürede karşılanabilmesi için gereklidir.

2.10.3.1. Reaktif rölenin seçimi

Günümüzde, mekanik sayaçların yerini yavaş yavaş elektronik sayaçların alması ve mekanik sayaçların kullanımdan kaldırılması, son kullanıcıların kompanzasyonda zorlanmalarına neden olmaktadır. Çünkü, elektronik sayaçlar enerjileri her faz için ayrı biriktirmektedir. Yani mekanik sayaçlar gibi vektörel toplama bakmaz. Sonuç olarak trifaze kondansatör grupları ve monofaze eski tip röleler sonuç vermeyebilir.

Mekanik sayaçlarda, tüm işlem fiziksel olarak gerçekleşir. Sadece güç vektörleri işleme tabi tutulur. Elektriğin vektörel toplamını almış olur. Bu bileşke doğrultusunda harcanan enerjiyi yazmış oldukları için, fazları bağımsız olarak değerlendiremezler.

Elektronik sayaçlarda, elektrik sayma işlemi, sayaç entegresi ve sayaç entegresinden ölçüm değerlerini alıp işleyen ve hafızasında tutan mikroşlemci bulunur. Elektronik sayaçtaki mikroşlemci yazılımı her fazdan ölçülmüş olan değerleri birbirinden bağımsız olarak aktif, indüktif, ve kapasitif sayaçlara işler. Bu durumu başka bir deyiş ile fazın biri indüktif, diğeri de aynı anda kapasitif ise bu iki fazın reaktif gücünün farkını almaz. Bu iki faz bağımsız olarak sayaçlara işlenir. Fazları bağımsız değerlendirince, dengesiz yük sistemlerinin RST arasında üçlü kondansatör olarak yapılan kompanzasyonda, bileşke bakımından kompanzasyon sağlansa bile, elektronik sayaç her hem indüktif hem kapasitif taraftan yazabilir. Bu nedenden dolayı, reaktif güç kontrol rölesi seçmek çok daha önemli bir hale gelmektedir.

BÖLÜM 3. ENERJİ KALİTESİ VE HARMONİKLER

3.1. Giriş

Son yıllarda ülkemizde, endüstride kullanılan sistemlerin modernleşmesi ve ağır sanayide otomasyon tekniklerinin kullanılması ile birlikte güç katsayısı ayarı daha önemli bir hale gelmiştir. Özellikle, endüstrideki tesislerde, gerilim ve akım kontrolü ile gerçekleştirilen güç kontrolü ile, şebekeden çekilen akımlarda büyük ölçüde bozulmalar meydana gelmektedir. Bu akımların ise, inceleme yapılmadan kompanze edilmek istenmesi, güç katsayısındaki istenen değerlere ulaşmak zorunluluğu ile, birçok problemi de beraberinde getirmektedir. Akımdaki dalgalanma ve sinüzoidal dalga şeklinden uzaklaşma, gerilimi de etkilemekte ve enerji kalitesi bozulmaktadır.

Üretimde, büyük ölçüde kullanılan güç elektroniği sistemleri nedeniyle, harmonikler göz ardı edilememektedir. Eğer sadece konvansiyonel metotlarla enerji kalitesi ya da güç katsayısı düzeltilmek istenirse, en başta istenmeyen enerji kayıpları meydana gelir. Sadece kondansatörlerle yapılan kompanzasyonlarda, harmonikler, dağıtım hatlarında gerilim düşümüne enerji kaybına neden olmaktadır. Ayrıca gerilimde meydana gelen parazit etkilerin ve harmoniklerin elektronik kartlara da etkisi vardır. Örneğin; elektronik sistemlerde bellek silinmesi, otomatik şalterlerdeki bilinmeyen açmalar v.s. elektrik kesintileri oluşturmaktadır. Bu nedenlerle ürün kalitesi ve verimlilik düşmekte, bakım gerekliliği ve yedek malzeme ihtiyacı ise artmaktadır. Güç kalitesinde, ani akım ve gerilim değişimleri, harmonikler, gerilim düşümü veya gerilim yükselmeleri, flicker olayları etkilidir.

Sonuç olarak sadece güç katsayısını düzeltmek enerji kalitesini yükseltmek için yeterli değildir. İhtiyaç duyulan enerji kalitesini sağlamak için yukarıda bahsedilen bütün faktörler göz önüne alınarak çalışma yapılmalıdır.

3.2. Enerji Kalitesi

Enerji kalitesi tanımı, en genel şekilde, herhangi bir “t” anında gerilim, akım ve frekansın esas değerinden saparak oluşturduğu enerji probleminin, kullanıcının sisteminde bir arıza veya istenmeyen bir çalışma şekline sebebiyet vermeden giderilmesidir.

Dağıtım şirketleri ile kullanıcıların tek hedefi, sadece güç katsayısını düzeltmek olmamalıdır. Son kullanıcının kullandığı enerjinin kalitesi çok önemlidir. Enerji kalitesi, üretim ve ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Enerji kalitesinde, güç katsayısı yanında, harmonikler, gerilim ve akım değerlerindeki darbeler ”Spikes”, değer değişiklikleri ve dalgalanmalar “Sags and swells” ve fliker “flicker” etkisi önemli rol oynarlar [7].

3.3. Harmonik Tanımı

Günümüzde endüstriyel yöntemlerin modernizasyonu, elektriksel cihaz ve makinalar hakkında çok fazla bilgi sahibi olunması, güç elektroniğinde de oldukça büyük bir gelişmeye imkan tanımıştır. Bu gelişim sonucu, tristör ve IGBT gibi yüksek frekanslarda anahtarlama yapabilen sistemler endüstride oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır.

Bu sistemler, elektriksel karakteristiklerinden dolayı lineer olmayan (Non-linear) yüklere ihtiyaç duyarlar. Lineer olmayan yük, akımı ile gerilimi arasında bir ilişki olmayan yük demektir. Yük kaynağı olan gerilim ve akım eğrileri sinüsoidal değildir. Fourier analizine göre, sinüsoidal olmayan bu terimler harmonik olarak adlandırılırlar.

Enerji dağıtım sistemlerinde sinüs formundaki bir gerilim kaynağı yarı iletken teknolojiye sahip bir sisteme uygulanırsa (DC veya AC Sürücü , UPS , vb) sistemin vereceği akım cevabı kare dalga şeklinde olacaktır [8].

Sinüs formunda ve sistem empedansı oranında genliğe sahip olması gereken bu

akım dalga şeklinin kare dalga olmasının nedeni içerdiği temel şebeke frekansı dışındaki sinüs dalgalarıdır. Temel şebeke frekansı (50 Hz) dışındaki diğer sinüs formundaki bu akımlara “Harmonik” denir.

Harmonikler genel olarak nonlinear elemanlar ile nonsinüsoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Akım-gerilim karakteristiği doğrusal olmayan elemanlara nonlinear elemanlar denir. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması, sinüsoidal dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar nonsinüsoidal dalga olarak adlandırılır. Bu dalgalar, fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Bu analiz ile nonsinüsoidal dalgalar, frekansları farklı sinüsoidal dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu sayede harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir. Harmonikler güç sistemlerinde; ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi vb. gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açar [9].

3.4. Harmonik Seviyeleri

Yukarıda bahsedilen yarı iletken teknolojiye sahip olan bir cihazın üreteceği harmonik akımların hangileri ve hangi mertebelerde olduğu bu cihazın darbe sayısına yani içerdiği tristör veya diyot gibi elemanların adetlerine bağlıdır. Günümüz 3 fazlı elektrik teknolojisinde diyot ve tristörler bir cihaz içerisinde 6 adet veya 12 adet kullanılarak 6 darbeleri veya 12 darbeleri sistemler olarak adlandırılırlar. 6 pulslu bir sistem için;

$$n = hq + 1 \quad (3.1)$$

formülünde h: darbe sayısı, q: Sıra ile ilerleyen tam sayı olmak üzere;

$$n = 6.1 + 1 = 5 \text{ ve } 7$$

$$n = 6.2 + 1 = 11 \text{ ve } 13$$

$$n = 6.3 + 1 = 17 \text{ ve } 19$$

$$n = 6.4 + 1 = 23 \text{ ve } 25 \text{ gibi harmonik akımlar üretilecektir [10].}$$

Üretilecek bu harmoniklerin temel şebeke frekansındaki akıma olan yüzdesel değerleri ise;

$$\% = 100 / n \quad (3.2)$$

formülü ile hesaplanabilir.

Örnek;

- 5. Harmonik yüzdesel değeri $\% = 100 / 5 = \% 20$
- 7. Harmonik yüzdesel değeri $\% = 100 / 7 = \% 15$
- 11. Harmonik yüzdesel değeri $\% = 100 / 11 = \% 9$
- 13. Harmonik yüzdesel değeri $\% = 100 / 13 = \% 8$
- 17. Harmonik yüzdesel değeri $\% = 100 / 17 = \% 6$
- 19. Harmonik yüzdesel değeri $\% = 100 / 19 = \% 5$
- 23. Harmonik yüzdesel değeri $\% = 100 / 23 = \% 4$
- 25. Harmonik yüzdesel değeri $\% = 100 / 25 = \% 4$

3.5. Harmonik Üreten Elemanlar

Elektrik üreten ve dağıtan firmalar ile elektriği kullanan müşteriler elektrik enerjisinin iyi kalitede olmasını isterler. Ancak bazı yükler yapıları gereği bazı yükler ise tasarım ve kontrol özellikleri bakımından besleme gerilimini ve akımını bozarlar yani harmonik üretirler. Bunun en belirgin nedeni uç gerilimi ve akımı arasındaki bağıntının lineer olmadığı yüklerdir. Bu tür yükler, genel olarak ark prensibine göre çalışan düzenler, gaz deşarjlı aydınlatma armatürleri, demir çekirdekli sargı bulduran makineler, elektronik veya yarı iletken teknolojisine göre tasarlanmış sistemler şeklinde sınıflandırılabilir. Sanayide, ticarethanelerde ve evlerde kullanılan harmonik üreten cihazlara her geçen gün yenileri eklenmektedir. Elektrik makinelerinin cihazlarının tasarım ve cihazlarının tasarım ve kontrol ilkelerinde meydana gelen değişiklikler ve güç elektroniğinin hızla ilerlemesi ve modern hayata birçok yararlar getirirken beraberinde birçok olumsuzlukları da getirmektedir. Örneğin generatör, transformatör, motor ve bobin gibi demir çekirdek içeren

elemanlar, doymanın baş göstermesi ile harmonikli akım üretirler. Ark fırınları ve kaynak makineleri gibi düzeneklerde normal işletmeleri gereği bir arkın oluşturması sonucunda harmonik üretirler. Tristörler, GTO'lar (Gate-Turn-Off Thyristor), MCT'ler (MOS-Controlled Thyristor) veya IGBT'ler (Insulated Gate Bipolar Transistor) sinüs biçimli akımı keserken yine harmonikler oluştururlar [10].

Yukarıda bahsedilen harmonik kaynakların bazıları aşağıda incelenecektir.

3.5.1. Jeneratörler

Makine hızına ve endüvi oluk sayısına bağlı olarak döner makineler akım harmonikleri üretirler. Endüklenen elektromotor kuvveti alan eğrilerinin içerdiği harmoniklere uygun olarak aynı harmonikleri içerir; yani 1., 3., 5., 7., 9., vb gibi tek bileşenleri vardır. Harmonik mertebesi artıkça genlikleri azalır, harmonik frekansı ise artar ($h.f_1$), h . harmonik gerilimi,

$$U_h = 4,44.h.f_1 .N_s k_n \phi_n \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Eğer statorun sargısı yıldız bağlanmışsa, üç ve üçün katı frekanslı harmonikler sadece faz-nötr gerilimlerinde bulunup fazlar arası gerilimlerde bulunmazlar.

Eğer yıldız bağlı generatöre üç fazlı simetrik bir tüketici bağlanırsa ve yükün yıldız noktası generatörün yıldız noktasına bağlanmazsa, üç ve üçün katı harmonikli akımlar geçmez. Yıldız noktası nötre bağlı bir yük ise, faz iletkenlerinden üç ve üçün katı frekanslı I_0 akımı, nötr üzerinden de bunların toplamı olan $3.I_0$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde üç ve üçün katlarında bir gerilim düşümü meydana getirirler.

Eğer generatör sargıları üçgen bağlı ise, bu sargılarda üçün katı frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olurlar [8,10].

3.5.2. Transformatörler

Elektrik güç sistemlerinde transformatörler gibi bir demir çekirdek üzerine yerleştirilmiş bobinlerden meydana gelen elemanlar, doyma özelliğine sahip demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle harmonikler üretirler [10].

Bilindiği gibi transformatörlerin mıknatıslanma akımının dalga şekli sinüs formundan oldukça uzaktır. Bu nedenle mıknatıslanma akımı yüksek genlikli harmonik akım bileşenleri içerir. Ancak transformatörün mıknatıslanma akımı, ana akımının %1'i seviyesindedir [8]. Elektronik güç konverteri ve ark fırınları gibi nominal akımlarının %20'sine varan oranlarda harmonik akımları üreten diğer harmonik kaynakları ile güç transformatörleri karşılaştırılırsa, güç transformatörleri sistemde büyük harmonik kaynakları olarak dikkate alınmayabilirler. Bu nedenle harmonik yük akış çalışmalarının bir kısmında transformatörlerin lineer devre elemanları olarak modellendiği görülmektedir. Ancak bir dağıtım sisteminde yüzlerce transformatörün olduğu göz önüne alınırsa bir bütün olarak transformatörler harmonik kaynağı olarak ele alınabilir. Tablo 3.1'de bir dağıtım transformatörünün harmonik akım bileşenleri transformatörün mıknatıslanma akımının yüzdesi olarak verilmiştir [10]. Burada I_{μ} transformatörün mıknatıslanma akımı, I_n transformatörün sisteme enjekte ettiği n. harmonik akımdır.

Tablo 3.1 Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu

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

Güç transformatörleri mıknatıslanma eğrisinin lineer olduğu bölgede çalışmak üzere dizayn edilir. Ancak transformatör yükünün az olduğu zamanlarda gerilimin yükselmesi sebebiyle manyetik çekirdek aşırı uyarılır ve çalışma mıknatıslanma

eğrisinin lineer olmayan bölgelerinde gerçekleşir. Bu durumda transformatör harmonik üretir ve tablo 3.1’de gösterildiği gibi özellikle üçüncü harmonik bileşenleri etkin olur.

Transformatörlerin lineer olmayan yükleri beslemesi sonucu transformatör üzerinden akan yük akımı harmonik bileşenleri içerir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda kuru tip transformatörlerin nonsinüzoidal akımlar çeken yükleri besleyebilme kapasitesinin bir ölçütü olarak kabul edilen ‘K-Faktörü’ tanımlanmıştır. K-Faktörü de anma gerilimi veya anma gücü gibi transformatörler için imalatçısı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüğüdür. Bu faktör,

$$K - Faktörü = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \cdot n^2 \quad (3.4)$$

olarak tanımlanır [9]. Bu bağıntıda n. Harmonik mertebesi, I_n ise baz değer olarak transformatörün anma akımının alınması ile hesaplanan n. Harmonik akım bileşeninin per-unit değeridir. K-Faktörü anma gücü 500 kVA’ın altındaki transformatörler için tanımlanmıştır.

Transformatörün yıldız noktasının topraklanması halinde; her üç faza ait dengeli temel bileşen akımlarının toplamının sıfır olması sebebiyle nötr iletkeninden geçen akım sıfır olur. Bu durum üç ve üçün katı harmonikler dışındaki tüm dengeli harmonik akım bileşenleri için geçerlidir. Her geçen üç fazın üç ve üçün katı harmonik akımının üç katı nötr iletkeninden geçer ve nötr iletkeni bu akım nedeniyle aşırı ısınabilir. Bu nedenle nötr iletkenin kesitinin belirlenmesinde 3. harmonik akımının da göz önüne alınması gereklidir. Transformatörün sekonderi üçgen bağlı ise üçgen bağlantının her bir düğümünde akım toplamının sıfır olması nedeniyle şebekeye üç ve üçün katı harmonik akımları geçemez. Bu özellikten yararlanılarak şebekenin üç ve üçün katı harmoniklerden etkilenmesini önlemek için transformatörün yıldız/üçgen (Nonlinear yük tarafının yıldız ve şebeke tarafının üçgen) bağlı olması tavsiye edilir. Transformatörün yıldız–topraklı/yıldız–topraklı bağlı olması halinde üç ve üçün katı harmonikler şebekeye geçer [9].

Nonlineer yük dengesiz ise transformatör bağlantısı ne olursa olsun üç ve üçün katı harmonik akımları dengesizlik sebebiyle şebekeye geçer [8].

3.5.3. Doğrultucular

Günümüzde ana harmonik kaynaklarından birisi de şebeke denetimli çeviricilerdir. DA iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler şebeke denetimli çeviriciler üzerinden beslenirler. P darbeleri bir çeviricinin meydana getireceği akım harmoniklerinin mertebesi,

$$h = k.p \pm 1 \quad (3.5)$$

$k = 1, 2, 3, \dots$ olmaktadır. Çeviricilerde darbe sayısı $p = 6, 12, 18$ veya 36 olabilir.

Harmonik akımı;

$$I_h = I_1 \cdot \left(\frac{\ddot{u}_h}{h} \right) \quad (3.6)$$

olup $\ddot{u}_h=1$ 'den küçük bir katsayıdır. Çeşitli harmonik değerlerinde çeviricilerin kumandasına bağlı olarak farklı değerler almaktadır. Komütasyon süresi ihmal edildiği hallerde $\ddot{u}_h=1$ alınabilir. Bu durumda $I_h = I_1 / h$ elde edilir. Harmonik akımın efektif değeri harmonik mertebesi ile ters orantılıdır. Harmonik akımın mertebesi p darbe sayısı ile artırılarak harmonik akımın efektif değeri azaltılabilir.

Sistemdeki bir fazlı büyük güçlü konverterlerin (Kontrollü doğrultucuların) kullanım alanlarından birisi de elektrikli demiryolu ulaşım sistemleridir. Üç fazlı ideal (Dengeli) konverterlerin bir fazlı konverterlere göre avantajı, üç fazlı konverterlerin üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir [8]. Üç fazlı konverterler, konverter transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen a.c. akımın dalga formunun içerdiği darbe sayısı ile tanınır.

3.5.4. Ark fırınları

Ark fırınları geniş harmonik spektrumları ile elektrik güç sistemine bağlanan büyük güçlü harmonik kaynaklardan biri olarak önemli yer tutar. Bunlar, yüksek gerilim güç iletim şebekesine direkt olarak bağlanan, anma gücü MW mertebesinde olan ve elektriksel ark oluşumu esasına dayanan fırınlardır. Elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle ark fırınları harmonik üretir. Ark olayının başlamasının ardından ark gerilimi azalırken sadece güç sistemi eşdeğer empedansı ile sınırlandırılabilen ark akımı artar. Bu anda ark olayında negatif direnç etkisi görülür [5]. Ark fırınlarının empedansı dengesiz olup, zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının rastgele değişimine sebep olduğu için ark fırınının modellenmesi oldukça zordur [10]. Ayrıca ark olayında akım ile gerilim ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak değişir.

3.5.5. Gaz deşarjı prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları

Bir tüp içerisindeki gazın deşarjı prensibine dayanarak geliştirilen aydınlatma elemanları (Civa buharlı lambalar, floresant lambalar, sodyum buharlı lambalar vb.) nonlineer akım gerilim karakteristiğine sahip olduğu için harmonik üretirler [8]. Bu tip lambalar iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Bina ve yol aydınlatmasında yaygın olarak kullanılan floresant lamba tesislerinde tek harmoniklerin seviyesi önemli oranda sistemi etkiler. Özellikle 3. harmonik ve 3. harmoniğin katları mertebesindeki harmonik akım bileşenleri, üç fazlı dört iletkenli aydınlatma devrelerinde nötr iletkeninden geçerek yüklenen iletkenin ısınmasına neden olur.

Ayrıca floresant lambalara bağlanan balastların da bir manyetik devreleri olması nedeniyle bu yardımcı elemanlarda harmonik üretirler. Son yıllarda magnetik balastların yerine kullanılmak üzere geliştirilen ve anahtarlamalı güç kaynağı prensibi ile çalışan elektronik balastlar da harmonik üretmekle beraber balast içerisine monte edilen filtre ile elektronik balastın ürettiği harmonik bileşenlerini elimine etmek mümkündür. Tablo 3.2’de magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik

spektrumu verilmiştir [8].

Tablo 3.2 Magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu

	<i>Harmonik</i>										
	<i>(n)</i>										
	<i>1</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>7</i>	<i>9</i>	<i>11</i>	<i>13</i>	<i>15</i>	<i>17</i>	<i>19</i>	<i>21</i>
$(\%) = \frac{I_n}{I_1}$	<i>100</i>	<i>19,9</i>	<i>7,4</i>	<i>3,2</i>	<i>2,4</i>	<i>1,8</i>	<i>0,8</i>	<i>0,4</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,1</i>

3.5.6. Diğer Harmonik Kaynaklar

Yukarıda açıklanan belli başlı bu harmonik kaynaklarına ilaveten diğer harmonik kaynaklardan da kısaca bahsedilebilir

1. Elektrik makinelerindeki diş ve oluklar
2. Çıkık kutuplu senkron makinelerde hava aralığındaki relüktans değişimi
3. Senkron makinelerde hava aralığı döner alanı
4. Senkron makinelerde ani yük değişimlerinin meydana getirdiği manyetik akı dalga şeklindeki bozulmalar
5. Transformatörlerin ilk enerjilenmesi ve motorların kalkış akımları
6. Güç üretim tesislerinde pompa, ateşleyici ve fanları sürmede kullanılan elektronik kontrol düzenleri
7. Özellikle çimento ve maden sanayiinde kullanılan lineer motorları süreklilik için kullanılan frekans dönüştürücüler
8. İndüksiyonla ısıtmanın kullanıldığı çelik sanayi, haddehaneler
9. Kaynak makineleri
10. Yarı iletken kontrollü cihazlar (motor hız kontrol düzenleri, ısıtıcılarda ısı regülasyon düzenleri, elektronik termosifonlar vb.)
11. Başta teyp, portatif tv adaptörleri, ütü, tıraş makinesi ve uzun ömürlü tekrar dolabilen piller gibi şarjlı cihazlarda kullanan doğrultucu devreler
12. Reaktif gücün çok hızlı ve ani değiştiği (özellikle ark fırınlarında) sistemlerde tristör anahtarlamalı statik VAR kompanzasyonu

13. Kesintisiz güç kaynakları ve anahtarlama güç kaynakları
14. Bilgisayar / network sistemleri ve bunlarla yönetilen otomasyona dayalı üretim tesisleri
15. Doğru akım ile enerji iletimi kontrolü ve dönüştürücü istasyonlar
16. Elektrikli trenler ve tek-raylı ulaşım araçlarında yüksek güçlü doğrultucuları, üniversal ve üç fazlı motorları beslemek için kullanılan dönüştürücüler, elektrikli taşıtlarda akü şarj devreleri
17. Konutlarda kullanılmaya başlanan fuzzy kontrollü çamaşır ve bulaşık makineleri, özellikle çok ekranlı televizyonlar, akıllı fırınlar ve mikro dalga fırınları, otomatik ayarlı aspiratörler ve hava düzenleyiciler (klimalar).
18. Elektro kimya teknolojisinde plakalara şekil verme, elektro kaplama işlemlerinde ve elektrophoretic boya sprelerinde kullanılan statik dönüştürücüler
19. Rüzgar ve güneş enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarında özellikle ac/dc dönüştürücülerde kullanılan yarı iletken teknolojisi.

3.6. Harmoniklerin Matematiksel Analizi

3.6.1. Fourier analizi

Alternatif akım enerji sistemlerinde akım ve gerilime ilişkin dalga şekillerinin ideal olarak sinüzoidal olmasına çalışılmasına rağmen, genellikle lineer ya da nonlineer bir devreye sinüzoidal gerilim uygulamasıyla nonsinüzoidal dalgalar da ortaya çıkmaktadır. Nonsinüzoidal büyüklüklerin analizi için Fourier Analiz yöntemi kullanılmaktadır.

Periyodik dalga şeklinin temel bileşeni ve daha yüksek dereceli harmoniklerinin genlik ve faz açılarının hesaplanması işlemi harmonik analizi olarak adlandırılmaktadır [9]. Bozulmuş (Nonsinüzoidal) bir periyodik dalga şeklinin harmonik bileşenleri, fourier analiz teorisine göre bir fourier serisi ile ifade edilebilir. Bu analiz tekniği uygulanarak nonsinüzoidal bir dalga şekli 50 Hz temel bileşen frekansının tam katları olan frekanslara sahip sinüs formunda dalga şekillerinin bir serisine açılabilir.

Fransız matematikçisi J. Fourier, nonsinüzoidal periyodik dalgaların genlik ve frekansları farklı birçok sinüzoidal dalgaların toplamından oluştuğunu ve bu tür dalgaların genlik ve frekansları temel dalga frekansının tam katları sinüzoidal dalgalara ayrılabilceğini göstermiştir. Bu şekilde elde edilen seriye 'Fourier Serisi', bu serinin elemanlarına da 'Fourier Bileşenleri' adı verilmektedir.

$$y = A_0 + (A_1 \sin x + B_1 \cos x) + (A_2 \sin 2x + B_2 \cos 2x) + \dots + (A_n \sin nx + B_n \cos nx) \quad (3.7)$$

Bu denklemde;

n = pozitif tamsayı olarak harmonik derecesi,

x = bağımsız değişken (elektrik enerji sistemlerinde bu değişken $t=wt$ olmaktadır),

A_0 = DC bileşen (sabit terim) olup literatürde A_0 yerine $A_0/2$ de kullanılmaktadır.

(Dalgada DC bileşen yok ise A_0 sifira eşit olacaktır)

$A_1, A_2, \dots, A_n, \dots, B_1, B_2, \dots, B_n, \dots$ harmonik bileşenlerin genlikleri.

Herhangi periyodik bir dalganın Fourier serisine açılabilmesi için Dirichlet tarafından verilen bazı koşulları sağlaması gerekmektedir. Dirichlet koşulları olarak bilinen bu koşullar, bir periyot içinde sonlu sayıda süreksizlik bulunması, sonlu sayıda maksimum ve minimumların bulunması ve ortalamasının sonlu değer olmasıdır. Elektrik enerji sistemlerindeki dalga şekilleri her zaman bu koşulları sağladığında Fourier bileşenlerinin elde edilmesi mümkün olacaktır [9].

3.6.2. Harmonikli sistemlere ait matematiksel tanımlamalar

Harmonikli akım veya gerilim barındıran elektrik sistemlerinde, sinüsoidal akım ve gerilim barındıran sistemlerden farklı olarak bir takım farklı matematiksel tanımlamalar yapılması gerekmektedir. Bunların en önemlileri,

1. Distorsiyon Gücü (D),
2. Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)' dir.

Bunlar en çok kullanılan tanımlamalardır. Bunlar dışında çok kullanılmama fakat

mevcut olan tanımlamalar ise,

1. Tekil Harmonik Distorsiyonu (HD),
2. Toplam Talep Distorsiyonu (TDD) [8].

3.6.2.1. Distorsiyon gücü (D)

Akım ve gerilimi sinüsoidal biçimde olan lineer bir devrede güçler arasında

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (3.8)$$

eşitliği sağlanır.

Harmonikli akım veya gerilim içeren sistemlerde güç ifadeleri arasında

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (3.9)$$

şeklinde bir bağıntı vardır. Buradaki D ifadesi distorsiyon gücü olarak tanımlanır ve

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (3.10)$$

şeklinde bulunabilir ve birimi (VAr)' dir. Burada,

S : Görünür güç (VA),

P : Aktif güç (W),

Q : Reaktif güç (VAr),

D : Distorsiyon gücüdür (VAr).

Literatürde, Distorsiyon Gücü bazen sistemin reaktif gücüne ilave edilerek tanımlanır.

3.6.2.2. Toplam harmonik distorsiyonu gücü (THD)

Sistemdeki harmoniklerin sınırlandırılmasını amaçlayan standartlarda yaygın olarak kullanılan Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD), akım ve gerilim için ayrı ayrı tanımlanmaktadır. Gerilim için,

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.11)$$

şeklindedir. Akım için ise,

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.12)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada,

THD_I : Akımın Toplam Harmonik Distorsiyonu,

V_n : Devreye uygulanan gerilimin n' inci mertebedeki harmoniğinin etkin değeri,

I_n : Devreden geçen akımın n' inci mertebedeki harmoniğinin etkin değeri,

V_1 : Devreye uygulanan gerilimin temel frekanstaki etkin değeri,

I_1 : Devreden geçen akımın temel frekanstaki etkin değeridir.

Akım ve gerilim için tanımlanan THD değerleri genel olarak yüzde cinsinden ifade edilirler. 3.11 ve 3.12 denklemlerinden elde edilen sonuçlar 100 ile çarpılarak sistemin THD değerleri yüzde cinsinden ifade edilir. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüsoidal dalga için THD değeri sıfırdır [3].

3.6.2.3. Tekil harmonik distorsiyonu (HD)

Harmonik mertebesi n olan gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonu,

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad (3.13)$$

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (3.14)$$

olarak tanımlanır. Burada,

HD_V : Gerilimin Tekil Harmonik Distorsiyonu,

HD_I : Akımın Tekil Harmonik Distorsiyonudur [3].

3.6.2.4. Toplam talep distorsiyonu (TDD)

Toplam Talep Distorsiyonu, bir yüke ait değer olup toplam harmonik distorsiyonu olarak,

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.15)$$

şeklinde tanımlanır. Burada,

TDD : Toplam Talep Distorsiyonu,

I_L : Yük tarafından, besleme sisteminden çekilen temel frekanslı akımdır [3].

3.7. Harmonik Standartları

Elektrik enerji sistemlerinde bulunan harmoniklerinin miktarını sınırlamak amacıyla kullanılan iki ayrı yöntem vardır. Bunlardan birincisi, IEC (International Electrotechnic Commission) tarafından da tercih edilen herhangi bir nonlineer yükün bağlandığı noktada uygulanan yöntemdir, İkinci yöntem, ise IEEE (Institute Electrical And Electronics Engineers) tarafından benimsenen, birden fazla nonlineer yükün beslendiği bir veya daha fazla merkezi noktada uygulanan bir yöntemdir [5].

IEC tarafından öngörülen sınırlama mantığında, tek tek her bir yükten kaynaklanan harmoniklerin sınırlandırılması söz konusudur. Böylece harmoniklerin toplamsal etkisinin de sınırlandırılacağı kabulüne dayanır. Bu mantık düşünsel bazda etkin olmakla birlikte uygulamada harmonik sınırlamalar için yapılan kabuller nedeniyle gerçekte oldukça çelişmektedir. IEEE tarafından öngörülen sınır ölçütler hem akım ve hem de gerilim harmoniklerine sınırlar getirmeleri bakımından daha

etkin ve sınırlayıcı olarak görülmektedir [5].

Bir çok ülke için harmoniklerin sınırlandırılması için toplam harmonik distorsiyonu (THD) kriterine göre çeşitli standartlar mevcuttur. Müsaade edilen maksimum gerilim ve akım distorsiyonu IEEE (standart 519-1992)'de belirtilmiştir. Buna göre birçok endüstriyel tesis için maksimum müsaade edilen THD'si %5, herhangi bir harmonik bileşen içinse %3'tür.[11] IEEE (519-1992)'nin dağıtım sistemleri için akım distorsiyonu limitleri Tablo 3.3'de, gerilim distorsiyonu limitleri ise Tablo 3.4'de verilmiştir. Ülkemizde güç sistemimiz için belirlenmiş standart değerler ve bu konuda bir çalışma yoktur. Sadece küçük ev aletleri için yayınlanmış bir standart mevcuttur.

Tablo 3.3. Dağıtım sistemleri için akım distorsiyonu limitleri

I_K / I_1	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

I_K : Kısa devre akımını

I_1 : Temel bileşen akımını

h : Harmonik derecesini göstermektedir.

Tablo 3.4. IEEE 519'a göre maksimum gerilim distorsiyon oranları

Maksimum Distorsiyon (%)	Sistem Gerilimi		
	< 69 kV	69 – 138 kV	> 138 kV
Tek Harmonik Değeri	3,0	1,5	1,0
Toplam Harmonik Değeri	5,0	2,5	1,5

3.8. Harmoniklerin Elektrik Güç Sistemlerine Etkileri

Lineer olmayan yükler tarafından üretilen harmonikler, gerilim ve akımın dalga şeklini bozarak güç sistemlerindeki elemanlar üzerinde olumsuz etkilerde bulunurlar. Bazı durumlarda elemanların zarar görmelerine ve sistem dışı kalmalarına neden

olurlarken yüksek harmoniklerin bulunduğu sistemlerde toprak kısa devresi akımlarının da daha büyük efektif değerlere yükselmesi gibi farklı sonuçlar doğurmaları da mümkündür. 50 Hz şebeke frekansının katları olan harmonik akımı frekanslarından dolayı generatör, transformatör ve hat reaktansları üzerinde bu akımların meydana getirdiği gerilim düşümleri artar. Bu gerilim düşümlerinin frekansları şebeke geriliminin frekansından farklı olduğu için sinüzoidal gerilim şeklini bozarlar. Harmonik akımlardan dolayı generatör, motor ve transformatörlerdeki kayıplar artacaktır. Sistemde çeşitli frekansların mevcut olması da rezonansın meydana gelmesi olasılığını artıracaktır. Olası bir rezonans sonucu oluşabilecek büyük akım ve gerilim değerleri sistemdeki elemanlara zarar verecektir. Harmoniklerin diğer etkilerini genel olarak maddeler halinde şu şekilde sıralayabiliriz:

- Şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşın gerilimler ve akımlar
- Generatör ve şebeke geriliminin bozulması,
- Aşırı gerilimlerden dolayı izolasyon malzemesinin delinmesi
- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler
- Elektrik cihazlarının ömrünün azalması
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü vb. yerlerde çalışma bozuklukları
- Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hatalarının oluşması
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma nedeniyle zarar görmesi
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımları ve aşırı ısınma oluşumu
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma
- Mikro bilgi işlemciler ve bilgisayarlar üzerinde hatalı çalışma

3.9. Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları

Harmoniklerin şebeke ve sistem üzerinde yaptığı en büyük etkilerden birisi rezonans olaylarına sebebiyet vermesidir. Rezonans; şebekeden çekilen akımı endüktif ve kapasitif etkiden kurtulup tamamen omik yük etkisi altında kalmasıdır. Bir başka deyişle sistemdeki kapasitif ve endüktif yüklerin eşitlenmesiyle devrede

tamamen omik yükün etkili olmasıdır. Bu olayın gerçekleşmesi sistemden maksimum akım akmasına neden olmaktadır.

Şebeke reaktansının değeri sabit olmayıp şebekenin o anki durumuna bağlı olarak değiştiğinden sönümsüz salınımın gerçekleştiği frekans değeri tam olarak hesaplanamaz, ancak bu değer genellikle 250Hz ile 350Hz arasındadır. Şebeke reaktansındaki değişimler sonucunda sönümsüz salınımın gerçekleştiği değer 5. harmonik frekansı olan 250Hz'e veya 7. Harmonik frekansı olan 350Hz'e gelirse, gerilimin 5. veya 7. harmonik değerleri toprağa kısa devre olur. Bu durum kondansatörlerin zarar görmesine yol açar. Bu islenmeyen durumu engellemek için kondansatör reaktansı ile şebeke reaktansının mutlak değerlerinin eşit olduğu frekans değerinin güvenli bir bölgeye çekilmesi gerekmektedir.

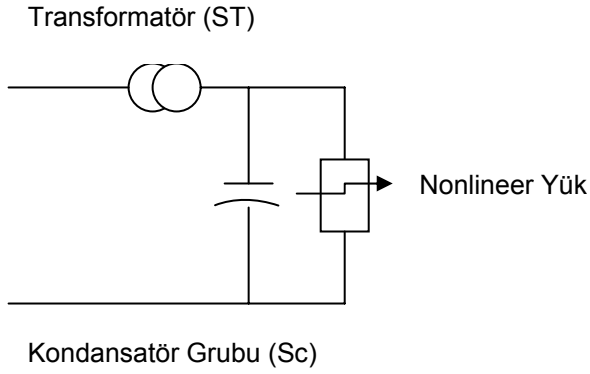
Bu nedenle kompanzasyon sistemlerindeki kondansatörlerin önüne uygun değerli bir şok bobini yerleştirilmesi gerekmektedir.

Kapasitif reaktansın endüktif reaktansa eşit olduğu frekansa rezonans frekansı adı verilmektedir. Sistemde oluşabilecek bir rezonans frekansı, mevcut harmonik frekanslardan birine yakın bir değerde ise, aşırı büyüklüklerde harmonik akım ve gerilimleri meydana çıkacaktır. Rezonans durumu harmonik seviyelerini etkileyen en önemli etkenlerden birisidir. Paralel rezonans harmonik akım akışına yüksek empedans değerleri gösterirken seri rezonans düşük bir empedans değeri göstermektedir. Herhangi bir rezonans durumu mevcut değilse sistemde önemli seviyelerdeki harmonik akımları taşıyabilmektedir. Bu yüzden sistemin cevap karakteristikleri incelenerek sistemin rezonans problemlerinin ortadan kaldırılması çok önemlidir. Rezonans durumlarını seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür.

3.9.1. Paralel rezonans

Paralel rezonans durumu en çok karşılaşılan problemlerden birisidir. Sistem endüktansı ile kondansatör grupları arasında, sistemde bulunan nonlineer yüklerin ürettiği harmonik frekanslarından birinin yakınında, paralel rezonans oluşabilir.

Böylece sakıncalı durumun oluşması kondansatör uçlarındaki gerilimin aşırı değerlere yükselmesine sebep olacaktır ve bu da kondansatöre zarar verebilecektir.



Şekil 3.1. Paralel rezonans durumu

Harmonik akımlar şebeke empedansı üzerinde ohm yasasına göre harmonik gerilim endüklerler. Elbette ki bu oluşan gerilim distorsiyonunun değeri üretilen harmonik akımın değerine bağlı olduğu kadar ilgili şebekenin empedansına da bağlıdır. İlgili şebekede toplam empedansı oluşturan iki temel ve birbirine paralel empedans göz önüne alınmalıdır.

Bunlardan birincisi trafo empedansı olan;

$$Z_{tr} = \omega L \quad (3.16)$$

ve kompanzasyon sisteminin empedansı olan,

$$Z_k = 1/\omega C \text{ dir.} \quad (3.17)$$

Bu iki empedansın paralel devresinin toplam empedansı;

$$Z_{toplam} = \omega L / (1 - \omega^2 LC) \text{ olarak hesaplanır.} \quad (3.18)$$

Bu eşitlik ile ifade edilen paralel empedansın paydasındaki $1 - \omega^2 LC$ değer "0" olur ise sistem ilgili frekans için teorik olarak sonsuz empedans seviyesine ulaşır. Bu duruma "Paralel Rezonans" denir.

Teorik olarak sonsuz büyüklükteki empedans demek olan bu değer pratik uygulamalarda üretilen harmonik akımların 3 ila 6 katına çıkmasına neden olur. Bu durumda trafo hattı için ve kompanzasyon sistemi için en tehlikeli boyutlara yükselir. Artık yukarıda bahsedilen standart üretimler (5. harmonik için % 20 vb) söz konusu değildir. Bu değerler devreye giren kompanzasyon miktarına bağlı olarak %100 değerine kadar yükselebilir.

3.9.1.1. Paralel rezonans frekansı

Sistemin ne zaman ve hangi frekans değeri için paralel rezonansa gireceği aşağıdaki formülasyon ile yaklaşık olarak hesaplanır ;

$$f_p = f \cdot (S_k / Q_c)^{1/2} \quad (3.19)$$

Burada S_k = İlgili Trafonun kısa devre gücü S_n / uk (kVA)

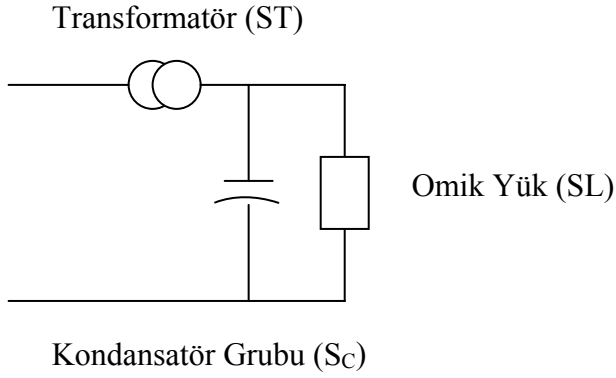
Q_c = Devreye paralel bağlı olan kondansatör gücü (kVAr)

Anlaşıldığı üzere sistemin rezonans frekansı Trafonun kısa devre gücü ile doğru, hat üzerine paralel olarak bağlı kondansatör gücü ile ters orantılıdır. Devreye giren kondansatör gücü arttıkça rezonans frekansı 5 ve 7 gibi düşük frekanslı harmonik noktalara doğru ilerler.

Ancak unutulmaması gereken nokta rezonans frekansı hangi harmonik bileşene gelirse o harmonik sistem için en tehlikeli harmonik haline gelir. Bu neden ile sistemde üretilen hiçbir harmonik frekansı için rezonansa izin verilmemelidir.

3.9.2. Seri rezonans

Aşağıdaki şekilde ikinci rezonans türü olan seri rezonansa bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.2 Seri rezonans devresi

Seri rezonans koşulu aşağıdaki formül ile verilebilir,

$$f_s = f \cdot \sqrt{\frac{S_t}{S_c Z_t} - \frac{S_L^2}{S_c^2}} \quad (3.20)$$

Burada f_s seri rezonans frekansını, S_t transformatörün nominal gücünü, Z_t transformatörün pu olarak empedansını ve S_L omik yükün gücünü göstermektedir. Seri rezonans, rezonans frekansıyla uyuşan harmonik akımlarına düşük bir empedans yolu sağladığı için harmonik akımlarda bir büyüme meydana gelmez ama harmonik akımlar şebekenin istenmeyen kısımlarına akabilirler. Böyle bir istenmeyen durum iki tür problemle karşılaşılmasına yol açabilir. Rezonans devresi ile hat boyunca seri bağlantılı devreler varsa, önemli ölçüde parazitler oluşabilir. Rezonans kolundaki harmonik akımlar nedeniyle kondansatör grubunda aşırı gerilim harmonikleri oluşabilir ve bobin sargılarının izolasyonu zorlanır. Kondansatör uçlarındaki gerilim şebeke geriliminin X_c/R katına çıkar.

Görüldüğü gibi rezonans durumu sistemlerde arızalar ve ekipmanlarda hasarlar meydana getirebilir. Sistem yükünün az olduğu zamanlarda, örneğin gecenin geç saatleri ve tatil günlerinde harmonik rezonansın etkisi daha fazladır. Yük seviyesi arttıkça akımın akabileceği daha küçük empedans yollarından dolayı rezonans nedeniyle oluşan harmonik artışı zayıflar. Bir çok endüstriyel tesiste olduğu gibi, devreler daha az yüklendiklerinde ve yüklerin tümü motor olduğunda, rezonans nedeniyle oluşan harmoniklere karşı daha duyarlı olurlar.

3.10. Harmonik Ölçüm Teknikleri

Kurulu bir tesiste harmoniklerin analiz edilebilmesi için en doğru yol harmonik ölçümü yapılmasıdır. Ölçüme başlanmadan önce tesisin elektriksel yapısı ayrıntılı olarak incelenmelidir.

Harmonik Ölçümünün en az 1 kHz'in üzerinde bir frekans bandı üzerinden ve testteki yük ve harmonik dengesizliklerini algılayabilmek amacıyla 3 faz-4 tel dengesiz akım/gerilim örnekleme ve %0,5 hata payıyla, FFT “Fast Fourier Transform” metodu ile True RMS olarak ve trafo başında uzun süreli olarak yapılması ve etkin Harmonik frekansının tespit edilmesi gereklidir.

Merkezi ve varsa tali kompanzasyonların sisteme olan etkisi de hesaba katılmalı ancak aşırı kompanzasyona gitmek gibi normal çalışma şartlarının dışına çıkılmamalıdır.

Harmoniklerin bulunduğu sistemlerde, belli başlı harmonik kaynakları tespit edilmeli ve gerekirse kaynak başından ölçüm alınmalıdır.

3.10.1. Ölçümlerin yorumlanması

Harmoniklerin ölçülmesi sonrası ölçümlerin yorumlanması tesisten tesise değişmekle beraber kabaca bir genellemeye gidilecek olursa aşağıdakileri söylemek mümkündür.

- $THDV < 2,5\%$ ve $THDI < 10\%$ ise tesiste harmoniklerden ötürü enerji kirliliği yoktur.
- $THDV = 2,5-3\%$ ve $THDI \geq 10\%$ ise tesiste harmonik filtrasyon uygulanması teknik olarak uygundur ancak ekonomik açıdan uygun olmayabilir.
- $THDV \geq 3\%$ ise paralel rezonans riski vardır ve tesis şartlarına uygun bir harmonik

filtrasyon sistemi uygulaması hem teknik hem de ekonomik açıdan en uygun çözümdür.

Harmoniklerin ölçümü ve yorumlanması ardından tesiste teknik ve ekonomik yönden en doğru çözüm veya çözümlerin tespit edilmesi gereklidir.

3.11. Harmoniklerin Giderilmesi

Harmoniklerin güç sistemi üzerindeki zararlarını ortadan kaldırmak için çeşitli önlemler alınabilir. Her ne kadar harmoniklerin şebekeler üzerindeki zararlı etkilerini ortadan kaldırmak mümkün olmasa da, en alt düzeye indirmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Bunlardan birincisi harmonik üreten elemanların imalatı sırasında yapısının harmonik üretmeyecek veya çok az üretecek şekilde tasarlanması veya şebekeye bağlantılarının uygun 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 yöntemde harmoniklerin filtrelenmesi olarak isimlendirilir.

Tasarım sırasında alınabilecek önlemler iki ana başlık altında toplanabilir. Birincisi, cihaz imal edilirken yapısının harmonik üretmeyecek veya az üretecek şekilde tasarlanmasıdır. Diğeri ise, cihazın elektrik enerji sistemine bağlanması sırasında değişik bağlantı şekilleri kullanılarak ürettiği harmoniğin şebekeye verilmemesini veya az oranda verilmesini sağlamaktır.

3.11.1. Harmoniklerin filtrelenmesi

Harmoniklerin zararlı etkilerini engellemek için tasarıma yönelik alınacak tedbirler yeterli değildir. Bu tedbirlere ilave olarak harmonik akımların şebekeye geçmesinin engellenmesi gerekmektedir, bunun için sisteme ilave edilmesi gereken ek devrelere ihtiyaç vardır.

Devreye yerleştirilen ve istenen harmonik akımının süzülmesini sağlayan bu devrelere “Harmonik filtresi” adı verilir. Harmonik filtrelerin amacı bir ya da daha fazla frekanstaki akım veya gerilimlerin etkisini yani harmonik içeriğini azaltmak veya yok etmektir. Harmonik filtrelerin görevini kısaca şöyle sıralayabiliriz;

- Harmonik üreten bir cihazdan (Bir redresörden veya inverterden) beslenen yükün gerilim dalgasını düzeltmek
- A.C. sisteme geri gönderilen istenmeyen harmonik bileşenleri önlemek
- Radyo frekans girişimlerini elimine etmek şeklinde özetlenebilir.

Temel olarak iki çeşit filtre vardır.

- Filtre bileşenlerinin direnç, endüktans ve kondansatör gibi pasif elemanlardan oluşturulduğu “Pasif filtreler”.
- Filtrelerin kontrollü akım ya da gerilim kaynağına sahip olduğu “Aktif filtreler”.

3.11.1.1. Pasif filtre

Pasif filtre, bir güç kondansatörü ile uygun değerde bir endüktansın (Reaktörün) seri bağlanması ile elde edilen rezonans devresidir. Böylece tesisin reaktif güç ihtiyacını karşılayan kompanzatör, aynı anda harmoniklerin de süzülme işini yerine getirir ve böylece ucuz bir yatırımla filtreleme gerçekleşir. Bunun sonucunda tesisteki harmonik akımlar, başıboş olarak cihazlardan devre tamamlamak yerine, kendisine düşük direnç gösteren filtrelere doğru gidecektir.

Burada amaç, yok edilmek istene harmonik bileşen ile rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik bileşen için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre kolu konulması gerekir. Genelde en etkin harmonik bileşenler için tasarım yapılır. Etkisi az olan harmonik bileşenler için zayıflatan bir filtre devresi düşünülebilir. Burada dikkat edilecek bir nokta filtre devrelerinde kullanılan

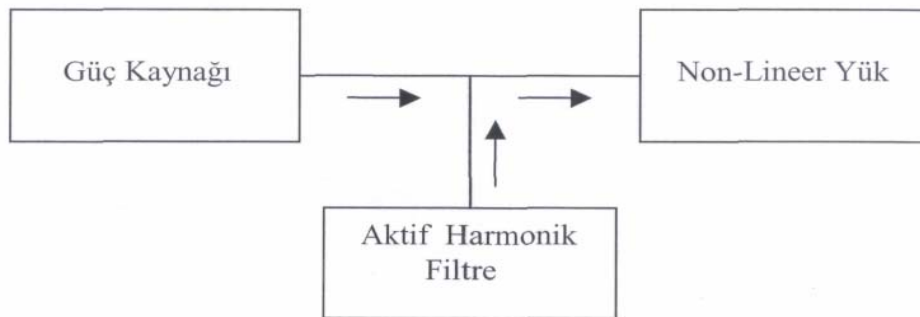
kondansatörlerin normal güç kondansatörlerine göre daha yüksek gerilimde çalışabilmeleri gerekir. Bu tür bir tasarım dengeli güç sistemleri için uygundur. Çünkü dengeli sistemlerde çift mertebeden harmonikler (2., 4., 6., 8., ...) gözükmez. Diğer taraftan Üçgen-Yıldız bağlı transformatörlerde 3 ve 3'ün katlarındaki harmonikler (3., 9., 12., 15., ...) ise üçgen sargıda dolaşacaklarından sisteme etkileri dikkate alınmaz. Bu bakımdan dengeli sistemlerde filtre tasarımı tek dereceli harmoniklere göre yapılır. Dengesizliğin olduğu üç fazlı sistemlerde (Örneğin ark ocağının bulunduğu tesislerde hem tek hem de çift dereceli harmonik bileşenlerin filtre edilmesi söz konusudur.

3.11.1.2. Aktif filtre

Aktif Filtre Pasif filtre yapısından tamamen farklı olup bir güç elektroniği sistemidir. Genel yapı olarak sistemdeki akım ve gerilimi ölçerek akım harmoniklerini şebeke tarafında yok eder. Akımdaki distorsiyona bağlı olarak ortaya çıkan gerilim distorsiyonu da bu sayede ortadan kaldırılır. Akım distorsiyonunu ortadan kaldırdığından kesin çözümdür.

Aktif Filtre uygulanmasındaki amaç şebeke harmoniklerini %97 mertebesinde ortadan kaldırmaktır. Ayrıca, isteğe bağlı olarak sistemin ihtiyacı olan reaktif güç sağlanabilir.

Diğer taraftan harmoniklerin tesis üzerindeki olumsuz etkileri tamamen ortadan kaldırılacaktır. Bu sayede sistemin enerji kalitesi de yükselecektir.



Şekil 3.3 Aktif harmonik filtrenin çalışma prensibi

Aktif filtrelerin ölçme teknikleri farklı olmakla birlikte çalışma mantıkları benzerdir. Aktif Filtre harmonik kaynağının bulunduğu noktada şebekeye paralel bağlanır. Harmonik kaynağının şebekeden çektiği akım ve gerilimi ölçer. Şebekeden çekilen harmonik akımının negatif değerlisini içerisindeki tetikleme sistemi ile üretir ve şebekeye bağlandığı noktada sisteme verir. Bu sayede şebekeden harmoniksiz akım çekilmesi sağlanır.

Aktif filtreler filtre edilecek harmonik üreticine göre boyutlandırılmakta olup, tamamen harmonik akımlarına göre dizayn edilirler.

Eğer Aktif filtrenin $\cos\phi'$ yi de düzeltmesi istenirse gerekli olan reaktif akımı da hesaplanarak filtre boyutlandırılır.

Aktif filtrelerde analog ve mikroişlemci tekniği olmak üzere iki tip üretim mevcuttur.

Mikroişlemci tekniği ile örnekleme yapan Aktif filtreler, sistemi analiz etmeleri gerektiğinden sistemden örnekleme yaptıktan sonra FFT yaparlar. FFT sonucuna göre de sistemdeki harmonikleri düzeltmek üzere akım üretirler. Mikroişlemcinin içinde yapılan hesapların yoğunluğundan ötürü bu teknikle çalışan aktif filtrelerin cevap zamanı 40 milisaniyeden başlayarak marka ve modellerine göre artış göstermektedir. Bu nedenle bu şekilde dizayn edilmiş olan Aktif filtrelerin verimliliği %94 ile sınırlıdır.

Analog ölçüm tekniği ile üretilen ASSET aktif filtreler ise, analog filtre devreleri sayesinde ölçtüğü akımın 50 Hz'deki bileşenini, gerilimin ise 50 Hz'in üzerindeki bileşenlerini süzerek elde ettiği akım ve gerilim bilgisini referans akım ve gerilimle karşılaştırılır.

Analog teknikle üretilmiş Aktif filtreler sistemdeki tüm harmonik akımları maksimum 2 milisaniye gecikme ile ve %98 verimlilik ile filtre ederler.

Aktif Filtre, filtre edeceği sisteme ve harmonik akımın mertebesine bağlı olarak

dizayn edilir. Diğer bir önemli husus ise filtre edilecek sistemin yapısıdır. Tek fazlı, 3 faz 3 telli ve 3 faz 4 telli sistem için aktif filtre mevcuttur. Eğer sistemde yüksek mertebede 3. harmonik mevcutsa, o sistemde mutlaka 3 faz 4 telli aktif filtre dizayn edilmelidir. 3 faz 3 telli bir harmonik filtre 3. harmonik akımlarını süzemez. Bu nedenle aktif filtre tam performansla çalışamaz.

3.11.1.3. Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması

Aktif filtre ile pasif filtrenin çeşitli durumlardaki davranışları karşılaştırılmalı olarak Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5 Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması

Konu	Pasif Filtre	Aktif Filtre
Harmonik akımların kontrolü	Her frekans için bir filtre ister (çok hacimlidir)	Aynı anda bir çok harmonik akımın kontrolü mümkündür
Frekans değişim etkisi	Etkinliği azdır	Etkisi yoktur
Empedans modifikasyonu etkisi	Rezonans riski vardır	Etkisi yoktur
Akım yükselmesi etkisi	Aşırı yük ve bozulma riski	Aşırı yükleme riski yoktur
Yeni yük eklenmesi	Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir	Herhangi bir probleme yol açmaz
Harmonik sırasının kontrolü	Oldukça zor	Ayar ile mümkün
Temel dalga frekans değişimi	Mümkün değil	Ayar ile mümkün
Genel boyutlar ve ağırlık	Harmonik derecesine göre çok değişken	Kompakt çözümler sunar

BÖLÜM 4. DENGESİZ YÜKLERDE VE HIZLI DEĞİŞEN YÜKLERDE GÜÇ KATSAYISI KOMPAZASYONU

4.1. Giriş

Bilindiği üzere, enerji sistemlerinde kompanzasyon hesaplamaları yapılırken, genellikle faz, gerilim ve akım değerlerinin simetrik olduğu düşünülür. Fakat enerji sistemlerinin her zaman dengeli yüklendiği farz edilemez. Örnek olarak; ark ocakları, reaktif üniteler, tek fazlı demiryolu tesisleri vb. şebekede düzensiz akımlara sebep olabilir.

Eğer bir tesiste, R, S, T faz akımları $I_R \neq I_S \neq I_T$ ve faz açıları $Q_R \neq Q_S \neq Q_T$ durumunu gösteriyorsa dengesiz yüklenme söz konusudur. Aynı tanımlama faz gerilimleri için de geçerlidir. Faz akımlarında çok fazla değişiklik olmadıkça hesaplamalarda faz gerilimindeki değişim ihmal edilebilir. Yani gerilim değişimleri hesaplamalarda ihmal edilebilir.

Dengesiz yük içeren sistemlerde güç katsayısı kompanzasyonu klasik yöntemlerle yapılmamalıdır. Bu bölümde yükler dengesiz ise, yani fazlar arasında simetri yoksa ve ayrıca yüklerin hızlı değişmesi durumunda güç katsayısını düzeltmek için çözüm yöntemleri anlatılmaktadır.

4.2. Dengesiz Yük İçeren Sistemlerde Güç Bağlılıkları

Bir fazlı sistemlerde ani güç, gerilim ve akımın ani değerlerinin çarpımına eşittir.

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (4.1)$$

Gerilim ve akımın ani değerleri

$$v = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (4.2)$$

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \quad (4.3)$$

olduğu varsayıldığında ani güç ifadesi,

$$\begin{aligned} p &= 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \varphi) \\ &= VI \cos \varphi - VI \cos(2\omega t - \varphi) \\ &= P - P \cos(2\omega t) - Q \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (4.4)$$

biçiminde olur. Burada

$$P = VI \cos \varphi \quad (4.5)$$

$$Q = VI \sin \varphi \quad (4.6)$$

Bu eşitliklerden de görüldüğü gibi bir fazlı sistemlerde ani güç, aktif güç olarak tanımlanan ortalama güç ile yüke bağlı olarak şebeke frekansının iki katı frekansta farklı genlikte salınım yapan gücün toplamına eşittir.

Dengesiz şebekede dengesizlik, her bir fazın geriliminin genliklerinin aşağıda belirtildiği gibi farklı olmasından kaynaklanabilir.

$$v_a = \sqrt{2}V_a \sin(\omega t) \quad (4.7)$$

$$v_b = \sqrt{2}V_b \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (4.8)$$

$$v_c = \sqrt{2}V_c \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (4.9)$$

Akımdaki dengesizlik her bir fazın akımının genliklerinin birbirinden farklı olmasından veya aralarındaki faz açısının 120° olmamasından kaynaklanabilir.

$$i_a = \sqrt{2}I_a \sin(\omega t - \varphi_a) \quad (4.10)$$

$$i_b = \sqrt{2}I_b \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi_b) \quad (4.11)$$

$$i_c = \sqrt{2}I_c \sin(\omega t + 120^\circ - \varphi_c) \quad (4.12)$$

Dengesiz üç fazlı sistemlerde ani güç,

$$\begin{aligned}
p &= v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \\
&= 2V_a I_a \sin(\omega t) \sin(\omega t - \varphi_a) \\
&\quad + 2V_b I_b \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(\omega t - \varphi_b - 120^\circ) \\
&\quad + 2V_c I_c \sin(\omega t + 120^\circ) \sin(\omega t - \varphi_c + 120^\circ)
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned}
p &= P + P_{2c} \cos(2\omega t) + P_{2s} \sin(2\omega t) \\
&= P + P_{2m} \cos(2\omega t + \beta)
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Kaynağa ait faz gerilimlerinin birbirinden farklı veya yükün dengesiz olması durumunda $\cos(2\omega t)$ 'li ve $\sin(2\omega t)$ 'li terimlerin toplamı sıfırdan farklı olur. Bu durumda, ani güç P ortalama gücü ile şebeke frekansının iki katı frekansta salınan P_{2m} genlikli sinüsoidal bileşenlerin toplamlarından oluşur [11].

Akım ile gerilim arasındaki faz açısının enerji iletimindeki önemi büyüktür. Bunun yanında, elektrik enerjisinin verimli kullanımını belirten güç faktörü tanımı da önem kazanmıştır. Bir fazlı ve dengeli üç fazlı sistemlerde güç faktörü; aktif gücün görünür güce oranıdır. Bu tanım çok açıktır ve birçok analog ve sayısal cihaz bu tanıma göre çalışmaktadır. Fakat, dengesiz üç fazlı sistemlerde güç faktörü tanımı konusunda halen ortak bir karara varılamamıştır. Bu konuda araştırmacılar tarafından iki tanım ortaya atılmıştır.

Güç faktörü ile ilgili ortaya atılan tanımlardan ilki;

$$\text{pf} = \frac{P_a + P_b + P_c}{S_a + S_b + S_c} \tag{4.15}$$

İkinci tanımda ise güç faktörü,

$$\text{pf} = \frac{P_a + P_b + P_c}{|P_a + P_b + P_c + j(Q_a + Q_b + Q_c)|} \tag{4.16}$$

ile belirlenir.

4.3. Ölçüm ve Analiz

Dengesiz yüklü bir sistemin dengeli ve üç fazlı kondansatör gruplarıyla kompanze edilmesi durumunda fazların her birinin güç faktörü farklı olacağından fazlardan bazıları endüktif, bazıları ise kapasitif yüklü olabilmektedir. Bu durumda üç fazlı reaktif sayaçlar fazların reaktif güçlerinin toplamını ölçtüklerinden sayacın reaktif güç yazmadığı durumda bile sistem dengesizliği gerçekte devam etmektedir. Bunun sonucunda endüktif yüklenen fazın gerilimi düşerken kapasitif yüklenen fazın gerilimi yükselecektir. Üç fazlı gerilim sisteminin dengesinin bozulmasıyla bundan sonra dengeli yükler bile dengesiz akımlar çekmeye başlayabilecek ve şebekenin kalitesi giderek düşecektir.

Söz konusu bu sakıncaları ortadan kaldırmak için bir kompanzasyon sistemi ihtiyaca anında cevap verebilmeli yani hızlı kompanzasyona olanak sağlamalıdır. Bu ihtiyacın önündeki en önemli engel klasik kompanzasyonda kullanılan mekanik kontaktörlerin çok hızlı çalışmaması, buna zorlandıklarında ise mekanik ömürlerini çok kısa zamanda tamamlamasıdır. Bu çalışma şeklinde ise çok sık kontaktör değiştirme ihtiyacı olduğundan sistem ekonomik olmaktan çıkmaktadır. Dengesiz durumlar için her fazın güç faktörünün ayrı ayrı denetlendiği ve her faza ihtiyacı kadar kompanzasyon yapılması gereklidir.

Kompanzasyon yapılabilmesi için, sistemin öncelikle elden geçirilmesi, sistem üzerindeki yüklerin karakteristiğinin bilinmesi gereklidir. Sistemin ölçümlerinin bilinmemesi, kompanzasyonun tamamen hatalı olmasına neden olabilmektedir.

Halbuki günümüzde, küçük sistemlerin çoğu monofaze yüklerden oluşmakta ve bu yükler değişik karakteristikte olabilmektedir. Örneğin, sistemi inceleyen bir elektrikçi, fazın birini 4 amper, ötekini 3 amper diğer fazı da 5 amper ise her faz için $\cos\phi$ değeri almamış ise sistemdeki reaktif gücü hesaplayamaz. Çünkü Q açısındaki değişiklik, reaktif ve aktif güçlerin değerlerinin değişmesine neden olur. Her fazın reaktif gücü ayrı ayrı bulunmalıdır ve bu yüklerin hangi durumlarda oluştuğu mutlaka göz önüne alınmalıdır. Toplam reaktif güç değeri de üç fazın reaktif güçlerinin toplamına eşit olur.

Ölçüm yapılırken sistemde kondansatör bulunmadığına özellikle dikkat edilmesi gerekmektedir. Sistemde bir reaktif güç kontrol rölesi çalışırken, doğal olarak sisteme kondansatör girer ya da çıkar. Bu durumda, sistemin çektiği reaktif güç değerlerini bulmak imkansız olacaktır.

4.3.1. Ölçülen reaktif gücün analizi

Ölçülen reaktif güç değerini, analiz edebilmek için ölçümler aşağıda belirtilen şartlar altında alınması gerekmektedir,

1. Sistemde sadece trifaze yükler çalışırken sistemin reaktif gücünün ölçülmesi,
2. Sistemin sadece monofaze yükler çalışırken sistemin reaktif gücünün ölçülmesi,

Eğer sistemde ölçülmüş olan trifaze reaktif güç toplam büyüklüğü, genel reaktif güç toplamının en az %95'ini oluşturuyor ve trifaze yükler sürekli devrede çalışıyor ise, monofaze yükler kompanzasyonda etkisi çok az hatta etkisiz sayılabilecek elemanlar haline gelir. Bu durumda tek faz ve tek akım trafosundan kumanda olarak sistem kompanze edilebilir.

Eğer sistemde ölçülmüş olan, trifaze reaktif güç toplam büyüklüğü, genel reaktif güç toplamının en az %85'ini oluşturuyor ise monofaze yüklerin baskın olabileceği asla unutulmamalıdır. Eğer trifaze yükler genellikle çalışacaklarını varsayarsak bile, tek faz tek akım trafosundan kumanda alan reaktif röle yetersiz kalacaktır. Kesinlikle üç faz ve üç akım trafosundan kumanda alan reaktif güç kontrol rölesi seçilmelidir.

Yine sistemdeki güç dengesinin dağılımına göre ve sistemdeki cihazların çektikleri güçlere ve bunların yineleme sıklığına göre kondansatör seçilmelidir.

4.3.2. Dengesiz sistemde reaktif rölenin seçimi

Günümüzde, elektronik sayaçların, yavaş yavaş mekanik sayaçların yerini alması ve mekanik sayaçların kullanımdan kaldırılması, son kullanıcıların kompanzasyonda zorlanmalarına neden olmaktadır. Çünkü, elektronik sayaçlar enerjileri her faz için ayrı biriktirmektedir. Yani mekanik sayaçlar gibi vektörel toplama bakmaz. Sonuç

olarak trifaze kondansatör grupları ve monofaze eski tip röleler sonuç vermeyebilmektedir.

Mekanik sayaçlarda, tüm işlem fiziksel olarak gerçekleşir. Sadece güç vektörleri işleme tabi tutulur. Doğal olarak, elektiriğin vektörel toplamını (Bileşke) almış olur. Bu bileşke doğrultusunda harcanan enerjiyi yazmış oldukları için, fazları bağımsız olarak değerlendiremezler.

Elektronik sayaçlarda, elektrik sayma işlemi, sayaç entegresi ve sayaç entegresinden ölçüm değerlerini alıp işleyen ve hafızasında tutan mikroişlemci bulunur. Elektronik sayaçtaki mikroişlemci yazılımı her fazdan ölçülmüş olan değerleri birbirinden bağımsız olarak aktif, indüktif, ve kapasitif sayaçlara işler. Bu durumu başka bir deyiş ile fazın biri indüktif, diğeri de aynı anda kapasitif ise bu iki fazın reaktif gücünün farkını almaz. Bu iki faz bağımsız olarak sayaçlara işlenir. Fazları bağımsız değerlendirince de, dengesiz yük sistemlerinin RST arasında üçlü kondansatör alarak yapılan kompanzasyonda, bileşke bakımından kompanzasyon sağlansa bile, elektronik sayaç her hem indüktif hem kapasitif taraftan yazabilir. Bu nedenden dolayı, reaktif güç kontrol rölesi seçmek çok daha önemli bir hale gelmektedir.

Elektronik sayaçlı sistemin analizi, mekanik sayaç kullanan işletmelerdeki gibi değildir. Sadece fazların arasındaki reaktif güç dengesizliğine bakmak yeterli olmayacaktır. Öncelikle, trifaze ve monofaze yüklerin kendi başlarına devreye alınarak ölçümleri alınmalıdır. Trifaze yükler, trifaze kondansatörler ile kompanze edilebilirler. Monofaze yükler de eğer üç faz üzerinde dengeli dağılmış ve eşzamanlı çalışıyorlar ise, trifaze üçlü grup kondansatörler ile kompanze edilebilir.

4.3.3. Dengesiz sistemde kondansatör seçimi

Sistem incelenirken monofaze, iki fazlı ve trifaze yükler olarak incelenmesi gerekmektedir.

Sistemi incelerken yapılması gerekenler,

1. Sistemdeki tüm yükleri kapatılarak, sadece monofaze yükler devreye alınmalıdır ve sistemin her fazının reaktif güçleri, ayrı ayrı ölçüp not alınmalıdır.
2. İki fazlı yükler için önce R-S fazları üzerinden, S-T fazları üzerinden, ve R-T fazları üzerinden olmak üzere ayrı ayrı ölçülmelidir.
3. Tüm sistem kapatılarak, sadece trifaze yükler devreye alınıp, trifaze yüklerin toplam reaktif gücüne bakılmalıdır.

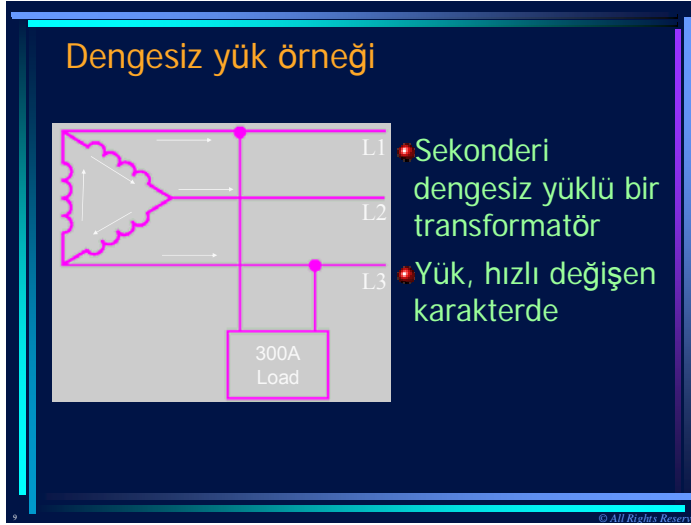
Sonuç olarak, her fazda monofaze yüklerin güçleri, iki fazlı yüklerin güçleri ve trifaze yüklerin güçleri ölçülmüş olmaktadır. Bu sayede, ilgili fazlardaki reaktif güç ihtiyacı belirlenmiş olur. İlgili aralıklarda fazları belirledikten sonra bu aralıklarda ihtiyaç duyulduğu kadar kondansatör kullanılmalıdır.

Bu kısımda dikkat edilmesi gereken husus fazların ihtiyaçlarına cevap verecek olan kondansatörleri ilgili fazlara bağlamaktır.

4.4. Dengesiz ve Hızlı Değişen Yükler

4.4.1. Punto kaynağı

Akım değerleri 60A ile 300A arasında değişen kaynak makinaları, bir transformatörün sekonderindeki üç fazlı barada, iki fazdan çalışma ilkesi ile, 50 ila 100 arasındaki sayıda, beraberce ve rast gele bağlı olarak, eşzamansız biçimde çalışmaktadırlar. Bu örneğe, ülkemizde, otomobil fabrikalarındaki gövde atölyelerinde sıkça rastlanmaktadır.



Şekil 4.1. Dengesiz Yük Örneği

Bu teknoloji ile kaynak yapan ve diğer ülkelerde de bağlantı şekli ve çalışmaları bunlardan farklı olmayan tesislerde yapılan enerji kalitesi ve güç katsayısı düzeltme uygulamalarına, ülkemizdeki tesislerde yapılan ölçmeler ile değinirsek, yükler hızlı değişmektedir. Faz arası bağlı yüklerin birbirleri arasında hiçbir eşzamanlı çalışma şekli de olmadığı için, toplam yük, alçak gerilim sisteminde hızlı değişen ve dengesiz bir karakter oluşturmaktadır.

4.5. Dengesiz Hızlı Değişen Yükte Dengeli Yavaş Kompanzasyon

İki faza bağlı kaynak makinalarının oluşturduğu bir barada, birçok kaynak makinesi bağlı iken, elde edilen akım ve gerilim grafiğinde, kaynak akımlarında ölçülen ani değer olarak %10 mertebelerinde gerilim çökmeleri yaşanır.

Diğer yandan, bir tesiste, yük olarak kaynak makinalarının çalıştırıldığı uygulamada, dengesiz ve saniyelerin yüzde mertebesinde çok hızlı değişen yük ortamında, akım trafolarının, kaynak makinalarının bulunduğu barada olması gerekmektedir. Bu tip tesislerde, akım trafolarının doğrudan reaktif akımların oluştuğu barada tesis edilmiş olmaları, ve buradan alınan akım değerleri ile dengeleme yolunun aranması gerektiği şarttır. Hızlı değişen bir yüke, hızlı kompanzasyon gereklidir. Bunun ise, kontaktörlü bir sistem ile yapılması mümkün değildir. Burada doğru olan 10-15 milisaniyeler seviyesinde değişim gösteren yüke, tiristörlü anahtarların kullanıldığı ve şebeke

frekansının yarım peryodunda hızlı bir şekilde, çöken gerilime denge sağlayacak kapasitif enerjinin, reaktif akımı dengeleyici yönde enjekte edilmesidir.

Eğer, kompanzasyon hatalı bir teknoloji ile yapılırsa, yani sadece güç katsayısını aylık bazda dengelemek amaç edinilirse, üretim sırasında, güç katsayısının ve reaktif gücün ani değerleri sürekli kapasitif değere geçer.

Bu tip tesislerde gerilim değerindeki oynamalar 220 V ile 240 V arasında sürekli salınım gösterir, güç katsayısı ise, sabit kondansatörler kullanıldığından, tamamen endüktif ile tamamen kapasitif değer arasında 180^0 lik bir salınım oluşturur.

Dengesiz yüklenme sonucu bir fazdan çekilen akım çok yüksek iken, diğer bir fazda akım değeri 0 mertebesinde olduğunu düşünürsek, fazın güç katsayısı, hatalı kompanzasyon nedeni ile tamamen kapasitiftir. Dolayısıyla herhangi bir faza konan akım trafosunun almış olduğu değere göre herhangi diğer bir fazda akım çekilmese bile, o faza kapasitif enerji verilmiştir. Bunun sonucunda rast gele bir durum ortaya çıkar.

Ancak, amaca erişilebilir. Çünkü bütün bu hatalı duruma aylık bazda bakıldığında, güç rölesi, güç katsayısını istenen aralıkta tutabildiği için ceza ödenmeyebilir.

Fakat her gerilim çökmesi, kaynak kalitesine etki eder. İstenilen akım elde edilemez. Gerilimin yüzdesel çökmesi, güce karesel olarak etki yaptığından, kaynak sürelerinin suni olarak uzatılması gerekir ya da kaynak kalitesinden taviz verilir.

Enerji kalitesi, doğrudan, üretilen ürünün kalitesini etkilemektedir. Bu tip yüklerde, amaç, bozulan enerji kalitesinin “Dinamik” olarak düzeltilmesini sağlamak, aynı zamanda güç katsayısının da dinamik olarak kompanzasyonunu temin etmek olmalıdır.

4.5.1. Çözüm önerileri

Birinci adım olarak, her faza ayrı ayrı kompanzasyon uygulamak gerekir. Üç fazda üç ayrı güç rölesi ile bu durum sağlanabilir. Yapılan ölçme sonucunda akımların simetrik olmadığı görülüyorsa veya akımlar hızlı değişiyorsa, faz akımlarını ayrı ayrı dikkate almak gerekir. Günümüzde, üç akımı da ayrı ayrı dengeleyebilecek tek bir güç rölesi mevcuttur.

Punto kaynak akımlarının endüktif özellikleri, gerilim düşümlerinin ve kayıpların maksimuma ulaştığı transformatör sekonderi yerine, doğrudan baralara konulacak akım trafolarından alınacak akım değerlerine göre, yerinde dengeleme yolunun seçilmesi ile daha etkin hale getirilerek, kayıplar en aza indirilebilir.

Diğer yandan, her durumda, filtreli kompanzasyon yapmak zaruridir. Filtreli kompanzasyonda, seçilecek rezonans frekansında, L ve C den oluşan filtrenin empedans karakteristiğinin, daha büyük frekanslı akımlar için her durumda endüktif olduğundan emin olunmalıdır. Bu bakımdan, bu tip uygulamalarda, sistemi 3. harmoniğe karşı emniyete almak için, rezonans frekansı 135 Hz seçilir.

Anahtarlama esas, anahtar olarak yarıiletken tiristörler kullanıldığından, bu elemanların 50 Hz teki maksimum hızından yararlanmaktadır. Bu hız ise, 10 milisaniyenin altındadır.

BÖLÜM 5. ENDÜSTRİYEL BİR TESİSTEN ALINAN ÖLÇÜM VERİLERİNİN İNCELENMESİ

5.1. Giriş

Bu bölümde endüstriyel bir tesis işletmesinde bulunan punto kaynak makinelerinin olduğu bölümdeki yüklerin sistemde yarattığı dengesizlik durumuna değinilmiştir. Sistemde dengesizliğe neden olan yüklerin bağlı bulunduğu barada ölçüm yapılmış ve parametrik değerler verilmiştir. Oluşan problemler ve problemlere uygulanacak mümkün çözüm anlatılmıştır.

5.2. Güç Faktörü

Güç faktörünün ortalama değeri 0,72 ve 0,81 arasında değişmektedir. Güç faktörü 0,949 değerinin üzerinde olmalıdır. 1.00 değeri en ideal koşuldur. Cihazın ölçme standartları incelendiğinde, güç faktörü değerinin 0 ile 2 arasında değiştiği göze çarpacaktır. 0-1 arası indüktif değeri, 1-2 arası kapasitif değeri göstermektedir. Örneğin 0,54 indüktif bir güç faktörünü, 1,54 ise kapasitif güç faktörü 0,54' ü tanımlamaktadır

Dengesiz yük içeren sistemlerde güç katsayısı kompanzasyonu klasik yöntemlerle yapılmamalıdır. Bu bölümde yükler dengesiz ise, yani fazlar arasında simetri yoksa ve ayrıca yüklerin hızlı değişmesi durumunda güç katsayısını düzeltmek için çözüm yöntemleri anlatılmaktadır.

5.3. Gerilim

Faz-faz arası gerilimin ortalama değeri yaklaşık 398V ölçülmüştür (Nominal gerilim 400V). Gerilim değerleri incelendiğinde, faz-nötr geriliminde yaklaşık 26V, faz-faz arası yaklaşık 40V dalgalanmalar tespit edilmiştir. Gerilim 400V-415V arasında

olmalıdır. Gerilimdeki dalgalanmalar punto kaynak kalitesinin bozulmasına sebep olur.

5.4. Reaktif Enerji

Her fazdan alınan ortalama reaktif güç değerleri incelendiğinde, toplam reaktif güç 113,43kVAR ölçülmüştür. İstenilen durum reaktif enerjiyi mümkün olduğu kadar sifıra yakın tutmaktır.

5.5. Ölçüm Sonucu Alınan Hat Parametreleri

Tablo 5.1. Hat Parametreleri

Parametre	Ortalama Değer	Parametre	Ortalama Değer
P.F. L1	0,72	Qm L1	47,12 kVAr
P.F. L2	0,72	Qm L2	36,37 kVAr
P.F. L3	0,81	Qm L3	29,94 kVAr
Vp L1	229,85 V	Qm Tot	113,43 kVAr
Vp L2	230,87 V	Sm L1	60,74 kVA
Vp L3	230,58 V	Sm L2	49,65 kVA
Vptp L1	398,02 V	Sm L3	53,05 kVA
Vptp L2	398,71 V	Sm Tot	163,44 kVA
Vptp L3	400,47 V	THDVp L1	% 1,97
Im L1	280,00 A	THDVp L2	% 1,78
Im L2	231, 28 A	THDVp L3	% 2,07
Im L3	232, 78 A	THDVptp L1	% 1,24
Pm L1	32,79 KW	THDVptp L2	% 1,18
Pm L2	24,17 KW	THDVptp L3	% 1,20
Pm L3	33,48 KW	THDIm L1	% 30,27
Pm Tot	90,53 KW	THDIm L2	% 27,29
		THDIm L3	% 21,25

5.6. Sistemde Görülen Problemler Ve Çözüm Önerileri

5.6.1. Problemin açıklanması

Punto kaynak makinesi faz-nötr arasına bağlanmıştır ve genel olarak anlık yüksek akımlar çeker. Tek faz bağlantı, birden fazla makine çalıştığında dengesiz yük durumları ortaya çıkarır. Dengesiz yükte çalışan sistemlerde her fazdaki reaktif enerji ihtiyacı da farklı olacaktır. Bu bakımdan bu tip yüklerde dengeli faz akımlarını kompanze etmek için kullanılan kompanzasyon sistemleri doğru uygulama değildir. Bir fazda ölçme yapılarak reaktif enerji ihtiyacının saptanması ve buna göre diğer

fazların da kompanze edilmesi, diğer fazlarda ya aşırı kompanzasyona, ya da yetersiz kompanzasyona sebep olacaktır. Bu yüzden her fazın ayrı ayrı ölçülerek kompanzasyonunun yapıldığı bir sistemin seçilmesi gerekliliği açıktır.

Anlık yüksek akımlar çeken punto kaynak makineleri, gerilimde aşırı dalgalanmalara sebep olmaktadır. Akım değerinin değişimini düşük tutmak, gerilimin dalgalanmasını kontrol etmeyi sağlayacaktır. Gerilim değerinin değişim aralığını küçültmek kaynak kalitesinin artmasına sebep olacaktır. Böylelikle kaynak kalitesini yükseltmek için, gerilim yükseltme alışkanlığından vazgeçebilecek ve daha az enerji ile punto makineleri çalışabilecektir.

Diğer bir husus ise ark prensibi ile çalışan kaynak makinelerinde harmonik sorunları oldukça sık rastlanılan bir durumdur. Bu da kaynak kalitesini etkileyecektir. Sistemde göz ardı edilmemesi gereken en önemli hususlardan birisidir.

5.6.2. Çözüm önerileri

Sistemde kompanzasyon hesaplaması yapılırken faz voltaj ve akım değerlerinin simetrik olduğu düşünülür ve tek fazdan ölçüm alınır, sistemde sık sık aşırı kompanzasyon ya da yetersiz kompanzasyon durumları ile karşılaşılır.

Örnek sistemde reaktif güçler;

$$Q_m L1 = 47,12 \text{Kvar}$$

$$Q_m L2 = 36,37 \text{Kvar}$$

$$Q_m L3 = 29,94 \text{Kvar}$$

$$Q_m \text{ Tot} = 113,43 \text{Kvar}$$

olarak ölçülmüştür.

Aktif güçler;

$$P_m L1 = 32,79 \text{Kw}$$

$$P_m L2 = 27,27 \text{Kw}$$

$$P_m L3 = 33,48 \text{Kw}$$

$$P_m \text{ Tot} = 90,53 \text{Kw}$$

olarak ölçülmüştür.

Bilindiği üzere 2007 itibari ile yürürlüğe girecek olan reaktif güç tarifesine göre, reaktif enerjinin aktif enerjiye oranının;

$$-0,15 < \frac{E_r}{E_a} < 0,25$$

değerleri arasında tutulması gerekecektir.

Sistemin simetrik olduğu varsayılarak sadece L1 fazından ölçüm alındığı düşünülürse,

$$Q_m L1 = 47,12 \text{ Kvar}$$

3 fazlı kondansatör kademeleri 7,5Kvar, 7,5Kvar, 10kvar,10kvar, 12,5kvar 5 kademeli 3 fazlı kondansatörler ile kompanzasyon yapıldığında L2 fazı 11,13kvar kapasitif yüklenmiş ve L3 fazı 14,02 kvar kapasitif yüklenmiş olur. Kapasitif yüklerin toplam aktif enerjiye oranı;

$$\frac{25,15}{90,53} = 0,278$$

$$0,278 > 0,15$$

bu durumda aşırı kompanzasyon yapılmıştır ve sistem cezaya girecektir.

Aynı şekilde L3 fazı referans alınırsa;

$$Q_m L3 = 29,94 \text{ kvar}$$

3 fazlı kondansatör kademeleri;

$$2,5 \text{ kVAr}, 2,5 \text{ kVAr}, 5 \text{ kVAr}, 5 \text{ kVAr}, 7,5 \text{ kVAr}, 7,5 \text{ kVAr}$$

6 kademeli 3 fazlı kompanzasyon sonucu, L1 fazı 17,12 kVAr endüktif yüklenmiş ve

L2 fazı 6,37 kVAr endüktif yüklenmiş olur. Endüktif yüklerin toplam aktif enerjiye oranı;

$$\frac{23,49}{90,53} = 0,259$$

$$0,259 > 0,25$$

Bu durumda yetersiz kompanzasyon yapılmış olur. Sistem yine cezaya girecektir. Örnek sistemden de anlaşılacağı gibi dengesiz yüklü bir sistemin dengeli ve üç fazlı kondansatör gruplarıyla kompanze edilmesi durumunda fazların her birinin güç faktörü farklı olacağından fazlardan bazıları endüktif, bazıları ise kapasitif yüklü olabilmektedir. Bu durumda üç fazlı reaktif sayaçlar fazların reaktif güçlerinin toplamını ölçtüklerinden sayacın reaktif güç yazmadığı durumda bile sistem dengesizliği gerçekte devam etmektedir. Söz konusu bu sakıncaları ortadan kaldırmak için bir kompanzasyon sistemi ihtiyaca anında cevap verebilmeli yani hızlı kompanzasyona olanak sağlamalıdır. Bu ihtiyacın önündeki en önemli engel klasik kompanzasyonda kullanılan mekanik kontaktörlerin çok hızlı çalışmaması, buna zorlandıklarında ise mekanik ömürlerini çok kısa zamanda tamamlamasıdır.

Kompanzasyon yapılabilmesi için, sistemin öncelikle elden geçirilmesi, sistem üzerindeki yüklerin karakteristiğinin bilinmesi gereklidir. Her fazın reaktif gücü ayrı ayrı bulunmalıdır ve bu yüklerin hangi durumlarda oluştuğu mutlaka göz önüne alınmalıdır. Toplam reaktif güç değeri de üç fazın reaktif güçlerinin toplamına eşit olur.

Öncelikle, trifaze ve monofaze yüklerin kendi başlarına devreye alınarak ölçümleri alınmalıdır. Trifaze yükler, trifaze kondansatörler ile kompanze edilebilirler. Monofaze yükler de eğer üç faz üzerinde dengeli dağılmış ve eşzamanlı çalışıyorlar ise, trifaze üçlü grup kondansatörler ile kompanze edilebilir.

Üç fazı da ayrı ayrı dengeleyebilecek reaktif güç rölesi kullanılmalıdır. Diğer yandan aktif filtreler ile oluşabilecek harmonikler yok edilmelidir.

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

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 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 sağlanması , yani reaktif güç kompanzasyonu ikinci bölümde anlatılmıştır. Buna göre reaktif güç kompanzasyonunun amaçlarına değinilmiştir.Yük kompanzasyonunun üç ana amacı vardır.

1. Güç katsayısının düzeltilmesi
2. Gerilim düşümü ve güç kaybı azaltılması
3. Boş yere hattın yüklenmesinin önlenmesi

Kompanzasyonun üreticilere ve tüketicilere getirdiği büyük avantajların yanında uygulandıkları işletmelerde bazı 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. Yine bu bölümde istenmeyen durumdan kurulmak için izlenmesi gereken yöntemlere değinilmiştir.

Kuvvetli akım tesislerinde aşırı doymuş transformatörler, ark fırınları, ark kaynak makinaları, elektrik makinaları ve artık günümüzde oldukça gelişen güç elektroniği elemanları, şebekede harmoniklerin meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Harmoniklerin enerji sistemindeki olumsuz etkileri, teknik ve ekonomik problemler olarak ikiye ayrılabilir. Teknik problemler, sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkileyen ve tüketiciye kaliteli enerji sunulmasını engelleyen problemlerdir. Harmoniklerin hiç olmaması enerji sistemleri için büyük bir yarar sağlar. Ancak günümüz şartlarında bunun mümkün olmadığı görülmektedir. O halde harmoniklerin etkilerinin azaltılması ve hatta tamamen giderilmesi düşünülebilir. Bunun iki yöntemi vardır; birincisi cihaz tasarlanırken harmonik üretmeyecek veya düşük seviyede üretecek şekilde tasarlanması diğeri ise harmoniklerin filtreler yolu ile süzülerek sistemden uzaklaştırılmasıdır. Üçüncü bölümde elektrik enerjisi kullanan tüm kesimler için çok önemli olan ve giderek artan harmoniklerin, tanımı, etkileri ve matematiksel analizi konuları incelenmiş ve harmoniklerin giderilmesi yöntemlerinden biri olan filtreler üzerinde durulmuştur.

Düzgün yapılmış kompanzasyonun sisteme faydası olduğu kadar, yanlış ve dengesiz yapılmış kompanzasyonun da şebekeye o derece zararı vardır. Şöyle ki; enerji sistemlerinde yüklerin her zaman fazlara eşit dağıtıldığı düşünülemez. Bazen bir fazdan çekilen akım çok yüksek iken, diğeri fazdan neredeyse hiç akım çekilmez. Dengesiz yüklü bir sistemin dengeli ve üç fazlı kondansatör gruplarıyla kompanze edilmesi durumunda fazlarını her birinin güç faktörü farklı olacağından fazlardan bazıları endüktif, bazıları ise kapasitif yüklü olabilmektedir. Bunun sonucunda endüktif yüklenen fazın gerilim düşerken, kapasitif yüklenen fazın gerilimi düşecektir. Üç fazlı gerilim sisteminin dengesinin bozulmasıyla bundan sonra dengeli yükler bile dengesiz akımlar çekmeye başlayabilecek ve şebekenin kalitesi giderek düşecektir. Dördüncü bölümde bu durum incelenerek alınabilecek önlemlerden bahsedilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] BAYRAM, M., Güç Katsayısının Düzeltilmesi ve Güç Kondansatörleri, İstanbul, 1991
- [2] Elektrik Müh. Odası, İstanbul Şubesi, Reaktif Güç Kompanzasyonu Seminer Notları, İstanbul, 1993
- [3] KOCATEPE, C., UZUNOĞLU, M., Harmoniklerin Sınırlanması ve Harmonik Standartları, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:150, 2001
- [4] YALÇIN, B., Kompanzasyon ve Harmonik Filtre Sistemleri Seminer Notları, İstanbul, 1998
- [5] BAYRAM, M., Elektrik Tesisleri ile İlgili Sorular ve Çözümleri, İstanbul, 1991
- [6] AKAGI, H., NABAE, A., KANAZAWAY, Y., Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components, IEEE Transactions On Industry Applications, Vo:20, No:3, 1984
- [7] ÇELTEKLİGİL, U., Dengesiz ve Hızlı Değişen Yüklerde Güç Katsayısı Kompanzasyonu, WIN' 05 Seminer Notları, İstanbul, 2005
- [8] ERTAN, U., Elektrik Şebekelerinde Harmonikler, Kaynak Dergisi, Sayı:4, 1994
- [9] ARGİN, M., Güç Sistem Harmonik Filtreleri, İstanbul, 2000
- [10] KOCATEPE, C., DEMİR, A; Güç Sistemlerinde Harmonik Üreten Elemanlara Genel Bakış, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:113, 1998
- [10] YALÇIN, B., Aktif Harmonik Filtreler, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı: 134, 2000
- [11] BAYRAK, M., GAYE G., Dengesiz ve Harmonikli Şebekelerde Güç Ölçümü, Sakarya

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Kdz. Ereğli’de doğdu. İlk öğretimini Gülüç İlköğretim Okulu, orta ve lise eğitimini Kdz. Ereğli Anadolu Lisesi’nde tamamladı. Kdz. Ereğli Anadolu Lisesi’ni bitirdikten sonra Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği’ni kazandı. Lisans eğitimini burada tamamladıktan sonra aynı üniversitede yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Sakarya Üniversitesi’nde eğitimine devam ediyor olup özel bir şirkette Elektrik Mühendisi olarak görev yapmaktadır.