

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

**OPTİMAL REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU VE HARMONİKLERİN
GÜÇ FAKTÖRÜNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur ERDEM

Anabilim Dalı: Elektrik –Elektronik Mühendisliği

**DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ**

EYLÜL -2013

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

**OPTİMAL REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU VE HARMONİKLERİN
GÜÇ FAKTÖRÜNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur ERDEM

(Enstitü No)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 18 Haziran 2013

Tezin Savunulduğu Tarih: 08 Temmuz 2013

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ (T.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Ömer ÇELİK (T.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Metin GÜNEŞ (T.Ü)

EYLÜL-2013

Uğur ERDEM tarafından hazırlanan OPTİMAL REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU VE HARMONİKLERİN GÜÇ FAKTÖRÜNE ETKİSİ adlı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç.Dr. Hüseyin ERİŞTİ
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Elektrik -Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. Bu tez, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

Başkan : Yrd. Doç.Dr. Hüseyin ERİŞTİ (T.Ü)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer ÇELİK (T.Ü)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Metin GÜNEŞ (T.Ü)

Tarih : 08.07.2013

ÖNSÖZ

Reaktif güç tüketen elemanların artması ile birlikte bu tür güçlerin kompanze edilmesi önemli bir konu haline gelmiştir. Reaktif güç kompanzasyonu için en uygun olanı, reaktif gücün şebekeden taşınmadan yüke en yakın noktadan kompanze edilmesidir,

Bu çalışmada güç faktörü, güç faktörüne etki eden etkenler uygulamalı olarak incelenmiş ve ideal bir kompanzasyon tesisi kurulumunda nelere dikkat edilmesi gerektiği uygulamalı olarak analiz edilmiştir.

Tez çalışmam süresince yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Hüseyin ERİŞTİ hocama teşekkür ederim.

Uğur ERDEM
TUNCELİ-2013

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	IX
KISALTMALAR	X
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XI
1. GİRİŞ	1
2. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONUNUN TANIMI	3
2.1. Güç Kompanzasyonu Nedir	3
2.2. Kompanzasyon Gerektiren Yükler	3
2.3. Reaktif Güç Üreteçleri	4
2.3.1. Dinamik Faz Kaydırıcılar	4
2.3.2. Kondansatörler	5
2.4. Kondansatörler ve Kondansatör Gücünün Hesaplanması	5
2.4.1. P Aktif Gücünün Sabit Olması Durumu	6
2.4.2. S Görünür Gücünün Sabit Olması Durumu	6
3. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONUNUN FAYDALARI	8
3.1. Şebeke Açısından Faydaları	8
3.1.1. Güç Taşıma Yeteneğinin Arttırılması	8
3.1.2. Isı Kaybının Azaltılması.....	9

Sayfa

3.1.3.	Gerilim Düşümünün Azaltılması	9
3.2.	Tüketici Açısından Faydaları	10
4.	REAKTİF GÜÇ İHTİYACININ TESPİTİ.....	11
4.1.	Yük Karakteristiğinin Bilinmesi	11
4.1.1.	Endüstriyel Kuruluşlar	11
4.1.2.	Meskenler	11
4.1.3.	Ticarethaneler	11
4.1.4.	Resmi Daireler	11
4.1.5.	Sokak Aydınlatması	12
4.2.	k Faktör Cetveli ile Kompanzasayon Hesabı	12
4.3.	Proje Aşamasında Yeni Kurulacak Tesislerde Kompanzasyon Hesabı	13
4.4.	İşletmedeki Tesislerde Kompanzasyon Hesabı	14
5.	ENERJİ KALİTESİ VE HARMONİKLER	17
5.1.	Giriş	17
5.2.	Harmonik Kavramı	17
5.3.	Harmonik Kavramı ile İlgili Büyüklükler.....	19
5.3.1.	Harmonik Sayısı.....	21
5.3.2.	Tek ve Çift Harmonikler	21
5.3.3.	Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)	21
5.3.4.	Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)	22
5.3.5.	Şekil (Form) Faktörü	22
5.3.6.	Tepe (Crest) Faktörü	22
5.3.7.	Distorsiyon Güç Faktörü	22

Sayfa

5.4.	Harmoniklerin Enerji Sistemine Etkileri	23
5.4.1.	Harmoniklerin İletkenler Üzerindeki Etkisi	24
5.4.2.	Harmoniklerin Endüktans ve Kapasitans Üzerindeki Etkisi	25
5.4.3.	Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkisi	26
5.4.4.	Harmoniklerin Motorlar ve Generatörler Üzerindeki Etkisi	27
5.4.5.	Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkisi	28
5.4.6.	Harmoniklerin Güç Faktörü Üzerindeki Etkisi	29
5.4.7.	Harmoniklerin Röleler Üzerindeki Etkisi	30
5.4.8.	Harmoniklerin Ölçü Aletleri Üzerindeki Etkisi	31
5.5.	Harmoniklerin Matematiksel Analizi ve Toplam Harmonik Bozulma (THD) ...	32
6.	SİNÜSODİAL OLMAYAN DURUMLARDA GÜÇ KOMPANZASYONU.....	34
6.1.	Harmonikli Şebekelerde Kondansatör Gücünün Tayini.....	34
6.2.	Harmonikli Şebekelerde Güç ve Güç Faktörü	37
6.3.	Harmoniklerin Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemlerine Etkileri	38
6.4.	Sistemde Harmoniklerin Engellenmesi	39
7.	OPTİMAL REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU UYGULAMASI	43
7.1.	Sistemin Matematiksel Olarak Tasarımı ve Kondansatör Gücünün Tayini	43
7.2.	Reaktif Güç Kompanzasyonu Uygulaması	49
7.3.	Harmonik Eliminasyon Amaçlı Pasif Filtre Tasarımı	52
7.4.	Harmoniklerin Güç Faktörüne Etkisinin Analiz Edilmesi	56
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
	KAYNAKLAR	61
	ÖZGEÇMİŞ	65

ÖZET

Bu çalışmada; alternatif akım güç sistemlerinde iletilebilir gücü arttırmak ve kayıpları azaltmak için, optimal bir güç kompanzasyonu uygulaması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Tasarım işleminde güç katsayısını yükseltmek için aktif filtreler nazaran daha ekonomik bir özelliğe sahip pasif filtreleme güç kompanzasyonu sistemine eklenilmiştir. Uygulama işlemleri bir endüstriyel tesiste bulunan büyük güçlü motorlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kompanzasyonsuz, kompanzasyonlu ve harmonik filtreli kompanzasyon olmak üzere üç farklı uygulama aşaması ile sisteme ait optimal kompanzasyon tasarım işlemleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen en uygun kompanzasyon tasarım işlemlerinden elde edilen sonuçlara göre, harmonik filtreli güç kompanzasyonunun hem tüketici hem de dağıtım şirketleri açısından oldukça önemli üstünlüklere sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Harmonik, Pasif filtre, Kompanzasyon, Güç faktörü.

SUMMARY

Optimal Reactive Power Compensation and The Effect of Harmonics Power Factor

In this study, the investigations on an optimal power compensation application are made to increase transmissible power and to reduce losses in alternating current power systems. In the design process, a passive filter power compensation which is much economical compared to the active filters is added to the system. The application processes have been made on the big powerful engines in an industrial installation. The optimal compensation design processes of the system are carried out by using three different applications steps: with compensation, without compensation and with harmonic filter compensation. According to the results obtained from the optimal compensation design processes, it is observed that the harmonic filter power compensation has considerable advantages to either the consumers or the electric distribution companies.

Key Words: Harmonics, Passive filter, Compensation, Power factor.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Görünür gücün azaltılması	6
Şekil 2.2. Aktif gücün arttırılması.....	7
Şekil 2.3. Besleme hattı gösterimi	7
Şekil 3.1. Güç katsayısının gerilim düşümü üzerine etkisi	10
Şekil 5.1. Görünür gücün bileşenleri arasındaki ilişki	20
Şekil 5.2. Nötr hattının 3.harmonik bileşenlerle yüklenmesi.....	25
Şekil 5.3. Bir kondansatör elamanının a) Sinüsoidal beslemeli hali b) Nonsinüsoidal beslemeli hali	26
Şekil 5.4. θ° faz farklı akım ve gerilim dalga şekilleri	29
Şekil 5.5. Sinüsoidal gerilim ve kare dalga akım.şekilleri	30
Şekil 6.1. Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamak	41
Şekil 7.1. Kompanzasyon öncesi yükün güç akışı	43
Şekil 7.2. Uygulamada kullanılan su tahliye motoru	44
Şekil 7.3. Uygulamada kullanılan HIOKİ marka enerji analizörü	44
Şekil 7.4. Kompanze edilmemiş yükün şebekeden çektiği reaktif güç, Q (VAR).....	45
Şekil 7.5. Kompanze edilmemiş yükün şebekeden çektiği görünür güç, S (VA).....	46
Şekil 7.6. Kompanze edilmemiş yükün güç faktörü GF.....	46
Şekil 7.7. Yükün 12,5 kVAR'lık kondansatör ile kompanze edilmesi	49
Şekil 7.8. Görünür güçte yüzde değişim miktarı.....	50
Şekil 7.9. Sistemin kompanzasyon panosu.....	51
Şekil 7.10. Pasif filtre prensip şeması	52
Şekil 7.11. Harmonik filtre reaktörü	53

Sayfa No

Şekil 7.12. Kompanze edilmiş sisteme ait gerilim harmoniklerinin genlikleri.....	54
Şekil 7.13. Harmonik filtre reaktörünün kompanzasyon sistemine bağlantısı	56
Şekil 7.14. Harmonik akımlarının % 14 seviyelerinde olması durumuna ait THDi grafiği	57
Şekil 7.15. THDi değerinin % 14 olması durumunda güç faktörü PF değeri	58
Şekil 7.16. THDi değerinin % 4 seviyelerinde olması durumunda PF güç faktörü	59

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. k faktörü cetveli	13
Tablo 5.1. Darbeli bir konverterin döner makine üzerindeki harmonik etkinliği	27
Tablo 6.1. Aktif ve pasif filtrelerin karşılaştırılması	40
Tablo 7.1. Kondansatör gücünün tayini k faktörünün bulunması.....	48

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
VAR	: Volt Amper Reaktif
kVAR	: Kilovolt Amper Reaktif
VA	: Volt Amper
Hz	: Hertz
HD	: Tekil Harmonik Distorsiyonu
TTD	: Toplam Talep Distorsiyonu
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyonu
GF_{toplama}	: Toplam Güç Faktörü
GF_{dist}	: Distorsiyon Güç Faktörü
$\text{Cos}(\phi_1 - \delta_1)$: Kayma Güç Faktörü
HVDC	: Yüksek Gerilim Enerji İletim Sistemleri
MMK	: Manyeto Motor Kuvvet
DPF	: Faz Kayması Faktörü
PF	: Nonsinüsoidal durumda güç faktörü

SEMBOLLER LİSTESİ

A_p	: Aktif enerji sarfiyatı
A_q	: Reaktif enerji sarfiyatı
$\cos \phi$: Güç faktörü
c_p	: Sayaç sabitesi (dönme sayısı / kWh)
D	: Distorsiyon gücü
GF	: Güç faktörü
i	: Ani akım değeri
i_e	: Efektif akım değeri
i_m	: Maksimum akım değeri
I_n	: Bir kondansatörün n. harmonik için akım değeri
K_m	: Makinenin yapısı ile ilgili sabit
n	: Harmonik sayısı
np	: Aktif sayaç dönme sayısı (d/d)
nq	: Reaktif sayaç dönme sayısı (d/d)
Q	: Reaktif güç
Q_c	: Kondansatör gücü
Q_{cn}	: Kondansatörün harmonikli gücü
Q_s	: Sistemin kondansatör grubunun bağlı bulunduğu noktadaki kısa devre gücü
Q_T	: Nominal olarak, Q reaktif gücündeki bir kondansatöre uygulanan bir harmonikli gerilim durumunda reaktif güç
P	: Aktif güç

P_K	: Kondansatörün aktif güç kaybı
P_{Fe}	: Demir kayıpları
P_H	: Ek kayıplar
R_1	: İletkenin sinüzoidal akımdaki temel omik direnç değeri
R_H	: İletkenin sinüzoidal akımdaki harmonikli omik direnç değeri
R_n	: n. harmonik frekansındaki iletim sistemi omik direnci
S	: Görünür güç
U_C	: Kondansatör uçlarındaki sinüzoidal olmayan gerilimin efektif değeri
V	: Ani gerilim değeri
V_e	: Efektif gerilim değeri
V_m	: Maksimum gerilim değeri
ω_1	: Temel bileşenin frekansı
ω_n	: n. harmoniğin açısal frekansı
X_C	: Temel harmonikteki kapasitif reaktans değeri
X_{Cn}	: n. harmonikteki kapasitif reaktans değeri
β_n	: n. harmonik için tanımlanan gerilim harmoniği oranı ifadesi

1. GİRİŞ

Günümüz teknoloji ve sanayi alanlarında gerçekleşen ilerlemeler, tüm dünya ülkelerini global ölçekte, yeryüzü ve yer altı kaynaklarını en verimli biçimde kullanılmasının yollarını araştırmaya itmektedir. Böylelikle tüm insanlığın en zorunlu ihtiyaçlarından birisi haline gelen elektrik ve elektrik enerjisi bu alandaki önemi ile ilk sıraya oturmaktadır. Üretilen enerjinin ekonomik olması için santralden en küçük alıcıya kadar olan dağıtım hattında en az kayıpla taşınmasının hesapları yapılmaktadır. Elektrik enerjisi üretim, iletim ve dağıtım sistemleri oldukça büyük yatırım maliyetleri gerektirmektedir. Yapılan yatırımlardan en ekonomik biçimde yararlanılabilmesi için kaynakların akılcı kullanılması gerekmektedir.

Enerji sistemlerinde aktif enerjinin yanı sıra, reaktif enerji de üretilir ve iletilir. Oysa enerji iletim hatlarından akan reaktif akım, hatlarda görülen akımın artmasına ve kayıpların büyümesine neden olmaktadır. Dünyada, elektrik enerjisine olan ihtiyacın sürekli olarak artması, enerji üretiminin ekonomik olmaması taşınan enerjinin ucuz ve aktif enerji olmasını zorunlu hale getirmektedir. Şebekeye bağlı olan alıcı, örneğin motor, lamba veya transformatör ise bunlar manyetik alanlarının temini için bağlı buldukları şebekeden aktif akımın yanı sıra bir de reaktif akım çekerler. İşte, elektrik santrallerinde üretilen enerji, aktif ve reaktif akım adı altında en küçük alıcıya kadar birlikte aktarılmakta, iş yapmayan motorda manyetik alan elde etmeye yarayan reaktif akım, havai hatta, transformatörlerde, şalterler ve nakil hatları ile kablolarda gereksiz kayıplar meydana getirmektedir. Dolayısıyla bu kayıplar yok edilebilirse, transformatör daha fazla alıcıyı daha yüksek verimlilikle besleyecek, ölçme ve koruma elemanları olması gerekenden daha büyük güçlere göre seçilmeyecek ve tesiste kullanılmakta olan kablo kesitlerinde azalma olacaktır (Vural, 2003). Böylelikle, daha az yatırım ve iştirakle, fabrikalara ve/veya işletmelere enerji verme imkânı elde edilebilecektir. Bu bağlamda üzerinde önemle durulması gereken konu, reaktif enerjinin santral yerine, yüke en yakın yerden reaktif güç üreteçleri kullanılarak karşılanmasıdır, yükün şebekeden çekmiş olduğu reaktif enerjinin tüketici tarafında kompanze edilmesidir.

Reaktif güç kompanzasyonu, reaktif akım, kurulan reaktif güç kompanzasyon sistemi aracılığı ile karşılanacağı için, şebekeden daha düşük değerde akım çekilecektir. Bunun sonucu olarak da transformatörler ve hatlar daha az yüklenecektir. Ayrıca aşırı yüklenmeler önlenmiş olacaktır. Aşırı yüklenme durumu yoksa tesisin yüklenme kapasitesi artmış olacaktır (Ersamut, 2009).

Bununla birlikte doğrusal olmayan yüklerin kullanımının artması ile birlikte tüketiciler şebekeden harmonik akımda çekmektedirler. Buda şebekede düşük güç kalitesi gibi sorunlara yol açmaktadır (Huang ve Wu, 1999; Sing vd., 1999). Burdan anlaşılmaktadır ki enerjinin verimli biçimde kullanılması için sistem kompanze edilirken şebeke harmoniklerinin de elimine edilmesi gerekmektedir.

Günümüzde reaktif güç kompanzasyonu genellikle merkezi olarak yapılmaktadır. Burada, reaktif güç kontrol rölesi adı verilen cihazla, tesise paralel bağlı kondansatörler ihtiyaca göre devreye alınıp çıkarılır. Böylece tesisin güç katsayısının istenen değerde kalmasına çalışılır (Arifoğlu, 2002). Reaktif güç kompanzasyon rölesi mikroişlemci tabanlı olup, temel olarak 3 ana ünitelerden oluşmaktadır, bu üniteler ise, ölçme, karşılaştırma ve değerlendirme, anahtarlama ünitesi olarak verilmektedir. Reaktif güç kontrol rölesi kompanzasyon işlemini yerine getirmek için şebeke akım ve geriliminden örnek alır. Bu örneklere harmonik analizi yapılarak, temel bileşen üzerinden sistemin aktif, reaktif, görünür güçleri ve güç faktörü hesaplanır (Sheble, 1987).

Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinde güç katsayısının yükseltilmesi için ideal bir kompanzasyon sisteminin tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla harmoniklerin güç kompanzasyonuna ve güç faktörü üzerine etkileri incelenmiştir. Daha sonra harmonik eliminasyonu için etkili ve ekonomik bir yöntem olan pasif filtreleme yöntemi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, harmonik filtreleme işlemi ile hem optimal bir güç kompanzasyonu tasarımı elde edilmiş hemde harmoniklerin güç sistemine olan olumsuz etkilerinin ortadan kaldırıldığı gözlemlenmiştir.

2. REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYONUNUN TANIMI

2.1. Güç Kompanzasyonu Nedir

Günümüzde, artan elektrik ihtiyacını karşılamak için yeni kaynaklar oluşturmanın yanında var olanları da efektif ve verimli bir biçimde kullanmak gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmenin en önemli yol ve yöntemlerinden birisi de reaktif güç kompanzasyonu yapmaktır (Bayram, 2000). Böylece enerjide verimlilik artacaktır. Reaktif güç kompanzasyonu ile jeneratörlerin, transformatörlerin ve hatların kapasitesi artmakta ve hat kayıpları ile gerilim düşümleri azalmaktadır. Elektrik enerjisinin ne kadar verimli kullanıldığıнын bir ölçütü güç faktörüdür. Güç faktörü ne kadar büyükse elektrik enerjisi de o kadar verimli kullanılıyor demektir (Şekkeli, 2006).

Bu anlamda, güç katsayısının yükseltilmesi için kompanzasyon tesisi yapılıp, şebekenin kalitesi ve daha verimli kullanılması yoluna gidilmektedir. Sistemlerin normal olarak şebekeden çektikleri endüktif reaktif gücün, özel bir reaktif güç üreticisi tarafından dengelenerek güç faktörünün ($\cos\phi$) 1'e yaklaştırılması olayına "reaktif güç kompanzasyonu" olarak ifade edilmektedir (Miller, 1982).

2.2. Kompanzasyon Gerektiren Yükler

Her ne kadar reaktif güç faydalı güce çevrilemez ise de bundan tamamen de vazgeçilemez zira: elektrodinamik prensibe göre çalışan generatör, transformatör, bobin ve motor gibi bütün işletme araçlarının normal çalışmaları için gerekli olan magnetik alan, reaktif akım tarafından meydana getirilir. Bilindiği gibi endüksiyon prensibine göre çalışan bütün makineler ve cihazlar, magnetik alanın meydana getirilmesi için bir mıknatıslanma akımı çekerler; iste bu mıknatıslanma akımı reaktif akımdır. Onun için faydalı aktif gücün yanında, mutlaka reaktif güce de ihtiyaç vardır. Bu sebeple bütün alternatif akım tesisleri, aktif gücün yanında reaktif gücünde çekileceği göz önünde bulundurularak boyutlandırılırlar (Bayram, 1977).

Elektrik tesislerinde kullanılan ve magnetik veya statik alan ile çalışan bütün işletme araçları girerler; bunlar aktif güç yanında reaktif güç de çekerler. En önemlileri şunlardır,

- Transformatörler,
- Bobinler,
- Havai ve yeraltı hatları,
- Motorlar,
- Redresörler,
- Endüstri fırınları, ark fırınları,
- Kaynak makineleri,
- Flüoresan lamba, sodyum ve civa buharlı lamba ile neon lamba transformatörleri.

2.3. Reaktif Güç Üreteçleri

Reaktif güç ihtiyacını karşılayabilmek için reaktif gücün bir yerde üretilmesi gerekir, bunun için en eski ve klasik yol, aktif güç gibi reaktif gücün de senkron generatör tarafından üretilmesidir. Reaktif güç üretimi, aktif güç gibi, santralde su kuvveti, kömür ve benzeri ham enerji maddesinin sarfını gerektirmez, sadece generatör uyarmasının artırılması ile generatör endüktif güç verecek duruma getirilir. Böylelikle, santralde üretilen güç, generatör, transformatör ve enerji nakil hatlarından geçerek tüketiciye ulaşır. Bu durumda, elektrik tesisleri reaktif güç tarafından gereksiz yere işgal edileceklerinden, aktif güç bakımından kapasitelerinden tam olarak faydalanmak ve ekonomik bir işletme sağlamak amacıyla reaktif gücün santralde değil de tüketim merkezlerinde üretilmesi en uygun ve ekonomik yol olmaktadır (Vural, 2003). Reaktif güç üretimi için iki işletme aracından faydalanılabilmektedir. Bunlar aşağıda verilmiştir;

- Dinamik faz kaydırıcılar
- Kondansatörler

2.3.1. Dinamik Faz Kaydırıcılar

Reaktif güç üretiminde kullanılan dinamik faz kaydırıcılarının başında aşırı uyarılmış senkron makineler gelmektedir. Genellikle santrallerden gelen enerji nakil hatlarının sonunda ve tüketim merkezlerinin başında şebekeye bir senkron makine paralel olarak bağlanarak, reaktif güç ihtiyacı bu makine ile sağlanmış olur (Bayram, 2000). Bu makine, şebekeden boşta çalışma kayıplarını karşılayabilecek kadar küçük bir reaktif güç çekmekte ve şebekeye istenilen reaktif gücü vererek reaktif güç üretici olarak çalışmaktadır. Dolayısıyla bu makinenin ayrıca bir tahrik elemanına gereksinimi yoktur. Senkron faz

kaydırıcıların kayıpları, kondansatörlere göre daha yüksek olduğu gibi bunların sürekli olarak bir bakıma ihtiyacı bulunmaktadır. Ayrıca, bu makinelerin güçleri, çok büyük olduğu takdirde ekonomik olarak yapılması ve temini mümkün olmamaktadır. Bundan başka, bu gibi üreticiler bir tüketim merkezinin yakınına yerleştirildiğinden sadece generatörler ve yüksek gerilim enerji nakil hatları ile buna ait bir veya iki kademeli orta gerilim şebekeleri ile alçak gerilimli dağıtım şebekesi reaktif güç nakletmek zorunda kalırlar. Bu nedenle, dinamik faz kaydırıcılar günümüzde ancak özel hallerde ve ekonomik şartların gerçekleştirildiği yerlerde kullanılmaktadır.

2.3.2. Kondansatörler

Reaktif güç üretiminde faz kaydırıcı adı verilen kondansatörlerin üstünlükleri oldukça fazladır. Örneğin, kondansatörlerin kayıpları çok düşük olup, % 0,5'in altındadır. Bakım masrafları yok denecek kadar azdır. Ayrıca, kondansatörler ile istenilene her güçte reaktif güç kaynağı teşkil edilebildiği gibi bunları tüketicilerin yanlarına bağlamak ve böylelikle orta ve alçak gerilim şebekelerini de reaktif güç çekmekten kurtarmış olur. Bu nedenle, kondansatörler kompanzasyon için en uygun araçtır (Vural,2003).

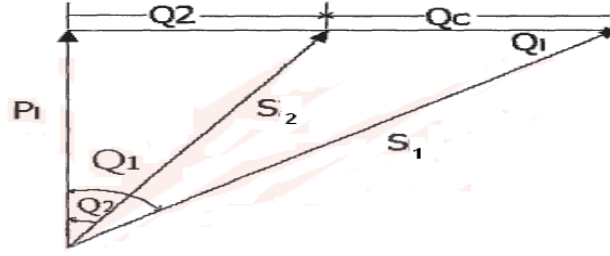
Kuvvetli akım tesislerinde, kondansatörler gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Kondansatörlerin beher kVAR başına maliyetleri, orta büyüklükteki senkron kompanzatorlerinkinden daha düşük olması da önemlidir. Tüketici ihtiyacına göre kolaylıkla güç ayarı yapılabilmektedir. İşletme emniyetleri de oldukça büyük olmakla birlikte servis süreleri de yüksektir. Herhangi bir arıza anında zarar gören eleman kısa sürede teşhis edilerek, düşük maliyetlerle yenisi ile değiştirilmesi gibi olanaklar da sunmaktadır (Vural, 2003).

2.4. Kondansatörler ve Kondansatör Gücünün Hesaplanması

Bir tüketicinin veya bir tesisin reaktif güç ihtiyacının tespit edilmesi için şebekeden çekilen S_1 gücün (görünür güç), buna ait $\cos\phi_1$ ile yeni güç faktörü $\cos\phi_2$ değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Güç katsayısı $\cos\phi_1$ değerini, $\cos\phi_2$ güç katsayısı değerine çıkartmak için gerekli olan reaktif gücü veya kondansatör gücünü tayin etmek için iki yöntem bulunmaktadır.

2.4.1. P Aktif Gücünün Sabit Olması Durumu

Bu durumda şebekeden çekilen görünür güç, S_2 gibi daha küçük bir değer düşer. görünür gücün azaltılması Şekil 2.1' de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Görünür gücün azaltılması

kompanzasyondan önceki reaktif güç,

$$Q_1 = P_1 \cdot \tan \phi_1 \quad (2.1)$$

kompanzasyondan sonraki reaktif güç,

$$Q_2 = P_1 \cdot \tan \phi_2 \quad (2.2)$$

olduğuna göre gerekli kondansatör gücü denk.(2.3)' de verildiği gibi elde edilebilir.

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P_1 \cdot (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (2.3)$$

$\tan \phi_1 - \tan \phi_2 = k$ gibi bir katsayıya eşitlenirse,

$$Q_c = k \cdot P_1 \quad (2.4)$$

olarak elde edilebilmektedir (Vural, 2003).

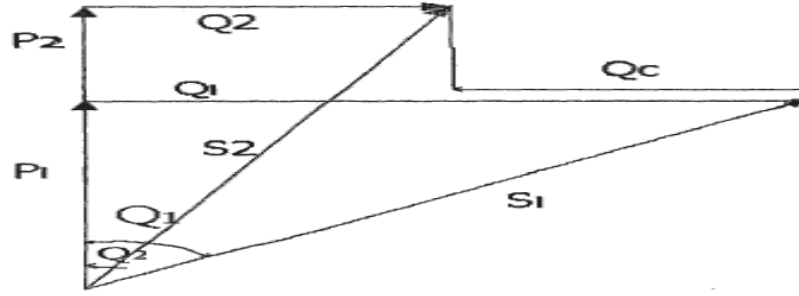
2.4.2. S Görünür Gücünün Sabit Olması Durumu

Bu durumda şebekeden çekilen aktif güç P_2 gibi daha yüksek bir değer alır. Kompanzasyondan önceki reaktif güç denk.(2.5) 'de ifade edilmektedir.

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\phi_1 \quad (2.5)$$

Bu durumda kompanzasyondan sonraki reaktif güç denk.(2.6)'da ifade edilmektedir. Sistemin vektör diyagramı Şekil 2.2' de görüldüğü gibi aktif güç (P) arttırılmış görünür güç (S) aynı kalmıştır.

$$Q_2 = S_1 \cdot \sin\phi_2 \quad (2.6)$$



Şekil 2.2. Aktif gücün arttırılması

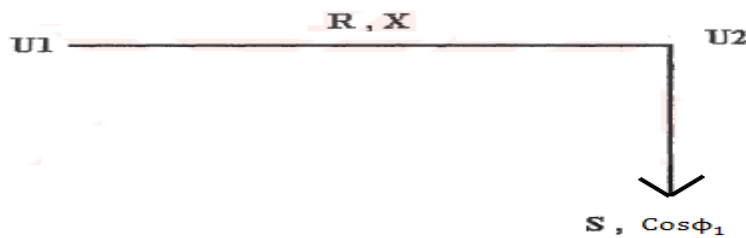
Şekil 2.2 'de verilmiş olan eşitliklerden yararlanılarak kondansatör gücü denk.(2.7) 'de verildiği gibi elde edilmektedir (Vural, 2003).

$$Q_c = Q_2 - Q_1 = S_1 (\sin\phi_2 - \sin\phi_1) \quad (2.7)$$

Bu durumda aktif güçteki artma miktarı ise denk.(2.8) 'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$P_2 - P_1 = S_1 (\cos\phi_2 - \cos\phi_1) \quad (2.8)$$

Güç katsayısının düzeltilmesinin hem şebeke hem de tüketici açısından yararları bulunmaktadır. Bu durumu ifade eden bir besleme hattı Şekil 2.3 'de gösterilmiştir. Bu besleme hattında, R ohmik direnci (Ω), X reaktif direnci (Ω), U_1 ve U_2 hattın başındaki ve sonundaki faz gerilimlerini (Volt) , S hattın sonunda çekilen gücü ifade etmektedir (VA).



Şekil 2.3. Besleme hattı gösterimi

3. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONUNUN FAYDALARI

3.1. Şebeke Açısından Faydaları

Güç katsayısını düzeltilmesi ile tüm üretim, iletim ve dağıtım tesislerinde, önemli derecede rahatlama meydana gelmektedir. Bu durum aşağıda verildiği gibi özetlenebilir.

3.1.1. Güç Taşıma Yeteneğinin Arttırılması

Bu durum aşağıda verildiği gibi örneklenebilir. Hat sonundan çekilen P aktif gücü sabit olsun, kompanzasyondan önce çekilen görünür güç ve kompanzasyondan sonra sistemden çekilen görünür güç şu şekilde olmaktadır:

$S_1 = \frac{P}{\cos\phi_1}$ ve $S_2 = \frac{P}{\cos\phi_2}$ her iki değer arasındaki fark ise denk.(3.1)' deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (3.1)$$

Başlangıçtaki değeri oranı alınarak denk.(3.2) 'de verildiği gibi yüzde değişim elde edilmektedir.

$$\% \Delta S = \frac{\Delta S}{S_1} \cdot 100 = 100 \cdot \left(1 - \frac{\cos\phi_1}{\cos\phi_2} \right) \quad (3.2)$$

Bu durumda, tesisin yükü $\% \Delta S$ oranında azalmaktadır. Böylece tesisi aşırı yüklemeyen $\% \Delta S$ oranında yeni bir tüketicinin beslemesi sağlanmış olunur. Ancak görünür güç sabit tutulursa, şebekeden çekilen aktif güç denk.(3.3)' de verildiği gibi elde edilebilmektedir

$$P_1 = S \cdot \cos\phi_1 \quad (3.3a)$$

$$P_2 = S \cdot \cos\phi_2 \quad (3.3b)$$

aşırı yüklenmeden sonra çekilen aktif yükün,

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (3.4)$$

$$\% \Delta P = \frac{\Delta P}{P_1} \cdot 100 = 100 \cdot (\frac{\cos \Phi_2}{\cos \Phi_1} - 1) \quad (3.5)$$

oranında yükselmesine karşılık gelmektedir.

Örneğin, $\cos \Phi_1 = 0.7$ değerinden, $\cos \Phi_2 = 0.9$ değerine çıkarılması için şebekenin güç taşıma yeteneğindeki artış miktarı $\% \Delta P = 28.5$ değerini almaktadır (Vural, 2003).

3.1.2. Isı Kaybının Azaltılması

Hat üzerinden çekilen aktif gücün sabit olduğu kabul edilirse, kompanzasyonsuz durumda faz başına düşen ısı kaybı aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$P_{z1} = \frac{R \cdot P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \Phi_1} \quad (3.6)$$

Bu durumda kompanzasyondan sonraki faz başına düşen ısı kaybı,

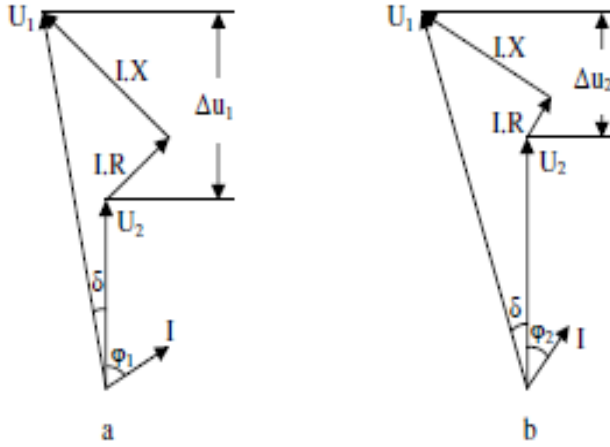
$$P_{z2} = \frac{R \cdot P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \Phi_2} \quad (3.7)$$

Güç katsayısının düzeltilmesi ile bağıl ısı kaybı cinsinden elde edilen denk.(3.8) 'de verildiği gibi elde edilmektedir (Vural, 2003).

$$\% Z = 100 \cdot (\frac{P_{z1}}{P_{z1}} - \frac{P_{z2}}{\cos^2 \Phi_2}) = 100 \cdot (1 - \frac{\cos^2 \Phi_1}{\cos^2 \Phi_2}) \quad (3.8)$$

3.1.3. Gerilim Düşümünün Azaltılması

Enerji dağıtım sistemlerinde gerilim kontrolü, öncelikle generatör ve trafoların kademelerini ayarlayarak yapılmalıdır. Bu ayarlar yetersiz kalırsa güç faktörünün iyileştirilmesi yoluna gidilmelidir. Bu amaçla, kompanzasyonda kullanılan kondansatörlerin gerilimi yükseltici etkisinden faydalanılabilir (Güler, 1995). Bilindiği gibi endüktif bir direnç üzerinden kapasitif bir akım geçerse çıkış gerilimi, giriş geriliminden daha yüksek olur. Güç katsayısının gerilim düşümü üzerindeki etkisinin fazör diyagramları ile gösterilmesi istenirse, Sekil 3.1'deki diyagramlar kullanılabilir (Bayram, 2000). Burada kondansatör kullanımının gerilimi yükselttiği açıkça görülmektedir.



Şekil 3.1. Güç katsayısının gerilim düşümü üzerindeki etkisi

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

3.2. Tüketici Açısından Faydaları

Tüketiciler, kendi tesislerini kuraralarken güç faktörünü düzeltecek önlemler alırlarsa veya mevcut tesisin güç faktörünü düzeltirlerse aşağıda verilmiş olan faydaları sağlamış olurlar;

- Gereksiz yere yapılması muhtemel yatırım maliyetlerinden kurtulurlar,
- Kompanzasyon sistemine sahip işletmenin, işletme maliyeti düşer,
- Sistemdeki kayıp miktarlarında düşüş elde edilir,
- Tüketicinin enerji kalitesi dolayısıyla işletme verimliliği ve üretim kalitesi artar,
- Reaktif enerji ücreti ödenmemiş olunur.

4. REAKTİF GÜÇ İHTİYACININ TESPİTİ

4.1. Yük Karakteristiğinin Bilinmesi

Güç faktörü düzeltmede başlangıç noktası, yük karakteristiğinin tam olarak belirlenmesidir. İşe, güç sistemi yönünden bakıldığında sistemin en fazla zorlandığı yükteki güç faktörünün bilinmesi yeterlidir. Ülkemizde müşteri gruplarının puant yükteki güç faktörleri üzerinde yapılmış çalışmalar çok eksiktir. Eldeki bilgiler genellikle dağıtım panolarındaki cos ϕ metrelerden okunan bilgileri içermektedir. Yapılan araştırma ve ölçümlerde her müşteri grubu için güç faktörü değerleri ortalama olarak bulunmuştur.

4.1.1. Endüstriyel Kuruluşlar

Endüstriyel kuruluşların güç faktörlerinin 0.6 – 0.9 arasında değiştiği, alt sınırın, kaynak makineleri veya küçük elektrik motorları kullanan ve aydınlatmanın floresan lambalarla yapıldığı kuruluşlarda, üst sınırın ise büyük güçte motor kullanan, aydınlatmanın da civa buharlı lambalarla yapıldığı kuruluşlarda kullanıldığı gözlenmiştir.

4.1.2. Meskenler

Yapılan ölçmelerde güç faktörünün yaşam standartları ile doğrudan ilgili olduğu gözlenmiştir. Ülkemizde meskenlerde elektrik enerjisini genellikle aydınlatma (akkor veya floresan lamba) ve biraz da ısıtma için kullanıldığı düşünülürse bunun sebebi ortaya çıkmaktadır.

4.1.3. Ticarethaneler

Ticaretanelerin yükleri aydınlatma ve küçük elektrik motorlarından oluşmaktadır. alışveriş merkezlerinin güç faktörleri 0.8 – 0.7, büroların ise 0.88 olarak ölçülmüştür.

4.1.4. Resmi Daireler

Resmi dairelerde ana yükü aydınlatma oluşturmakta, dolayısıyla güç faktörü aydınlatmanın türüne bağlı olarak değişmektedir.

yalnız floresan lamba kullanılan dairelerde güç faktörü 0.5'e kadar düşebilmekte ve fleanlı lambaların kullanılmasıyla artmaktadır.

4.1.5. Sokak Aydınlatması

Sokak aydınlatmasında güç faktörünü kullanılan lamba tipi belirlemektedir. Enkandesan lambaların kullanıldığı durumlarda güç faktörü 0.97' ye ulaşmaktadır. Örneğin; Ankara – Samsun otoyolundaki cıva buharlı lambalarla yapılan aydınlatmada güç faktörü 0.86 olarak belirlenmiştir.

4.2. k Faktör Cetveli ile Kompanzasayon Hesabı

Bir tüketici tesiste kompanzasyon gücünü tespit edebilmek için bu tesisin sanal, aktif ve reaktif güçlerinden herhangi ikisinin veya bunlardan biri ile güç katsayısının bilinmesi gerekmektedir. Aktif gücün sabit olduğu durumlarda, kompanzasyon hesabı aşağıda verildiği gibi yapılmaktadır.

Öncelikle kompanzasyondan önceki reaktif güç denk.(4.1)'deki formül ile hesaplanmaktadır (URL-1, 2013).

$$Q_1 = P_1 * \tan \phi_1 \quad (4.1)$$

daha sonra ise, kompanzasyondan sonraki reaktif güç hesaplanmaktadır.

$$Q_2 = P_1 * \tan \phi_2 \quad (4.2)$$

Buna göre kondansatör gücü için, $Q_c = Q_1 - Q_2 = P_1 (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$ elde edilir. Burada $\tan \phi_1$ ve $\tan \phi_2$ için $\tan \phi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \phi}}{\cos \phi}$ eşitliği yazılabilir. Bu eşitlikten yararlanarak $\cos \phi_1$ ve $\cos \phi_2$ den yararlanılarak $\tan \phi$ değeri hesaplanır.

Eğer denklemde açılarının tan'larının farkı $\tan \phi_1 - \tan \phi_2 = k$, gibi bir katsayı ile gösterilirse, yukarıdaki eşitlik için $Q_1 = k * P_1$ ifadesi yazılabilmektedir. Eşitlikte k katsayısının pratik hesaplamalarda kullanılabilmesi için Tablo 4.1'de verilen tablo kullanılabilir.

Tablo 4.1. k faktörü cetveli (URL-1, 2013).

	Cosp2	0.70	0.75	0.80	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.90	0.92	0.94	0.95	0.96	0.97
	tanφ2	(1.02)	(0.88)	(0.75)	(0.70)	(0.64)	(0.62)	(0.59)	(0.57)	(0.53)	(0.48)	(0.43)	(0.36)	(0.33)	(0.29)	(0.25)
Cosφ1	tanφ1															
0.45	1.98	0.96	1.10	1.23	0.28	1.34	1.36	1.39	1.41	1.45	1.50	1.55	1.62	1.65	1.69	1.73
0.50	1.73	0.71	0.85	0.98	1.03	1.09	1.11	1.14	1.16	1.20	1.25	1.30	1.37	1.40	1.44	1.48
0.52	1.64	0.62	0.76	0.89	0.94	1.00	1.02	1.05	1.07	1.11	1.16	1.21	1.28	1.31	1.35	1.39
0.54	1.56	0.54	0.68	0.81	0.86	0.92	0.94	0.97	0.99	1.03	1.08	1.13	1.20	1.23	1.27	1.31
0.56	1.48	0.46	0.60	0.73	0.78	0.84	0.86	0.89	0.91	0.95	1.00	1.05	1.12	1.15	1.19	1.23
0.58	1.41	0.39	0.53	0.66	0.71	0.77	0.79	0.82	0.84	0.88	0.93	0.98	1.05	1.08	1.12	1.16
0.60	1.33	0.33	0.45	0.58	0.63	0.69	0.71	0.74	0.76	0.80	0.85	0.90	0.97	1.00	1.04	1.08
0.62	1.27	0.25	0.39	0.52	0.57	0.63	0.65	0.68	0.70	0.74	0.79	0.84	0.91	0.94	0.98	1.02
0.64	1.20	0.18	0.32	0.45	0.50	0.56	0.58	0.61	0.63	0.67	0.72	0.77	0.84	0.87	0.91	0.95
0.66	1.14	0.12	0.26	0.39	0.44	0.50	0.52	0.55	0.57	0.61	0.66	0.71	0.78	0.81	0.85	0.89
0.68	1.08	0.06	0.20	0.33	0.38	0.44	0.46	0.49	0.51	0.55	0.60	0.65	0.72	0.75	0.79	0.83
0.70	1.02		0.14	0.32	0.32	0.38	0.40	0.43	0.45	0.49	0.54	0.59	0.66	0.69	0.73	0.77
0.72	0.96		0.08	0.27	0.26	0.32	0.34	0.37	0.39	0.43	0.48	0.53	0.60	0.63	0.67	0.71
0.74	0.91		0.03	0.21	0.21	0.27	0.29	0.32	0.34	0.38	0.43	0.48	0.55	0.58	0.62	0.66

4.3. Proje Aşamasında Yeni Kurulacak Tesislerde Kompanzasyon Hesabı

Eğer hesaplama yapılacak tesis proje aşamasında ve herhangi bir ölçü değeri bulunmuyorsa teorik hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılmaktadır. Örnek olarak tesisin 500 kW kurulu gücü olduğunun dışında başka bir bilgi yoktur. Talep gücü, eşzamanlılık katsayısı 0,60 alınarak $P = 500 \text{ kW} * 0,60 = 300 \text{ kW}$ bulunur. Güç katsayısı 0,7 den 0,97 ye çıkarılacağından;

Yöntem 1:

$S_1 = P / \cos\phi_1 = 300 \text{ kW} / 0.7 = 429 \text{ kVA}$ olarak hesaplanmaktadır. Reaktif güç ise $Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P^2} = 307 \text{ kVAR}$ olarak elde edilir.

Benzer biçimde, $S_2 = P / \cos\phi_2 = 300 \text{ kW} / 0.97 = 310 \text{ kVA}$ olarak bulunur. Bu durumda reaktif güç ise $Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P^2} = 78 \text{ kVAR}$ olarak elde edilir. Sistemin ihtiyacı olan kondansatör gücü ise,

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = 229 \text{ kVAR}$$

olarak bulunur.

Yöntem 2:

Bu yöntemde, k katsayısı cetvelinden yararlanılarak, beher kW için 0,7 ile 0,97 hanelerinden k = 0,77 olarak bulunur. Dolayısıyla buradan, $Q_c = 300 \cdot 0.77 = 231 \text{ kVAR}$ olarak hesaplanır ve bu sonuçların yukarıda hesaplanan değerlere uyduğu görülmüş olunur.

4.4. İşletmedeki Tesislerde Kompanzasyon Hesabı

Eğer hesaplama yapılacak tesis işletmede ve çeşitli ölçü aletleri mevcut ise teorik hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

- a) Bir ampermetre ve bir voltmeter yardımı ile hat akımı ve hat gerilimi ölçülerek tesisin sanal gücü hesaplanır. Aktif ve reaktif gücün hesaplanması için güç katsayısına da gerek vardır. Tesisin $\cos\phi$ ' sini ölçmek için tesise $\cos\phi$ metre bağlanabilir.

Akımın 125 A ve gerilimin 380 V, $\cos\phi_1$ in 0,82 olarak ölçüldüğünü varsayalım. Güç katsayısının 0,96 olmasını isteyelim. Bu durumda S_1 aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

$$S_1 = \sqrt{3} * U_n * I_n = \sqrt{3} * 380 * 125 = 82 \text{ kVA} \quad (4.3)$$

Dolayısıyla P_1 ve reaktif güç Q_1 aşağıda verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$P_1 = S_1 * \cos\phi_1 = 82 * 0.82 = 67.24 \text{ kW} \quad (4.4a)$$

$$Q_1 = S_1 * \sin\phi_1 = 82 * 0.57 = 46.74 \text{ kVAR} \quad (4.4b)$$

Benzer biçimde, P_2 ve reaktif güç Q_2 aşağıda verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$P_2 = S_1 * \cos\phi_2 = 82 * 0.96 = 78.72 \text{ kW} \quad (4.5a)$$

$$Q_2 = S_1 * \sin\phi_2 = 82 * 0.28 = 22.96 \text{ kVAR} \quad (4.5b)$$

Hesaplamlarda, $\sin\phi_2$ cetvelden $\cos\phi_2$ karşıtı olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla buradan, tesise gereken kondansatör gücü, $Q_c = Q_1 - Q_2 = 46,74 - 22,96 = 24$ kVAR olarak elde edilmektedir (URL-1, 2013).

Hesaplamlarda, k katsayısından gidersek, 0,82 ve 0,96' ya denk düşen k katsayısı cetvelden 0,40 olarak bulunur. $Q_c = 67,24$ kW * 0,40 = 27 kVAR bulunur, dolayısıyla yukarıda hesaplanan değerlere uyduğu gözükmektedir.

- b) Tesiste aktif ve reaktif güç ölçümü için iki yazıcı vatmetre bulunabilir ve bu halde aktif ve reaktif vatmetrelerin gösterdikleri ortalama P ve Q değerleri okunur.

İstenirse buradan, $\tan\phi_1 = Q / P$ ve $\cos\phi_1 = 1 / \sqrt{1 + \tan^2\phi_1}$ değerleri hesaplanabilir. Ya da trigonometrik cetvelden birbirlerine denk düşen değerleri alınabilir. İstenilen güç katsayısı $\cos\phi_2$ değerinden cetvel yardımı ile veya $\tan\phi = \sqrt{1 - \cos^2\phi} / \cos\phi$ formülünden hesap yolu ile $\tan\phi_2$ elde edilir. Okunan P ve Q ortalama değerlerine göre kondansatör gücü $Q_c = Q - P * \tan\phi_2$ ifadesinden yararlanılarak hesaplanabilmektedir.

- c) Tesiste toplam akımı ölçen ampermetre ile bir voltmetre ve birde aktif güç sayacı varsa, ölçülen akım ve gerilim değerleri ile sanal güç S_1 hesaplanır. Sonra bir süre ölçer yardımı ile sayaç üzerinde bir dakikada diskin np dönme sayısı sayılmaktadır.

Sayaç üzerindeki sabite c_p (dönme sayısı / kWh) okunduktan sonra aktif güç $P = n_p * 60 / c_p$ (kWh) eşitliği ile verilmektedir.

P yardımı ile $P = S * \cos\phi_1$ ifadesinden $\cos\phi_1$ bulunur. Ardından, kondansatör gücü denkleminde yerine yazılarak Q_c hesaplanmaktadır. $Q_c = Q_1 - Q_2 = P_1 * (\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$.

- d) Eğer tesiste bir aktif ve bir de reaktif güç sayacı varsa, bir süreölçer yardımı ile bir dakikada diskin dönme sayısı olarak aktif sayaç üzerinde n_p (d/d) ve reaktif sayaç üzerinde n_q (d/d) okunur.

Ayrıca aktif sayaç üzerindeki sabite c_p (d/kWh), reaktif sayaç üzerindeki sabite c_q (d/kWh) ise aktif ve reaktif güçler aşağıda verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$P = n_p * 60 / c_p \text{ (kWh)} \quad (4.6a)$$

$$Q = nq * 60 / c_q \text{ (kVAR)} \quad (4.6b)$$

daha sonra ise kondansatör gücü $Q_c = Q - P * \tan\phi_2$ ifadesinden hesaplanmaktadır.

- e) Aktif ve reaktif güç sayaçları bulunan bir tesiste elektrik faturasına göre de kondansatör gücü tayini yapılabilmektedir.

Eğer belirli bir işletme t_i (h) süresi içinde aktif enerji sarfiyatı A_p (kWh) ve reaktif enerji sarfiyatı A_q (kvarh) ise $Q_c = Q - P * \tan\phi_2$ denklemine benzer şekilde,

$$Q_c = (A_q \text{ (kvarh)} - A_p \text{ (kWh)} * \tan\phi_2) / t_i \text{ (h)} \quad (4.7)$$

İfadesi ile kondansatör gücü hesaplanmaktadır.

Örnek:

Aktif enerji sarfiyatı $A_p = 29100$ kWh, reaktif enerji sarfiyatı $A_q = 41250$ kvarh, istenilen güç katsayısı $\cos\phi_2 = 0,96$, fatura kapsamı bir ay (bir ayda 22 iş günü ve günde 8 saat çalışma) ise kondansatör gücünü hesaplayalım.

İşletme süresi;

$t_i = 22$ gün * 8 saat = 176 saat olarak elde edilir. Bu durumda kondansatör gücü aşağıda verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$Q_c = (A_q \text{ (kvarh)} - A_p \text{ (kWh)} * \tan \phi_2) / t_i \text{ (h)} = (41250 - 29100 * 0,29) / 176 = 186 \text{ kVAR}$$

olarak hesaplanmaktadır (URL-1, 2013).

5. ENERJİ KALİTESİ VE HARMONİKLER

5.1. Giriş

Kullanıcılar ve üreticiler açısından oldukça önemli olan "enerji kalitesi" kavramı, endüstride yaygın olarak özellikle 1980'lerin ikinci yarısından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. "Enerji kalitesi", referans alınan noktaya bağlı olarak değişik tanımlamalara sahip olabilir. IEEE 1100 standardına göre enerji kalitesi, kullanılan ekipmanlara uygun olarak hassas cihazların topraklanması ve enerjilendirilmesi kavramı olarak tarif edilmektedir (Sankaran, 2002). Başka bir ifade ile de "enerji kalitesi", bir ekipmanın kullanım amacına uygun olarak davranışından ve servis ömründen herhangi bir kayba uğramadan çalışması için öngörülen elektriksel sınırlamalar veya kısıtlamalar olarak açıklanmaktadır (Dugan, 2002). Daha genel bir tanımlama ile elektrik tesislerinde enerji kalitesi, enerjinin sürekliliği, gerilim ve frekansın sabitliği, güç faktörünün bire yakınlığı, faz gerilimlerinin dengeli olması ve gerilimdeki harmonik miktarlarının belirli değerlerde kalması gibi bir takım kriterlerden oluşmaktadır (Kocatepe vd., 2003).

5.2. Harmonik Kavramı

Elektrik enerjisini üreten, ileten ve dağıtan kuruluşların amacı, kesintisiz, ekonomik ve kaliteli bir hizmeti tüketicilerine sunmaktır. Elektrik enerji sistemlerinde kalite söz konusu olunca, sabit şebeke frekansında; sabit ve sinüsoidal biçimli uç geriliminin sağlanması anlaşılmaktadır. Ancak bu tür enerji pratikte bir takım zorluklarla sağlanabilir. Güç sistemine bağlanan bazı elemanlar ve bunların yol açtığı olaylar sebebiyle tam sinüsoidal dalga şeklinden sapmalar olabilmektedir (Kakilli vd., 2008). Elektrik santrallerinde alternatörler tarafından üretilen gerilim tam sinüsoidale yakın olmasına karşılık, doğrusal olmayan karakteristik gösteren yüklerin artması ile birlikte, şebekeden çekilen akım dalga şekillerinde bozulmalar meydana gelmektedir. Şebekeden çekilen düzensiz akım şebeke empedansından dolayı şebeke üzerinde gerilim düşümüne, dolayısıyla akım ve gerilim dalga şekillerinde de bozulmalara neden olmaktadır (Arrillaga ve Watson, 2003; Mack ve Santaso, 2001). Akım ve gerilim dalga şekillerini bozan bu etkenlere harmonik denmektedir (Demirbaş ve Bayhan, 2009). Harmonikler, şebeke frekansının tam katları frekanslara sahip sinüsoidal akım ve gerilimlerdir (Türker vd., 2005).

Başka bir yaklaşımla, enerji dağıtım sistemlerinde sinüs formundaki bir gerilim kaynağı yarı iletken bir teknolojiye sahip bir sisteme uygulanırsa (DC veya AC sürücü, UPS vb), sistemin vereceği akım cevabı kare dalga şeklinde olacaktır. Sinüs formunda ve sistem empedansı oranında genliğe sahip olması gereken bu akım dalga şeklinin kare dalga olmasının nedeni içerdiği temel şebeke frekansı dışındaki diğer sinüs formundaki akımlardır (Bilki, 2008). Yapı itibari ile elektronik sistemlerde meydana gelen harmonik oluşumları en basit olarak temel frekansın veya sistemde üretilmekte olan frekans bileşenlerinin tam katları olan sinüsoidal gerilim ve akım bileşenleridir. Bu bileşenler genel olarak sistemde ana gerilim ve yük akımı dalga şekillerinde bozulma meydana getirmektedirler. Bunun yanı sıra, temel frekansın tam katları olmayan sinusoidal gerilim ve akım bileşenlerinden oluşan harmonik oluşumları da ortaya çıkmaktadır, bunlara ara harmonikler denir ve zamanla elektronik sistem ve cihazlar açısından çözülmesi gereken önemli bir sorun oluşturmadan giderilmesi gerekmektedir.

Güç sistemlerindeki harmoniklerin büyüklüğü 1920'li yılların başlarında yalnızca trafolar, motorlar ve doğrultucular ile sınırlı olmasına karşın, gelişen teknolojiye paralel olarak, endüstride kullanılan güç elektroniği elemanlarının artmasıyla harmoniklerin büyüklüğünde de bir artış gözlemlenmiştir. Modern ve hassas yüklerin üretim süreçlerinde kullanılmasıyla, harmonikler daha ciddi bir problem ve bu alanda çalışmaların yoğunlaştığı önemli bir konu başlığı haline gelmiştir (Boyrazoğlu vd., 2007). Bilindiği üzere, güç sistemlerinde meydana gelen harmonik oluşumları elektronik yapı ve devrelerin yanlış çalışmasına veya hiç çalışmamasına, trafo ve motorların aşırı ısınmasına, iletişim hatlarında parazitlere, ölçümlerin yanlış yapılmasına, elektrik aygıtlarının ömürlerinin azalmasına, alıcıların ve sistemlerin güç kayıplarının artmasına sebep olmaktadır (Chi-Jui ve Wei-Nan, 1997; Lin, 2006). Ayrıca harmonikler, güç faktörünün düzeltilmesi için endüstriyel tesislerde yapılan kompanzasyon ünitelerinde rezonans olayı sonucu ciddi problemlere neden olmaktadır (Didem, 2005; Sucu, 2003).

Geçmişte birçok ülke bölgesel çözüm olarak kendilerine has harmonik standartlarını oluşturmakla beraber, dünyadaki küreselleşme süreci ile birlikte üretilen cihazların farklı ülkelerde kullanılması, harmonik ve ara harmoniklerde uluslararası standartizasyonu beraberinde getirmiştir (Arrilaga, J. ve Watson, N.R, 2003). Harmonik değerlerinin nasıl ölçüleceği ve hangi aralıklarda ölçüleceği konusunda IEC 61000-4-7/CLASS B standardı ve IEEE 519-1995 standardı referans alınmaktadır.

Harmoniklerin yok edilmesinde iki yöntem bulunmaktadır. Bunlardan ilki, harmonik üreten elemanların üretimi sırasında yapısının harmonik üretmeyecek veya çok az üretecek şekilde tasarlanması veya şebekeye bağlantılarının uygun şekilde yapılması, diğeri ise harmoniklerin üretildikten sonra yok edilmesidir (Filiz, 2006). Bu yöntemde harmoniklerin filtrelenmesi olarak adlandırılmaktadır (Kocatepe, 1994). Harmoniklerin tespit edilerek yok edilmesi veya elimine edilmesinin öncesinde sistemde meydana gelen harmoniklerin hangi noktalardan ne kadar süre ile ölçüleceği önem arz etmektedir (Demirbaş ve Bayhan, 2009). Elektrik iletim ve dağıtım sistemlerindeki harmoniklerin ölçülmesinde ölçüm noktası olarak, trafo merkezleri kullanılmaktadır (Buhan vd., 2007; Salor vd., 2008; Demirci vd., 2008). Bu merkezlerde yapılan ölçümler iletim ve dağıtım sisteminde meydana gelen toplam harmonikleri ölçmektedir. Böyle bir sistem toplam harmonik değerlerinin belirlenmesinde ve buna uygun filtrelerin tasarımında kullanılabilir.

Trafo merkezlerinden gerçekleştirilen ölçüm yöntemleri ve harmonik önleme yöntemleri yüksek maliyet gerektirmektedir. Bunun yerine harmoniklere neden olan doğrusal olmayan yüklerle en yakın noktadan ölçümler alınarak, harmoniklerin azaltılması tercih edilmektedir (Batista vd., 2003; Costa vd., 2005 ; Moreno vd., 2000).

5.3. Harmonik Kavramı ile İlgili Büyüklükler

Genel olarak elektronik sistemler açısından bakıldığında, sinüzoidal akım ve gerilimin gücün t süresine bağlı olarak t süresi için eşitlikleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$v(t) = V \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

$$i(t) = I \sin(\omega t \pm \phi) \quad (5.2)$$

$$s(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (5.3)$$

Eşitliklerde, $\omega = 2\pi f$ olarak periyodik dalga şeklinin açısal hızını, V - gerilimin tepe değerini, I - akımın tepe değerini, f - temel frekansı ve ϕ , orjine göre akım ve gerilim dalga şekilleri arasındaki faz açısı farkını göstermektedir (Yılmaz, 2006).

Akımın açı olarak gerilimin önünde olması durumunda pozitif, tersi durumda ise negatif değerdedir.

$$\text{Reaktif güç} : Q(t) = v(t) \cdot i(t) \cdot \sin\emptyset \quad (5.4)$$

$$\text{Aktif güç} : P(t) = v(t) \cdot i(t) \cdot \cos\emptyset \quad (5.5)$$

Görünür gücün yaygın bir şekilde kabul edilen tanımı denk.(5.6)'da verilmiştir.

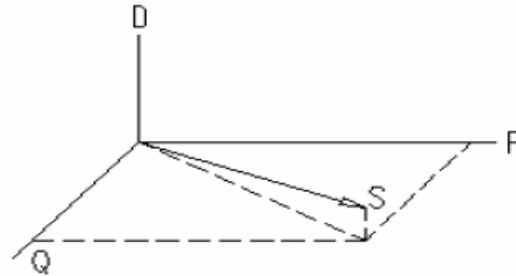
$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (5.6)$$

Burada D-distorsiyon gücü olup

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (5.7)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Distorsiyon gücü aktif olmayan bir güç olup sinüsoidal işaretli doğrusal devrelerde sıfırdır.

Araştırmacılar ve bilimadamları arasında distorsiyon gücü ve reaktif gücün fiziksel anlamlarında ve tanımlamalarında hala bir birliktelik söz konusu değildir. Şekil 5.1 'de bu büyüklükler arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Yılmaz, 2006).



Şekil 5.1. Görünür gücün bileşenleri arasındaki ilişki

Aktif gücün tamamı faydalı işte kullanılır, az bir kısmı kayıplardır. Oysa reaktif güç, elektromanyetik cihazlarda manyetik alanı oluşturur ve yararlı işle bağlantılı değildir. Gereksiz yere hattı yükler ve gerilim düşümlerine ve kayıplara yol açar. Bu nedenle şebekeden çekilen reaktif gücün sıfır olması istenir. İşte güç faktörü yükün etkin gücü ne kadar etkin kullandığının bir ölçütüdür harmonikli veya harmoniksiz tüm şebekelerde,

$$GF = \frac{P}{S} = \cos\emptyset \quad (5.8)$$

Güç faktörü boyutsuzur ve idealde, $GF = 1$ olmalıdır.

5.3.1. Harmonik Sayısı

Harmonik sayısı (n), karmaşık dalga şekline sahip tekil frekansı ifade etmektedir. Örneğin n =5, frekansı temel frekansın 5 katına eşdeğer harmonik bileşeni ifade etmektedir. Temel frekansın f = 50 Hz olması durumunda 5. harmonik 5 x 50 = 250 Hz'e karşılık gelecektir. Harmonik sayılarının kullanılması harmoniklerin daha basit ifade edilebilmeleri içindir. Bir diğer sebep de harmonik içeren matematiksel işlemlerin basite indirgenmesi olarak açıklanabilir (Yılmaz, 2006).

5.3.2. Tek ve Çift Harmonikler

İsmlendirmeden de anlaşılacağı üzere tek harmonikler 3,5,7,9,11,... ve çift harmonikler de 2,4,6,8,... olarak uzayıp giden harmonik sayılarını ifade eder. 1 nolu harmonik periyodik dalga şeklinin temel frekanstaki bileşeni olup 0 nolu harmonik ise sabiti ya da dalga şeklinin doğru akım (DC) bileşenini tanımlar (Makram vd., 1992). Bu DC bileşen özellikle transformatörlerde doyum üzerinde ciddi ve arzu edilmeyen sonuçlara sebebiyet verebilmektedir. Genellikle oluşan harmonikler tek harmoniklerden ileri gelmektedir (Sankaran, 2002).

5.3.3. Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)

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

$$THD_v = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} / V_1 \quad THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} / I_1 \quad (5.9)$$

ifadelerinden yararlanılarak bulunmaktadır. Görüldüğü gibi THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu değer, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin, tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını tespit için kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga şekli için THD sıfırdır.

Benzer şekilde n. harmonik mertebesindeki gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonları sırasıyla,

$$HD_v = \frac{V_n}{V_1} \quad HD_i = \frac{I_n}{I_1} \quad (5.10)$$

5.3.4. Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)

Toplam talep distorsiyonu, bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu olarak denk.(5.11)'de ifade edilmektedir.

$$TTD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} / I_1 \quad (5.11)$$

Burada I_1 yük tarafından, besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır. On iki ay öncesinden başlanarak hesaplamanın yapılacağı ana kadar olan süre zarfında yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır.

5.3.5. Şekil (Form) Faktörü

Nonsinüsoidal bir dalga için şekil faktörü,

$k_f = \text{Efektif Değer} / \text{Ortalama Değer}$

olarak tanımlanır. Bozulmuş sinüsoidal bir dalganın bozulma ölçütünü verir.

5.3.6. Tepe (Crest) Faktörü

Bu faktör, nonsinüsoidal akım ve gerilimin tepe değeri ile temel bileşenin efektif değeri arasında tanımlanır. Harmonik bileşenlerin en basit bir biçimde ortaya konmasını sağlayan bu faktör, *Tepe faktörü = Tepe değer / Temel bileşenin efektif değeri*, eşitliği ile hesaplanır. Sinüsoidal bir dalga için bu değer, $\sqrt{2}$ 'dir.

5.3.7. Distorsiyon Güç Faktörü

Gerilim ve akım, harmonikler içerdiğinden efektif değerleri aşağıda verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_v}{100}\right)^2} \quad I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2} \quad (5.12)$$

aynı biçimde toplam güç faktörü, gerilim ve akımın toplam harmonik distorsiyonları değerleriyle,

$$GF_{toplama} = \frac{P}{V_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \quad (5.13)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu eşitlik aynı zamanda,

$$GF_{toplama} = \cos(\phi_1 - \delta_1) \cdot GF_{dist} \quad (5.14)$$

ile de verilir. $\cos(\phi_1 - \delta_1)$ kayma güç faktörü ve GF_{dist} distorsiyon güç faktörüdür.

Kayma güç faktörü 1 'den büyük olamayacağından her zaman,

$$GF_{toplama} \leq GF_{dist} \quad (5.15)$$

olacaktır. Görüldüğü gibi, yüksek akım distorsiyonlu tek faz doğrusal olmayan yükler için, toplam güç faktörü daha da düşmektedir. Rezonansa neden olma ihtimalinden dolayı bu gibi yükler için güç faktörü düzeltici kondansatörler gereklidir. Distorsiyon güç faktörünü iyileştirmenin bir başka yolu ise, doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonikleri yok etmek için pasif ve aktif filtreler kullanmaktır (Kocatepe vd., 2003).

5.4. Harmoniklerin Enerji Sistemine Etkileri

Enerji sistemlerinde ortaya çıkan harmonik oluşumları, ana gerilimde ve yük akım dalga şekillerinde en büyük bozulmayı oluşturan faktörler olarak öne çıkmaktadır. Temel frekansın katlarında ortaya çıkmasının yanı sıra, tam katları olmayan sinüsoidal akım ve gerilimlerden meydana gelen ara harmonikler de gün geçtikçe önem kazanmaktadır (Kakilli vd., 2008). Sistemde arıza olana kadar ki durumda harmoniklerin etkisinin bilinmemesi, harmoniklerin en sinsi özelliği olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla arızaların önlenmesi için harmoniklerin güç sistemi içerisinde nasıl davranış gösterdikleri ve güç sistem elemanları üzerine nasıl etki ettiklerinin iyi kavranabilmesi gerekmektedir (Sankaran, 2002). Harmonik kaynaklarının tanımlaması temellerinden yola çıkılarak, bunların etkilerinin sistem üzerinde olduğu kadar sistemin birer bileşeni olan diğer ekipman ve elbette insan üzerindeki etkileri de problemlerin çözüm yolunun bulunmasında belirleyici unsurlar olacaktır (Arrilaga, J. ve Watson, N. R, 2003). İzin

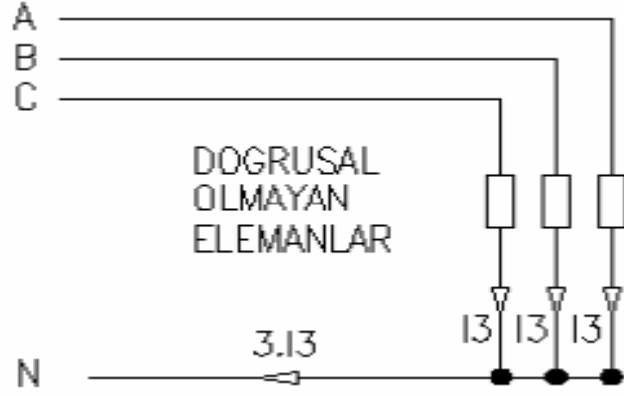
verilen ve tavsiye edilen değerler temel alınarak her bir elamanın harmoniklere karşı hassasiyeti etüt edilmelidir. Güç sistemlerinde harmoniklerin en önemli etkileri aşığıda verilmiştir.

- Rezonans oluşur ve kompanzasyon tesisatı zarar görür,
- Besleme řalterleri rezonans olayları ile belirsiz zamanda açma yaparak iřletmeyi durdurur,
- Elektronik cihazlar olumsuz etkilenir,
- Motorlar ve kablolarının kayıpları artar ve aşırı ısınmalara neden olur,
- Yalıtımı zayıflatarak tesis elemanlarının ömürlerini kısaltır,
- Nötr kablosu yüklenir ve ısınır,
- Kondansatörlerin ve ilgili teçhizatlarının ömürleri kısalır,
- Ölçüm cihazları hatalı ölçüm yaparlar,
- CNC tezgâhlarının elektronik kartları arızalanır,
- Sıfır noktasına bağlı çalışan kumanda devreleri yanlış çalışır,
- Kayıplar artar (Bilki, 2008).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad \bullet \quad D: \text{Harmonik Bozulmama Gücü}$$

5.4.1. Harmoniklerin İletkenler Üzerindeki Etkisi

Harmonik akımlar iletkenlerde kayıpların artmasına dolayısıyla da ısınmanın artmasına neden olurlar. Harmonik akımlar iletkenlerde iki temel etki sonucunda ek ısınma meydana getirirler. Birincisi literatürde “skin effect” olarak bilinen deri etkisidir. Harmonik frekansının artmasına bağlı olarak akımın, iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşması sonucu etkin direncin artması ile meydana gelen ek artış olmaktadır (Yılmaz, 2006). İkinci etki ise tek fazlı yükleri besleyen 3 - fazlı 4 telli sistemlerin nötr iletkenlerinin büyük akımlarla yüklenmesi ile karşımıza çıkar. Bazı doğrusal olmayan elemanlar büyük değerde 3 ve 3 ün katları harmonik bileşenleri üretirler. Temel frekanstaki dengeli 3 - fazlı akımların toplamı sıfır olduğundan nötr iletkeninden akım geçmemesine neden olurlar. Ancak 3 fazlı sistemlerde 3.mertebeden harmonikler nötr iletkeninde birbirini zayıflatmaz, tam tersine güçlendirirler. Harmonik mertebesi n için fazlar arasında n. 120° lik faz farkı olduğundan 3 ve 3' ün katı harmoniklerin herbiri 360° derecelik faz farkına yani birbirine eklenmesine neden olmaktadır (Yılmaz, 2006).



Şekil 5.2. Nötr hattının 3. harmonik bileşenlerle yüklenmesi

Şekil 5.2’de sadece 3. harmonik bileşenlerin nötr’de toplanması ile bu hattın aşırı yüklemesi gösterilmiştir. Bu nedenle nötr akımının değeri faz akımının değerinin 1.7 katına kadar çıkabilir. Nötr iletkenleri faz iletkenleri ile aynı kesitte olsa bile bu durumda nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Bu sorun en çok, 3 fazlı dağıtım sisteminin tek fazlı büyük yükleri beslediği ticari binalarda rastlanmaktadır. Bu soruna karşı en yaygın önlem, nötr iletkenini faz iletkeninin iki katı büyüklüğünde kesitlerde yapmaktır (Kocatepe vd., 2003).

5.4.2. Harmoniklerin Endüktans ve Kapasitans Üzerindeki Etkisi

Elektrik şebekelerinin ve elemanlarının (hatların, motorların, generatörlerin, transformatörlerin v.b.) modellenmesinde reaktanslar oldukça geniş bir yer tutmaktadır. Temel bileşendeki değeri X_L olan bir endüktif reaktans, n. harmonikte,

$$X_{L_n} = n.X_L \quad (5.16)$$

değerini almaktadır. Benzer şekilde, temel harmonikteki değeri X_C olan bir kapasitif reaktans n. Harmonikte,

$$X_{C_n} = \frac{X_C}{n} \quad (5.17)$$

değerini alır. Her iki durum için de, reaktansın doğrusal bir eleman olduğu kabul edilmektedir (Yılmaz, 2006).

5.4.3. Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkisi

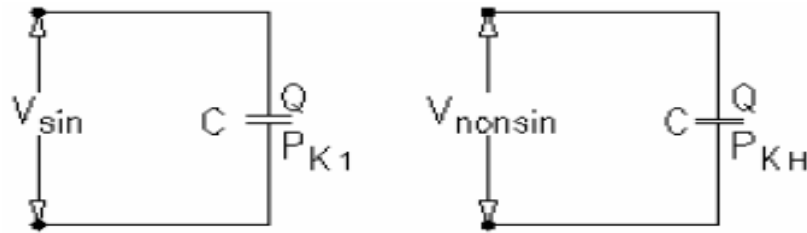
Güç katsayısının düzeltilmesi için kullanılan kondansatörlerin kendileri harmonik üretmezler ancak sistemdeki harmonik seviyesi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bir kondansatör grubunun reaktansı, artan frekans ile birlikte azalmaktadır. Bir kondansatörün n. harmonik için akım değeri,

$$I_n = 2\pi \cdot f_n \cdot C \cdot V = n \cdot \omega_1 \cdot C \cdot V_n \quad (5.18)$$

ile belirlenmektedir. Eşitlikte de görüldüğü gibi herhangi bir harmoniğin, akımdaki oranı gerilimdeki oranından büyük olmaktadır. Harmonik bileşenler, kondansatörlerin ve bobinlerin birlikte kullanıldığı sistemlerde rezonansa sebep olabilirler (Yılmaz, 2006). Q_s sistemin kondansatör grubunun bağlı bulunduğu noktadaki kısa devre gücünü, Q_c ise kondansatörlerin toplam gücünü göstermek üzere, bir alçak gerilim güç sisteminin rezonans frekansına ait harmonik mertebesi denk.(5.19)'daki bağıntı ile verilmektedir.

$$n = \sqrt{\frac{Q_s}{Q_c}} \quad (5.19)$$

Bir kondansatördeki reaktif güç ve kayıp güç, uygulanan gerilime bağlı olarak değişmektedir. Şekil 5.3'de kondansatör elemanı eşdeğer devreleri verilmiştir (Yılmaz, 2006).



Şekil 5.3. Bir kondansatör elemanın a) Sinüsoidal beslemeli hali
b) Nonsinüsoidal beslemeli hali

Harmonikler kondansatörlerde hem aşırı reaktif yüklenmeye hem de dielektrik kayıplardaki artış sonucunda ısı artışına neden olurlar. Harmonikler, yol açtığı ısı artışı ve aşırı yüklenme sonucu, kondansatörlerin ömrünü kısaltır. Kondansatörlerin empedansı frekansla ters orantılı olduğu için kondansatörler yüksek dereceli harmonik akımlarını üzerlerine çekerler. Bu da kondansatörlerde ısınmaya ve aşırı yüklenmeye neden olurken

kondansatör ömrünü de azaltır (Anonymous, 1992). Ayrıca sistemdeki bobinlerle kondansatörlerin rezonansa girmesi halinde sistemdeki devre elemanlarının zarar görmesi kaçınılmazdır (Mutlu, 2011).

5.4.4. Harmoniklerin Motorlar ve Generatörler Üzerindeki Etkisi

Harmonik gerilim ve akımların en büyük etkisi, harmonik frekansındaki demir ve bakır kayıplarının artışı ile döner makinelerin ısısının artmasıdır. Harmonik bileşenler, bu yüzden döner makinelerin verimi ile momentinin düşmesine ve sinüsoidal beslemeli bir motorla karşılaştırıldığında daha gürültülü çalışmasına neden olurlar. Aynı zamanda harmoniklerin, endüksiyon motorlarındaki hava aralığında bir bileşke akı üretmesinden dolayı, motorun kalkış yapamaması ve senkronlanma sağlayamaması gibi durumlar da görülebilmektedir (Yılmaz, 2006). Elektrik makinelerinde rotorun aşırı ısınması, harmoniklerden kaynaklanan gerilim distorsiyonlarının neden olduğu başlıca sorunlardan biridir. Elektrik makinelerindeki kayıplar, uygulanan gerilimin frekansına bağlıdır. Harmonikler sebebi ile motor sıcaklığının artması motor ömrünü kısaltmakta, bu durumdan en fazla tek fazlı motorlar etkilenmektedir. Harmonik bileşenler, motor performansını % 5 ile % 10 arasında azaltmaktadır (Yılmaz, 2006).

Tablo 5.1. Darbeli bir konverterin döner makine üzerindeki harmonik etkinliği (Yılmaz, 2006).

Harmonik mertebesi	Frekans(Hz)	Faz dizi bileşeni	Stator harmoniği	Harmonik dönüş yönü	Rotor harmoniği
1	50	+	1	İleri	-
5	250	-	5	Geri	6
7	350	+	7	İleri	6
11	550	-	11	Geri	12
13	650	+	13	İleri	12
17	850	-	17	Geri	18
19	950	+	19	İleri	18
23	1150	-	23	Geri	24
25	1250	+	25	İleri	24

Tablo 5.1’de 6-darbeli bir çeviricinin oluşturduğu karakteristik harmonik mertebeleri ve döner bir makineye etkileri gösterilmiştir. Bu harmoniklerin her biri, toplam akımın pozitif ya da negatif dizi simetrik bileşenidir. Her bir harmonik gerilimi (5.,7.,11,...), makinenin statorunda bir harmonik akım endükleyecek ve stator sargılarında ilave ısı meydana

getireceklerdir. Böylece temel akım bileşeninin neden olduğu ısı seviyesine gelecek ilavelerle makinenin ısı yükselecektir.

Genellikle rotordaki harmonik akımlarının akışı daha da önemlidir. Statordaki her bir harmonik akım, makinenin rotorundan akım endükleyecek biçimde hava aralığında bir manyetomotor kuvvet (MMK) üretecektir. Her bir karakteristik harmonik, pozitif ya da negatif dizi bileşen olarak tanımlanırken, harmoniklerin dönüş yönüne göre ya ileri ya da geri olacaktır. 5.harmonik geri yönde (negatif dizi bileşeni) dönecektir, bundan dolayı temel hava aralığı frekansı ve 5.harmonik bileşeni arasındaki net dönme farkına karşılık gelen frekansla (5. harmonik frekansına 1 ilave edilerek yani 6. harmonik frekansıyla) rotorda bir harmonik akımı endüklenecektir (Yılmaz, 2006). 7. harmonik ileri yönde (pozitif dizi bileşeni) döndüğü için, temel hava aralığı frekansı ve 7. harmonik frekansı arasında net dönme frekansına karşılık gelen bir frekansla (7. harmonik frekansından 1 çıkarılarak yani 6. harmonik frekansıyla) rotorda bir harmonik akım endüklenecektir. Böylece rotor ısındığından, statordaki 5. ve 7. harmonikler, rotorda bir 6. harmonik akım bileşeni üretmek için birleşirler. 11. ve 13. harmonikler, rotorda 12. harmonik akımı üretmek için aynı biçimde etkili olurlar, daha yüksek mertebeden harmonikler için de aynı durum sözkonusu olacaktır (Kocatepe vd., 2003).

5.4.5. Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkisi

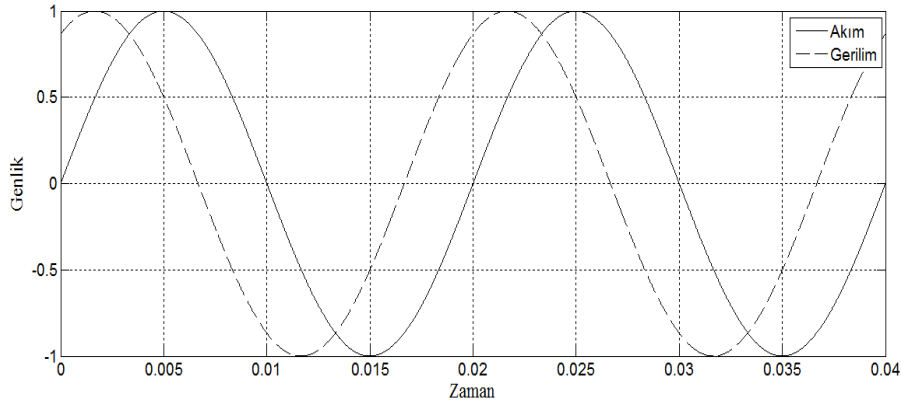
Trafoalarda harmoniklerin hem ısınmaya hem de sesli çalışmaya etkisi vardır. Akım harmonikleri bakır kayıplarını ve kaçak akı kayıplarını arttırırken gerilim harmonikleri ise demir kayıplarını arttırır (Anonymous, 1992). Trafolarda, sargılardan geçen akım ve ferromanyetik nüveden geçen akı, gerçek güç kaybına neden olurlar. Yüksek frekanslı olmaları nedeniyle harmonik akımları trafo sargılarındaki iletkenler dâhil olmak üzere geçtikleri tüm iletkenlerde ilave güç kayıplarına neden olurlar. Sargılardaki harmonik akımları trafo nüvesinde harmonik akı bileşenleri de oluştururlar ve bu da ilave histerezis ve eddy akım kayıplarına neden olur. Histerezis kayıpları manyetik akı frekansı ile doğru orantılı, eddy akımları ise frekansın karesi ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla, harmonik akımları trafo nüve kayıplarında belirgin bir artışa neden olurlar. Bu ilave kayıplar, trafoların aşırı ısınmasına ve elektriksel yalıtım hatasına neden olabilirler.

5.4.6. Harmoniklerin Güç Faktörü Üzerindeki Etkisi

Akımın gerilimi θ açısı ile izlediği görülen şekil 5.4'deki akım ve gerilim dalga şekillerini ele alalım. Devrenin görünür gücü gerilim büyüklüğünün etkin değeri ile akım büyüklüğünün etkin değerinin çarpılması ile elde edilir. Güç faktörü GF , gerçek gücün görünür güce bölünmesi ile elde edilir.

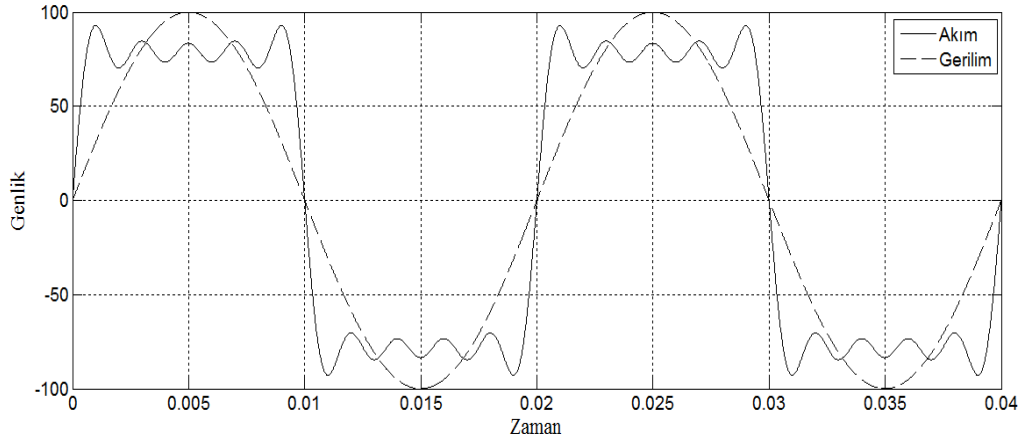
$$GF = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} = \cos \theta \quad (5.20)$$

Doğrusal yükler için, gerilimle akım arasındaki faz kaymasına bağlı olarak farklı gerçek güç ve görünür güç değerleri oluşur. Akım gerilimi 0° ile 90° arasındaki açılarla takip ediyor veya önde gidiyorsa güç faktörü her zaman pozitifdir ve 1'e eşit veya daha küçüktür.



Şekil 5.4. θ° faz farklı akım ve gerilim dalga şekilleri

Sinüsoidal akım yerine, Şekil 5.5'de gösterilen kare dalga akımı ve fazı, kare dalga şeklindeki, akımın temel harmoniği ile aynı fazda olan sinüs şeklindeki gerilimi ele alalım. Güç, her bir zaman aralığında akım ile gerilimin çarpılması sonucunda zamanın fonksiyonu olarak elde edilebilir (Mutlu, 2011).



Şekil 5.5. Sinüsoidal gerilim ve kare dalga akım şekilleri

Gerilim tek bir harmonikten oluştuğu için, güç denklemi, gerilimin akım bileşenleri ile tek tek çarpılması ile elde edilen bir seri şeklinde ifade edilir. Serinin ilk terimi, gerilim ve akımın temel bileşeninin frekansı aynı olduğu için, $\sin^2(\omega t)$ formunda olacaktır. Açıkça görülüyor ki bu terim her zaman pozitifdir ve yüke verilen gerçek gücü göstermektedir. Geriye kalan terimler gerilimin temel bileşeni ile akımın yüksek dereceli harmoniklerinin çarpılması ile oluşan terimlerdir. Farklı frekanslı iki sinüs sinyalinin çarpılması ile ortalama değeri sıfır olan başka bir sinüs dalga şekli elde edilir. Dolayısıyla, yüksek dereceli akım harmonikleri, eğer gerilim tek frekanslı ise, gerçek güç oluşturmazlar (Mutlu, 2011). Sonuç olarak gerçek güç faktörü,

$$GF = \frac{P}{v_{rms} I_{rms}} = \frac{P}{v_{rms} I_{rms} \sqrt{(1 + THDi^2)}} \quad (5.21)$$

şeklinde yazılır.

5.4.7. Harmoniklerin Röleler Üzerindeki Etkisi

Güç sistemlerinin korunmasında, koruma sisteminin temel elemanı veya "beyni" olarak kabul edilen "koruma röleleri" üzerinde nonsinüsoidal büyüklüklerin etkileri, literatürde teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu konu ile ilgili yayınlanmış bazı çalışmalar vardır fakat bunların yeterli olduğu söylenemez. Güç sisteminde dalga bozulması (harmonikli akım veya gerilimin bulunması) durumunda koruma elemanları ile ilgili ortaya çıkan sorunlar tam olarak tanımlanamamıştır. Bu yönde tüm koruma elemanları için kesin bir biçimde sonuçlar verebilecek yeterince çalışma yoktur. Bütün bunların yanında literatürde bulunan teorik çalışmalardan elde edilen sonuçlar çok kısa olarak şöyle

özetleyebiliriz, Akım ve gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler, harmonik distorsiyonundan etkilenmektedir. Akım ve gerilim dalga formlarının bozulması, rölelerin performansını etkilemektedir. Her bir röle harmoniklerin sistemde bulunması karşısında farklı davranış biçimleri göstermektedir. Aynı tip de rölelerin farklı modelleri bile aynı distorsiyona değişik biçimde cevap verdiği gibi, bu durum aynı modellerde bile söz konusu olabilmektedir. Harmonikler, rölelerin arıza koşullarında çalışmamasına ya da sistemin normal çalışma koşullarında gereksiz yere açma kumandası vermesine neden olabilir. Bununla birlikte, röleler üzerinde yapılan incelemelerde, harmonik distorsiyonun %10-20 seviyelerine kadar bir işletme problemi oluşturmadığını gözleyen çalışmalar vardır. Fakat farklı bir çalışmada indüksiyon diski aşırı akım rölesinin frekansı 3. harmonikten 9. harmoniğe kadar artırıldığında çalışma değeri artış göstermiştir (Yılmaz, 2006).

5.4.8. Harmoniklerin Ölçü Aletleri Üzerindeki Etkisi

Harmonik bileşenlerin (özellikle yüksek mertebeli harmonik akım ve gerilimleri sonucu) sistemi rezonansa sokması durumunda, ölçü aletlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Sayaç gibi endüksiyon disk aletleri, normalde sadece temel akım bileşenlerini ölçer. Bununla birlikte, harmonik distorsiyonun sebep olduğu faz dengesizliği, sayaçların hatalı işletimine neden olabilir. Çalışmalar bu hataların, sayaç türüne ve harmoniklerin durumuna bağlı olarak hem pozitif hem de negatif yönde hatalar olabileceğini göstermiştir. Endüksiyon diskli elektrik sayaçları en yaygın kullanılan enerji ölçen aletlerdir. Bu aletler frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlarından ötürü hatalı çalışmaktadır. Akım ve gerilimin her ikisinin de dalga şekli değişmiş olduğu bir testte, bu sayaçlar %20'lere varan hatalara sebep olmuşlardır. Etkin değer ölçümü için kalibre edilmiş olan voltmetre ve ampermetreler harmoniklerin var olması durumunda hatalı sonuçlar vermektedir. Örneğin, 45°'lik bir ateşleme açısıyla kıyılmış bir sinüs işaretinin etkin değerini, bu tip aletler %13 oranında düşük ölçmektedir. Eğer söz konusu alet ampermetre ise, aşırı yüklenmiş bir iletkenin fark edilmemesi gibi bir takım sakıncalı durumların ortaya çıkması söz konusu olabilir. Akım ve gerilimin elektronik olarak çarpıldığı modern wattmetreler, mükemmel bir performans göstermektedir. Yapılan testler sonucunda bu aletlerin sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerden kaynaklanan hatalarının %0,1'den daha az olduğu tespit edilmiştir (Kocatepe, 2003).

5.5. Harmoniklerin Matematiksel Analizi ve Toplam Harmonik Bozulma (THD)

Harmonikler fonksiyonun Fourier Analizi ile genlik ve frekansları farklı yani temel dalga frekansının tam katları olan sonsuz sayıda sinüsoidal dalganın toplamı şeklinde yazılabilir (İzmirlioğlu, 1990). Herhangi bir periyodik dalganın Fourier serisine açılabilmesi için Dirichlet koşulları olarak bilinen koşulların sağlanması gerekir. Elektrik enerji sistemlerindeki dalga şekilleri her zaman bu koşulları sağladığından Fourier bileşenlerinin elde edilmesi mümkündür (Eralp, 1985).

Standartlarda harmonik bozulmanın değeri için en çok kullanılan tanımlar: Toplam harmonik distorsiyonu (THD), tekil harmonik distorsiyonu (HD) ve toplam talep distorsiyonu (TTD)'dur. THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu büyüklük, harmonikleri içeren periyodik dalga formunun mükemmel bir sinüs dalga formundan sapmasını tespit etmek için kullanılır. Temel frekansta saf sinüs dalga formu için THD sıfırdır.

Elektrik devrelerinin temel büyüklükleri olan gerilim ve akım, harmonikler içerdiğinde efektif değerleri harmonik distorsiyona bağlı olarak aşağıda verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100} \right)^2} \quad (5.22a)$$

$$I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2} \quad (5.22b)$$

Eşitlikte V_1 ve I_1 , gerilimin ve akımın efektif değeri olarak temel bileşenidir. Görüldüğü gibi gerilim ve akım değerleri harmonik bileşenlerin artması ile artış göstermektedir. Sistemdeki harmoniklerin sınırlandırılmasını amaçlayan standartlarda çok yaygın olarak kullanılan Toplam Harmonik Bozulma (THD), akım ve gerilim için ayrı ayrı tanımlanmaktadır. Gerilim için,

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (5.23)$$

şeklindedir. Akım için ise,

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (5.24)$$

şeklinde tanımlanabilmektedir (Kakilli vd., 2008). Burada THD_V ve THD_I sırasıyla gerilimdeki toplam harmonik bozulmayı ve akımdaki toplam harmonik bozulmayı göstermektedir. V_n ve I_n ise sırasıyla devreye uygulanan gerilimin n 'inci mertebedeki harmoniğinin etkin değerine ve devreden geçen akımın n'inci mertebedeki harmoniğinin etkin değerine, V_1 devreye uygulanan gerilimin temel frekanstaki etkin değerine ve I_1 ise devreden geçen akımın temel frekanstaki etkin değerine karşılık gelmektedir.

Akım ve gerilim için tanımlanan THD değerleri genel olarak yüzde cinsinden ifade edilirler dolayısıyla denk.(5.23) ve denk. (5.24)'de elde edilen sonuçlar 100 ile çarpılarak sistemin yüzde THD değerleri elde edilmektedir (Kocatepe ve Uzunoğlu, 2001) .

Örnek 5.1: Temel dalga gerilimi 114 V, 3. harmoniği 4 V, 5. harmoniği 2 V, 7.harmoniği 1,5 V ve 9. harmoniği 1 V olan bir dalganın THD değerini bulalım (Sankaran, 2002).

Harmoniklerin RMS değeri hesaplanarak,

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

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

olarak bulunur.

6. SİNÜSODİAL OLMAYAN DURUMLARDA GÜÇ KOMPAZASYONU

6.1. Harmonikli Şebekelerde Kondansatör Gücünün Tayini

Eğer kompanze edilen sistem sabit kondansatör grubu ile kompanze edilen bir yük değilse, kondansatör grupları ile sistem kompanze ediliyorsa, reaktif güç kontrol rölesi adı verilen ölçme, karşılaştırma ve değerlendirme, anahtarlama olmak üzere 3 ana üniteden oluşan cihazla yapılır. Bir başka ifade ile reaktif güç kontrol rölesi, sistemin güç faktörünü ölçerek önceden tanımlanmış güç faktörüne ulaşmak için kondansatör bankalarını yükü paralel olarak devreye almakta veya çıkarmaktadır (Mandal vd., 1994). Reaktif güç kontrol rölelerinde ölçme bloğu önemlidir. Sistem için gerekli olan veriler önce ölçme ünitesine gelir, gerilim bilgisi direk, akım ise bir akım transformatörü yardımı ile bağlanır. Şebekenin aktif ve reaktif güçleri, örnekleme ile alınan akım ve gerilim değerlerinden hesap edilir (Şekkeli, 2006). Eğer alınan akım ve gerilim örnekleri sinüsoidal formda değil ve harmonikler içeriyorsa, güç hesaplamaları için bu işaretlerin işlenmesi çok zor hale gelir. Bu durumda, harmonikli akım ve gerilim örneklerine dijital işaret işlemeyle harmonik analizleri yapılır. Temel ve belirli mertebeye kadar harmonikler hesaplanır (Marganitz, 1992). Harmonik analizi, tüketicinin şebekedeki harmonikleri görmesi, izlemesi ve aşırı harmoniklere karşı uyarılması için kullanılır. Reaktif ve aktif güç hesapları harmonikleri süzölmüş temel bileşene göre değil, harmonikli değerlere göre yapılır (Grady ve Gilleskie, 1993).

Bununla birlikte kompanzasyon için kullanılan güç kondansatörleri, gerilim ve akımın temel bileşinine göre hesap edilip imal edilmektedir (Bayram, 2000). Dolayısıyla röle, devreye alması gereken kondansatör gücünü hesaplarken, şebekenin 50 Hz temel akım ve gerilim bileşenine göre yapmalıdır ki doğru kondansatör değeri devreye alınmış ve doğru kompanzasyon gerçekleştirilmiş olsun (Şekkeli, 2006).

Bu hesaplamalar aşağıda detaylı olarak verilmiştir. Kondansatörlerin kapasitif reaktansları denk.(6.1)'de görüldüğü gibi, frekansla ters orantılıdır (Makram vd., 1992).

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (6.1)$$

Burada X_c kondansatörün kapasitif reaktansını, ω açısal frekansı, f şebeke frekansını ve C kondansatörün kapasitesini göstermektedir. Harmonikli bir gerilim altında kondansatörün çektiği akımın efektif değeri, harmonikli gerilimin efektif değerine eşit sinüsoidal bir gerilim altında çektiği akımdan daha büyüktür (Şekkeli, 2006). Bu duruma bağlı olarak sistem açısından bakıldığında gerilimdeki harmonikler nedeniyle kondansatörün gücü de artmaktadır. Şebeke için sadece temel bileşene ait kondansatör gücü önem taşır. Sinüsoidal bir U faz geriliminde kondansatörün çektiği akım,

$$I = \omega C U \quad (6.2)$$

dur ve bu kondansatörün faz başına gücü ise;

$$Q = \omega C U^2 = \frac{I^2}{\omega C} \quad (6.3)$$

olur. Eğer gerilim sinüsoidal değilse, herhangi n . harmoniğin, harmonik gerilimi altında kondansatör akımı,

$$I_n = \omega_n C U_n = n \omega_1 C U_n \quad (6.4)$$

ve kondansatörün harmonikli gücü ise,

$$Q_{cn} = n \omega_1 C U_n^2 = \frac{I_n^2}{n \omega_1 C} \quad (6.5)$$

değerini almaktadır (Şekkeli, 2006). Burada, ω_1 temel bileşenin, ω_n ise n . harmoniğin açısal frekanslarıdır ve $n = 1, 2, 3, \dots, m$ olmak üzere,

$$\omega_n = n \omega_1$$

dir. Kondansatör uçlarındaki sinüzoidal olmayan gerilimin efektif değeri, harmonik gerilimlerin karesel ortalamasına;

$$U_c = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2} \quad (6.6)$$

ve kondansatör akımının efektif değeri de, aynı şekilde harmonik akımlarının karesel ortalamasına;

$$I_c = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = w_1 C \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (nU_n)} \quad (6.7)$$

eşit olmaktadır (Şekkeli, 2006). Dolayısıyla buradan kondansatör gücü ise,

$$Q_c = \sum_{n=1}^{\infty} Q_{cn} = w_1 C \sum_{n=1}^{\infty} (nU_n^2) = \frac{1}{w_1 C} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_n^2}{n} \right) \quad (6.8)$$

ifadesine göre hesaplanmaktadır. Denk. (6.6)'da gerilimin temel bileşeni çekilirse;

$$U_1^2 = U_c^2 - \sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \quad (6.9)$$

elde edilir. Bu ifade denk.(6.7)'de yerine konulursa,

$$I_c = w_1 C U_c \sqrt{1 + \sum_{n=2}^{\infty} (n^2 - 1) \left(\frac{U_n}{U_c} \right)^2} \quad (6.10)$$

değeri elde edilmektedir. Aynı şekilde kondansatör güç değeri için de,

$$Q_c = w_1 C U_c^2 \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} (n-1) \left(\frac{U_n}{U_c} \right)^2 \right] \quad (6.11)$$

ifadesi bulunur. U_c ile aynı efektif değerde olan w_1 temel açısal frekanslı bir gerilim altında kondansatörün çektiği akım;

$$I_{c1} = w_1 C U_c \quad (6.12)$$

ise, harmonikli gerilim altında kondansatörün çektiği akım, bu akımdan,

$$\frac{I_c}{I_{c1}} = \sqrt{1 + \sum_{n=2}^{\infty} (n^2 - 1) \left(\frac{U_n}{U_c} \right)^2} \quad (6.13)$$

oranı kadar daha büyüktür. Aynı şekilde U_c ile aynı efektif değerde olan w_1 açısal frekanslı sinüsoidal bir gerilim altında kondansatör gücü;

$$Q_{c1} = w_1 C U_c^2 \quad (6.14)$$

harmonikli gerilim altında kondansatörün kapasitif gücü, bu güç değerinden;

$$\frac{Q_c}{Q_{c1}} = 1 + \sum_{n=2}^{\infty} (n-1) \left(\frac{U_n}{U_c} \right)^2 \quad (6.15)$$

oranı kadar daha büyük olacaktır (Bayram, 2000). Denk. (6.13) ve denk.(6.14)'den de açık bir biçimde görülmektedir ki, harmonikli gerilim altında kondansatör akımı ve gücü, eşit efektif değerli sinüsoidal gerilim altında çekilen akım ve güç değerlerine göre daha büyüktür. Böylece, doğru, hassas ve bire bir kompanzasyon yapmak için, devreye alınacak kondansatör değerleri hesabında, şebeke akım ve gerilimine, harmonik analizi yapıp, kondansatörlerin imal edildikleri temel frekansa göre devreye alınıp çıkarılmaları gerektiği yukarıdaki ifadelerden açıkça görülmektedir (Şekkeli, 2006).

6.2. Harmonikli Şebekelerde Güç ve Güç Faktörü

Genel olarak enerji dağıtım sistemlerinde temel şebeke frekansındaki akım ile gerilim arasındaki faz farkını işaret eden büyüklüğe $\cos\phi$ denmektedir ve bu değer bir endüstriyel hattın enerji aldığı üreticiye ödeyeceği reaktif güç bedelini belirlemektedir. Döner telli konvansiyonel elektrik sayaçlarıyla faturalandırma yapan sistemlerde durum bahsedildiği gibidir. Ancak son yıllarda sayısal sayaçlara geçilmesiyle bu durum farklılık göstermiştir. Çünkü sayısal sayaçlarda güç faktörüyle bilinen yukarıdaki değer hesaplanması için sadece temel şebeke frekansındaki akım ile gerilim arasındaki açığa bakılmaz, harmonik denilen diğer frekanslardaki akım ve gerilimin etkisi de göz önüne alınmaktadır. Bu etkiye “power factor” yani “güç faktörü” denmektedir. Kısaca güç faktörü, $\cos\phi$ değerinden farklı olarak, harmonikler dâhil olan akım ile harmonikler dâhil olan gerilim arasındaki faz farkına karşılık gelmektedir. Bu iki değer arasında, harmonikli ortamlarda aşağıdaki eşitlikte verildiği kadar bir fark oluşmaktadır (Bilki, 2008).

$$PF = \phi * \cos\phi \quad (6.16)$$

$$\phi = 1 / [1 + (THD_i)^2] \quad (6.17)$$

Örnek olarak sayısal sayaç kullanan ve şebekesinde THD (I) = % 30 seviyelerinde harmonik akımı olan bir tüketici $\cos\phi = 0,96$ değerine sahip iken,

$$\mu = \frac{1}{[1+(0.3)^2]} = 0.917$$

$$PF = 0.917 \times 0.96 = 0.88 \quad (6.18)$$

değerinde bir güç faktörüne sahip olacaktır. Bunun temel sonucu olarak, döner telli bir sayaçtan, sayısal bir sayaca geçmesiyle aynı yük ve kondansatör sistemiyle daha önceki durumdan daha yüksek bir reaktif güç miktarı ve bu miktara bağlı olarak da dolayısıyla daha yüksek bir bedel ortaya çıkacaktır (Bilki, 2008).

6.3. Harmoniklerin Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemlerine Etkileri

Harmonikler, fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Bu analiz ile sinüsoidal dalga sekline sahip olmayan dalgalar, frekansları farklı sinüsoidal dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu sayede harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir. Harmonikler güç sistemlerinde; kayıpların artışı, gerilim düşümlerinde artış, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi v.b. teknik ve ekonomik problemlere yol açmaktadır (Kakilli vd., 2008). Harmonikler nedeniyle oluşan gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulmasından en çok etkilenen, güç faktörü düzeltilmesinde kullanılan kompanzasyon sistemleridir. Endüstriyel güç sistemlerinde harmonik problemlerinin ilk belirtilerinden biri kompanzasyon sisteminde oluşan arızadır. Kompanzasyon sistemlerinde en önemli problem aşırı akımlardır. Diğer bir problem de geriliminin tepe değerinin oluşturduğu yalıtım zorlanmasıdır (İzmirlioğlu, 1990; Eralp, 1985).

Temel bileşendeki değeri,

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (6.19)$$

olan kapasitif reaktans, n . harmonik mertebesinde;

$$X_{Cn} = \frac{X_C}{n} \quad (6.20)$$

değerini almaktadır, yani harmonik mertebesi büyüdükçe kapasitif reaktans küçülür. Bu nedenle kondansatörler harmonik frekanslarında daha büyük akımlar çekerler ve aşırı yüklenirler (Kakilli vd., 2008).

n . harmonik için V_n harmonik gerilimi altında kondansatörün çektiği akım;

$$I_n = \frac{V_n}{X_{Cn}} = n\omega CV_n \quad (6.21)$$

değerini almaktadır. Bir kompanzasyon sisteminin uçlarındaki gerilim,

$$v = V_{1m} \sin \omega t + V_{2m} \sin 2\omega t + V_{3m} \sin 3\omega t + \dots + V_{nm} \sin n\omega t \quad (6.22)$$

şeklinde olduğunda bu durumda kompanzasyon sisteminden akacak olan akım miktarı,

$$i = V_{1m} \omega C \sin(\omega t + 90) + V_{2m} 2\omega C \sin(2\omega t + 90) + V_{3m} 3\omega C \sin(3\omega t + 90) + \dots + V_{nm} n\omega C \sin(n\omega t + 90) \quad (6.23)$$

Bu eşitlikten de görüldüğü gibi, akımdaki harmoniklerin frekansı gerilimdeki harmoniklerin frekansından daha büyüktür (Karakaş, 2000). Akımdaki dalgalanma gerilimdeki dalgalanmaya göre n . harmonik için n kat daha büyüktür (Arrilaga v.d., 1997; Akın, 2001). Ayrıca n . mertebedeki bir harmonik akımı sistemde paralel veya seri rezonansa yol açabilir. Seri rezonans, sistem transformatörü ve kompanzasyon sistemi arasında meydana gelebilir ve n . harmonikdeki akımın genliğinin yükselmesine sebep olur. Paralel rezonans ise sisteme bağlı yükler ile kompanzasyon sistemi arasında meydana gelebilir ve n . harmonikdeki gerilimin yükselmesine sebep olmaktadır (Kakilli vd., 2008).

Bu akım ve gerilim değeri ısınmayı ve dielektrik zorlanmayı arttırarak kondansatör gruplarının ömürlerini azaltır. Kompanzasyon tesislerinin tasarımında bu durumların göz önüne alınması gereklidir (Sucu, 2003).

6.4. Sistemde Harmoniklerin Engellenmesi

Harmonikler nedeniyle oluşacak zararlı etkilerin engellenmesi sadece tasarımda alınacak tedbirlerle mümkün olmamaktadır. Harmonik akımların şebekeye geçmesini önlemek için 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 yani harmoniklerin etkisini azaltmaktır.

İşlev bakımından filtreler ikiye ayrılır;

- Filtrelerin kontrollü akım ya da gerilim kaynağına sahip olduğu “aktif” filtreler
- Filtre bileşenlerinin direnç endüktans ve kondansatör gibi pasif elemanlardan

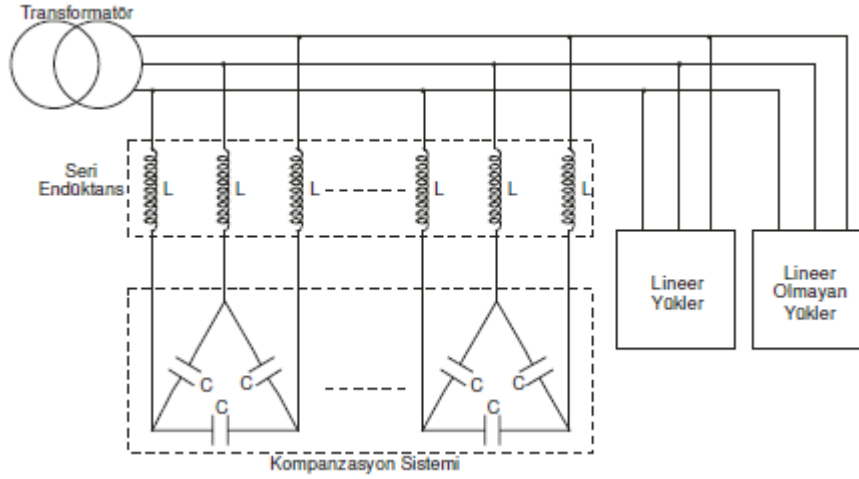
oluşturulduğu “pasif” filtreler.

Bu iki filtrenin birbirlerine olan üstünlükleri Tablo 6.1’ de kıyaslanmıştır. Bu durumda iki filtrenin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır (Efe, 2006).

Tablo 6.1. Aktif ve pasif filtrelerin karşılaştırılması (Efe, 2006).

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

Harmoniklerin engellenmesi için uygulanan pasif filtreme yöntemlerinden biri olan Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlanması uygulaması aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır. Bu yöntemle ait prensip şeması Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamak

Harmonikli akımlara karşı seri endüktans sayesinde yüksek empedans gösterilerek harmoniklerin kompanzasyon sistemine geçmesi önlenmekte ve bu seri endüktansla kompanzasyon sisteminin kapasitansı bir filtre görevi görerek harmoniklerin etkinliğini azaltmaktadır (Sucu, 2003).

Bu sistemler tesis edilirken seçilecek olan endüktanslara, her firmanın kendi endüktansları için hazırladığı tablolara bakılarak karar verilmektedir. Bu seçim için bazı kriterler vardır. Bunların en önemlisi p faktörüne karar vermektir (Sucu, 2003). Bu faktör, $p = X_L/X_C$ eşitliğinden belirlenmektedir. Burada, X_L , kompanzasyona seri bağlanacak olan endüktansın temel frekanstaki endüktif reaktansı (Ω) ve X_C , kompanzasyon sisteminin temel frekanstaki kapasitif reaktansıdır (Ω).

Burada p faktörü sistemde etkin olan harmonik derecesine göre seçilmelidir. Örneğin; 50 Hz şebeke frekanslı sistemde 3. harmonik baskın ise, bu sistemi 189 Hz de rezonansa getirecek (endüktans ve kompanzasyon sistemi arasındaki seri rezonans) p değeri % 7 olan endüktanslar seçilmelidir, sistemde 5. harmonik baskın ise, bu sistemi 210 Hz de rezonansa getirecek p değeri % 5,67 olan endüktanslar seçilmelidir (Kakilli vd., 2008).

Burada amaç; örneğin 3. harmoniği baskın olan sistemde, sistemi 3. harmoniğin frekansı olan 150 Hz de rezonansa getirilirse bu durumda 3. harmoniğin bütün genliği kompanzasyon sistemine akacaktır, bu da kompanzasyon sistemine zarar verecektir. Bu yüzden sistem, sistemde mevcut olan baskın harmoniğin frekansına yakın frekanslarda rezonansa getirilmekte ve böylece sistemde baskın olan harmoniğin genliği önemli ölçüde

azaltılmaktadır (Kakilli vd., 2008). Bu baskın olmayan diğer harmonik mertebeleri üzerinde de etki göstereceğinden sistemdeki THD seviyesi önemli ölçüde düşecektir. Yukarıda bahsedilen 3. harmonik için 189 Hz, 5. harmonik için 210 Hz değerleri zamanla uygulamadan kazanılan tecrübelerden elde edilmiş veriler olmaktadır (Sucu, 2003; Erkan,1996).

Dolayısıyla kondansatör uçlarındaki gerilim;

$$V_c = \frac{V}{1-p} \quad (6.24)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada; V, şebeke gerilimidir (Volt). Şebeke gerilimi 400 V olan bir sistemde p değeri % 5.67 olan bir endüktans seçilmişse, bu durumda kapasitansların gerilimi 425 V seçilmelidir. Ancak, 425 V'da çalışabilecek şekilde seçilen kapasitanslar üzerlerinde yazılı olan reaktif gücü bu gerilim altında verebilirler. Eğer kapasitanslar daha düşük gerilim ile çalışırlar ise yeni güçleri;

$$Q_2 = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 Q_1 \quad (6.25)$$

ile hesaplanmalıdır. Eşitlikte, Q_1 kompanzasyon sisteminin nominal çalışma gerilimi altında üreteceği reaktif güç (VAR), Q_2 , gerilimin değişmesi sonucunda kompanzasyon sisteminin üreteceği reaktif güç (VAR) ise V_1 , kompanzasyon sisteminin nominal çalışma gerilimi (Volt), V_2 , değişen gerilimin değeridir (Volt). Ayrıca kompanzasyon sistemi, seri bağlı reaktörlerin tükettiği ve aşağıda eşitlikte verildiği kadar daha az bir reaktif gücü sisteme verecektir (Erkan, 1996).

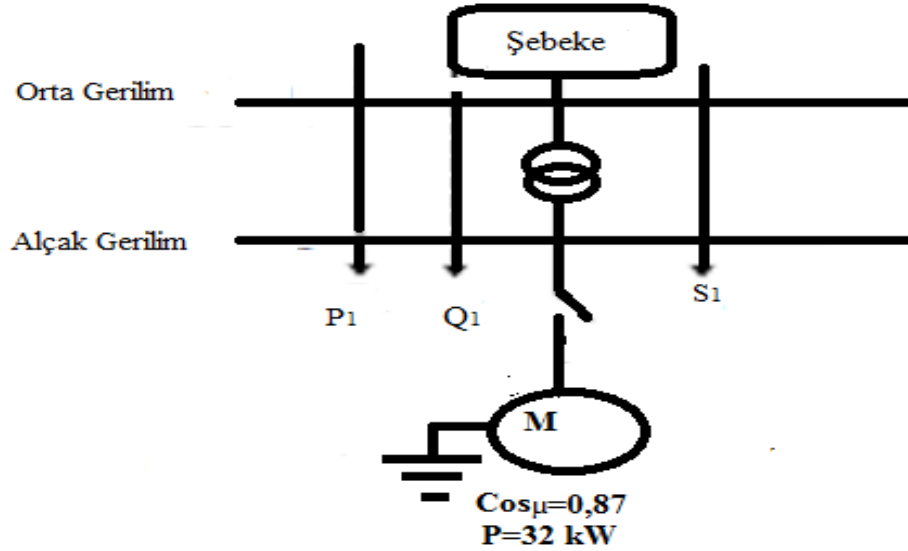
$$Q_L = 3I^2X_L \quad (6.26)$$

Eşitlikte, Q_L , seri endüktansların tükettiği reaktif güç (VAR), I, seri endüktans üzerinden akan akım (Amper), X_L , seri endüktansın temel frekanstaki endüktif reaktansına (Ω) karşılık gelmektedir (Kakilli vd., 2008).

7. OPTİMAL REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU UYGULAMASI

7.1. Sistemin Matematiksel Olarak Tasarımı ve Kondansatör Gücünün Tayini

Sistem kompanzasyonu yapılacak tesis Tunceli Belediyesine ait Arıtma Tesisi Terfi İstasyonu bir adet etiket değerleri P, aktif gücü 32kW; $\cos \phi$, güç katsayısı 0,87 olan üç fazlı AC motordan ibarettir. Şekil 7.1’de kompanzasyon öncesi yükün çekmiş olduğu reaktif, aktif, görünür güç, akış yönleri gösterilmiştir,



Şekil 7.1. Kompanzasyon öncesi yükün güç akışı

Tezin içeriğindedeki belirtildiği gibi bir tüketicinin reaktif güç ihtiyacının tespiti için; önce tesisin şebekeden çektiği görünür gücü S ve buna ait güç faktörü $\cos \Phi$ 'nin bilinmesi gerekir. Güç faktörünün arzu edilen $\cos \Phi$ değerine çıkarılması için gerekli reaktif gücü veya kondansatör gücünü bulabilmek için birçok hesaplama yöntemi bulunmaktadır. Bu tür uygulamalar iki şekilde yapılabilir, ya aktif güç sabit tutularak güç katsayısının düzeltilmesine gidilir yâda görünür güç sabit tutularak aktif gücün artırılmasına gidilir. Uygulamamızda aktif gücün sabit tutularak görünür gücün azaltılması hedeflenmiştir. Böylece sistemimiz arzu edilen $\cos \Phi$, değerine çıkarılmaya çalışılacaktır. Şekil 7.2’de su tahliye amacıyla tesis edilen motorlardan birine ait fotoğraf yer almaktadır.



Şekil 7.2. Uygulamada kullanılan su tahliye motoru

Bu tür uygulamalarda analizör kullanmamız ihtiyaç duymuş olduğumuz elektriksel parametreleri bulmamızda kolaylık sağlayacaktır. Şekil 7.3’de sistemin elektriksel parametrelerini bulmakta kullandığımız HIOKİ marka enerji analizörü görülmektedir.



Şekil 7.3. Uygulamada kullanılan HIOKİ marka enerji analizörü

Bu tesisin güç katsayısı $\cos\phi$ değerini 0,98 değerine çıkarmak istediğimizde, kompanzasyon öncesi reaktif güç değeri, $Q_1 = P * \tan \phi_1$ olarak ifade edilmektedir.

kompanzasyon sonrası reaktif güç değeri ise,

$$Q_2 = P * \tan \phi_2 \quad (7.1)$$

olacaktır. Kompanzasyon tesisine konulacak kondansatör gücü ise;

$$Q_C = P * (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (7.2)$$

olarak elde edilmektedir. Sistemin kurulu gücü,

$$P = 32 \text{ kw}$$

$$\cos \phi_1 = 0,87 \quad (7.3)$$

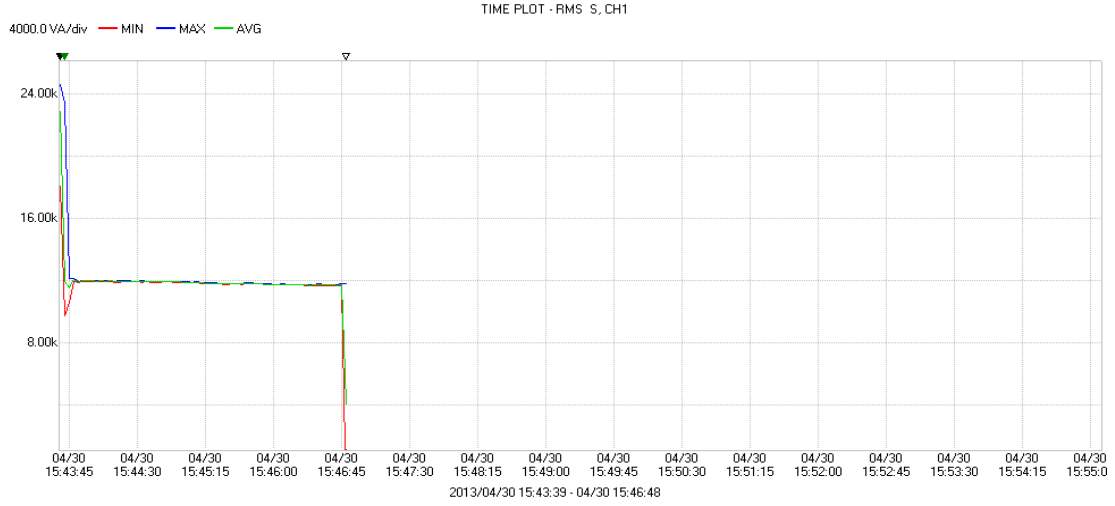
burada; Gerek sistemde ki, harmoniklerden, sistem verimi, şebeke frekans ve gerilimden kaynaklanan, gerek sistemin ossilasyon yaptığı (geçici rejim) çalışma şartlarından kaynaklanan (sistem bu durumlarda nominal çalışmanın çok üstünde akım çekmektedir) v.b. sebeplerden dolayı sistemin kurulu gücünün (etiket değerlerinin) alınması doğru olmayacaktır. Her ne kadar işletmede, uzun süreli kurulumu planlanan tesislerde kurulu güç üzerinden kompanzasyon hesaplarının yapılması daha sağlıklı olsada, bu tür uygulamalarda anlık güç kompanzasyonu yapıldığından sistemin anlık çalışma değerleri üzerinden kompanze edilmesi doğru olacaktır.



Şekil 7.4. Kompanze edilmemiş yükün şebekeden çektiği reaktif güç, Q (VAR)

$$Q_{faz} = V_{RMS} \times I_{RMS} \times \sin \Phi = 8kVAR \quad (V_{RMS}, \text{ faz-nötr gerilimi etkin değeri; idealde, 230V})$$

$$S_{faz} = V_{RMS} \times I_{RMS} = 12kVA \quad (7.4)$$

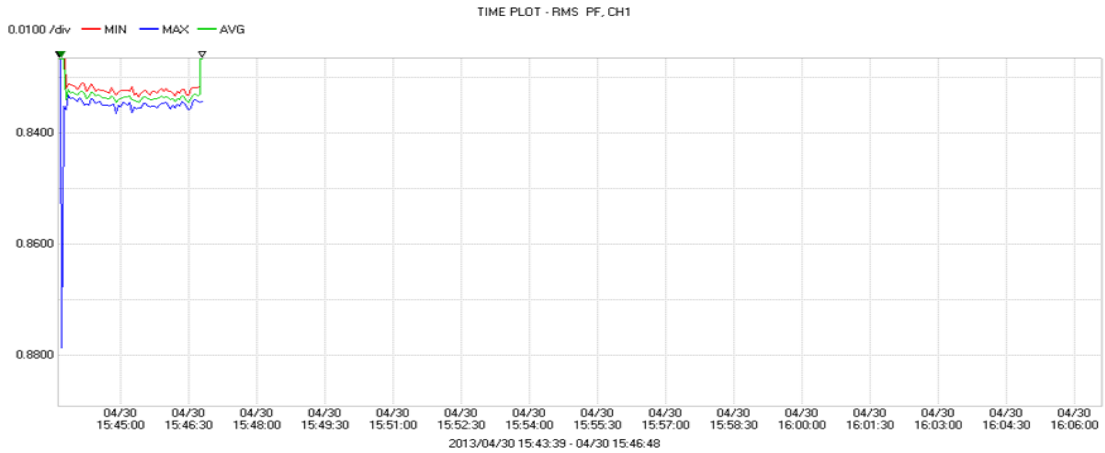


Şekil 7.5. Kompanze edilmemiş yükün şebekeden çektiği görünür güç, S(VA)

Şekil 7.4’de sistemin şebekeden çekmiş olduğu reaktif güç Q, grafiği verilmiştir Şekil 7.5’de sistemin şebekeden çekmiş olduğu görünür güç S, grafiği verilmiştir. bu grafiklerden faydalanarak sistemin çekmiş olduğu yaklaşık aktif gücü bulabiliriz.

Burada sistemin güç katsayısı önemlidir ve analizörümüzden alınan değerin Şekil 7.6’dan da görüleceği gibi yaklaşık 0,83 mertebelerindedir. Tesisin etiket değerleri bilinmiyorsa ve güç katsayısını ölçecek bir ölçü aletimiz de bulunmuyorsa bu değerin 0.70-0.85 aralığında alınması doğru olacaktır.

$$GF = \frac{P}{S} = 0,83 \quad (7.5)$$



Şekil 7.6. Kompanze edilmemiş yükün güç faktörü GF

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \quad (7.6)$$

$$S_{faz} = 12 \text{ kVA} \text{ ve } Q_{faz} = 8 \text{ VAR}$$

$$P_{faz} \cong 9 \text{ kW} \quad (7.7)$$

olarak bulunur.

Üç fazlı devrenin güç faktörü bir fazlı devrenin güç faktörü $\cos\Phi$ ile aynıdır. Eğer üç fazlı devrede akım ve gerilim dalgaları sinüs biçiminde değilse bile, eğer üç fazlı sistemi dengeli sürekli hal durumundaysa (burda yük dengeli kabul edilmiştir) bu durumda faz başına hesaplama yapıp bunu üç ile çarparak üç fazlı devrenin toplam gücünü bulmak mümkündür. Bu durumda P, toplam aktif gücümüz,

$$P_{3-faz} \cong 27 \text{ kW}$$

Güç katsayımızı 0,98 çıkarmak için gerekli kondansatör gücü ise denk.(7.8)'deki gibidir.

$$Q_c = 27 * (\tan 33,3 - \tan 11,4) \quad (7.8)$$

V_{hh} ; fazlar arası gerilimin etkin değeri (Volt), olmak üzere faz –nötr gerilimler cinsinden fazarası gerilimleri bulmak mümkündür bu durumda, $V_{hh} = \sqrt{3} \times V_{RMS}$ olur. Üç fazlı sistemde toplam gücümüz,

$$S_{3-faz} = \sqrt{3} \times V_{hh} \times I_{RMS} \quad (7.9a)$$

$$Q_{3-faz} = \sqrt{3} \times V_{hh} \times I_{rms} \times \sin \Phi \quad (7.9b)$$

$$P_{3-faz} = \sqrt{3} \times V_{hh} \times I_{rms} \times \cos \Phi \quad (7.9c)$$

elde edilir. Artık ihtiyaç duyulan kondansatör gücü,

$$Q_c = 12,2 \text{ kVAR} \quad (7.10)$$

bulunur. Bu değer standart kondansatör güç değerleri temel alındığında bundan sonraki uygulamamızda 12,5 kVAR olarak alınacaktır. Bununla birlikte bu tür hesaplamalarda $\pm \% 10-20$ tolerans payının bulunduğu unutulmamalıdır. Demek ki sistemin $\cos\phi$ güç katsayısı değerini, 0,83 den 0,98 'e çıkarmak için gerekli kondansatör gücümüz bulunmuştur.

Problemimizi farklı bir yaklaşımla k faktör cetvelinden faydalanarak da çözebiliriz buna göre,

Tablo 7.1. Kondansatör gücünün tayini k faktörünün bulunması

K_c	$\cos\phi_2$													
$\cos\phi_1$	0.80	0.85	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1	
0.60	0.583	0.714	0.849	0.878	0.907	0.938	0.970	1.005	1.042	1.083	1.130	1.191	1.333	
0.61	0.549	0.679	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.157	1.299	
0.62	0.515	0.646	0.781	0.810	0.839	0.870	0.903	0.937	0.974	1.015	1.062	1.123	1.265	
0.63	0.483	0.613	0.748	0.777	0.807	0.837	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233	
0.64	0.451	0.581	0.716	0.745	0.775	0.805	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201	
0.65	0.419	0.549	0.685	0.714	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.919	0.966	1.027	1.169	
0.66	0.388	0.519	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138	
0.67	0.358	0.488	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108	
0.68	0.328	0.459	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078	
0.69	0.299	0.429	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049	
0.70	0.270	0.400	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020	
0.71	0.242	0.372	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992	
0.72	0.214	0.344	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964	
0.73	0.186	0.316	0.452	0.481	0.510	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936	
0.74	0.159	0.289	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909	
0.75	0.132	0.262	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882	
0.76	0.105	0.235	0.371	0.400	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855	
0.77	0.079	0.209	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829	
0.78	0.052	0.183	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802	
0.79	0.026	0.156	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776	
0.80		0.130	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750	
0.81		0.104	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724	
0.82		0.078	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.555	0.698	
0.83		0.052	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.530	0.672	
0.84		0.026	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646	
0.85			0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620	
0.86			0.109	0.138	0.167	0.198	0.230	0.265	0.302	0.343	0.390	0.451	0.593	
0.87			0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567	
0.88			0.055	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540	
0.89			0.028	0.057	0.086	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.370	0.512	
0.90				0.029	0.058	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.484	

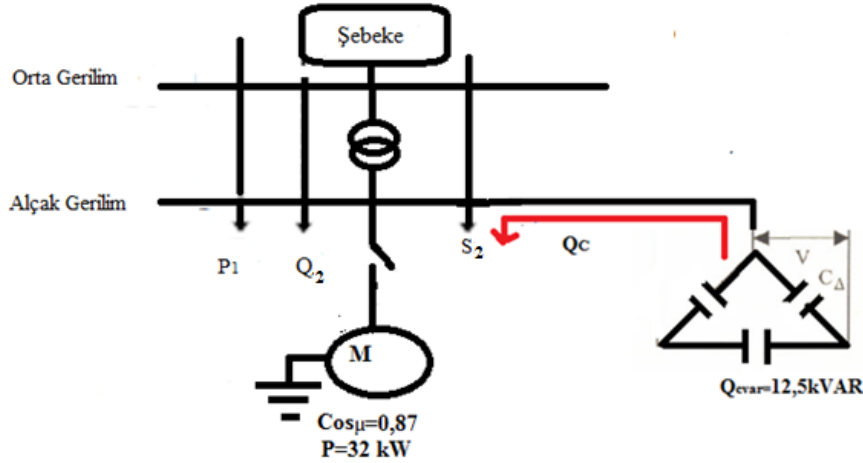
burdan,

$$Q_c = k \cdot P \quad (7.11)$$

Tablo 7.1 'den k faktörü bulunursa, yaklaşık olarak 12,5 kVAR' lık kondansatör gücüne ihtiyaç duyduğumuz ortaya çıkmaktadır.

7.2. Reaktif Güç Kompanzasyonu Uygulaması

Şekil 7.7’de sistem kompanze edildikten sonra ki güç akışı gösterilmiştir. Sisteme 12,5 kVAR’lık kondansatör bağladığımızda yükün ihtiyaç duymuş olduğu reaktif gücün bir kısmı kondansatör grubundan karşılanacaktır. Bu da şebekeden çekilen reaktif gücü azaltacaktır.



Şekil 7.7. Yükün 12,5 kVAR’lık kondansatör ile kompanze edilmesi

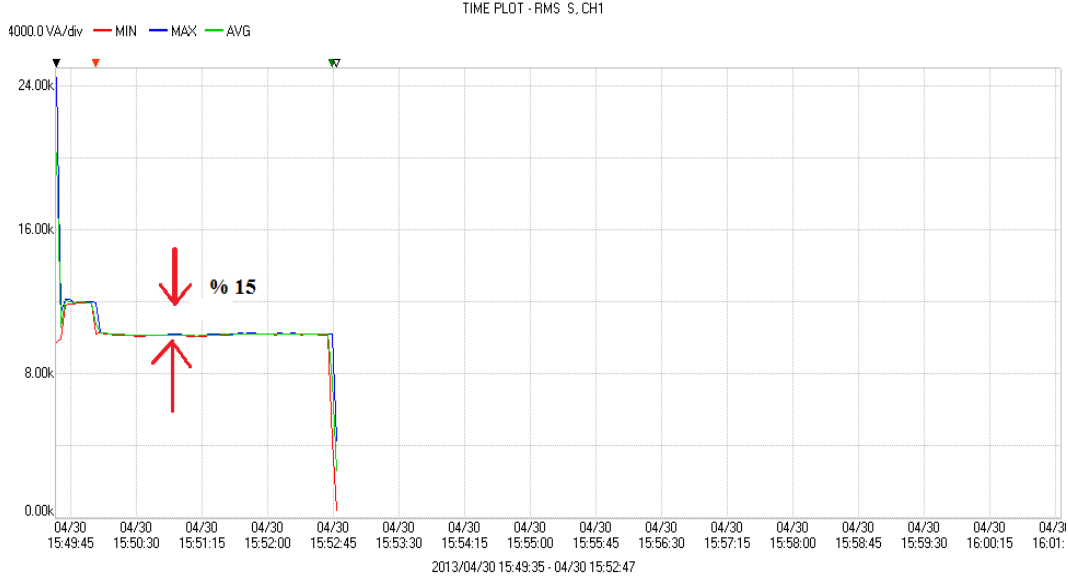
$$\% \Delta S = \frac{\Delta S}{S} * 100 = 100 * \left(1 - \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \right) \quad (7.12)$$

olmaktadır. Buradan, $\cos \phi_2 = 0,98$ ve $\cos \phi_1 = 0,83$ olarak alındığında

$$\% \Delta S = 15 \quad (7.13)$$

olarak bulunur.

Şekil 7.8’de görüldüğü gibi sistem kompanze edildikten sonra görünür güçte yaklaşık olarak % 15 lik bir azalma söz konusudur. Bu da bize, gerektiği takdirde tesisi aşırı yüklemekten %15 oranında, kapasiteyi artırabileceğimizi göstermektedir. Bu ifadeden de anlaşılacağı gibi şebekeden çekilen akım sistem kompanze edilmeden önceki duruma göre azalmıştır ($S \downarrow = V \times I \downarrow$). Bu da tüketicinin ödemiş olduğu fatura maliyetini, hat kayıplarını, yükün uçlarında ki gerilim düşümünü azaltmıştır.



Şekil 7.8. Görünür güçte yüzde değişim miktarı

Üç fazlı sistemlerde kondansatörler yıldız veya üçgen bağlanırlar. Her iki bağlama şeklinin de kullanıldığı durumlar; maliyet, sistem gerilimi ve koruma gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Kompanzasyon amaçlı olarak kullanılan kondansatörler üçgen bağlandıklarında her elemana hattın faz arası gerilimi, yıldız bağlamada ise bu değer $1/\sqrt{3}$ katı kadar gerilim gelmektedir. Şekil 7.15'de V (volt); faz arası (etkin) gerilimi, Q_c (VAR); bir kondansatörün gücü ve f ise sebekenin frekansı (Hz) olmak üzere, kondansatörler yıldız olarak bağlandığında her bir faz ile nötr arasına konulan kapasite değeri;

$$C_Y = \frac{Q_c}{2\pi V^2} \text{ farad}$$

$$C_Y = 12,5 \times 10^3 / (2 \times \pi \times V^2)$$

$$C_Y = 0,0137 \text{ farad} \quad (7.14)$$

ve üçgen bağlamada ise iki faz arasına bağlanacak kapasite değeri;

$$C_\Delta = \frac{Q_c/3}{2\pi V^2} \text{ farad}$$

$$C_{\Delta} = \frac{12,5 \times 10^3 / 3}{2 \times \pi \times V^2}$$

$$C_{\Delta} = 0,0045 \text{ farad} \quad (7.15)$$

olarak bulunmaktadır. Son iki ifadeden anlaşıldığı gibi iki kapasite arasında $C_y/C_{\Delta} = 3$ oranı bulunmaktadır. Kompanzasyon sistemini inşa edecek olan için iki alternatif bulunmaktadır; ya üçgen bağlamayı tercih edip C değeri düşük fakat uçları arasına gelen gerilim değeri (dolayısı ile yalıtım maliyeti) yüksek bir kapasite kullanacaktır veya yıldız bağlamayı tercih edip C değeri yüksek ancak gerilim değeri (dolayısı ile yalıtım maliyeti) düşük kapasite kullanacaktır.

Şekil 7.9'da kompanzasyon panosundaki kondansatörlerin devreye bağlantısı gösterilmiştir. Bu uygulamamız AG 'de (Alçak Gerilim, 600 V altında) yapıldığından (Alçak Gerilimde, faz ve hat gerilimleri arasında ki farkın izalasyon bakımından çok önemli olmadığı bilindiği için) kondansatör bağlantımız üçgen bağlantı olarak tercih edilmiştir.

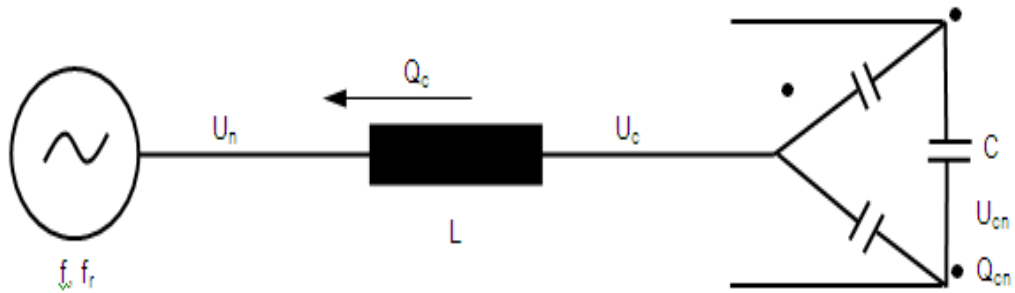


Şekil 7.9. Sistemin kompanzasyon panosu

7.3. Harmonik Eliminasyon Amaçlı Pasif Filtre Tasarımı

Harmonik kirlenmelerin olduğu sistemlerde harmonik filtrelili reaktörlü kompanzasyon uygulamaları yapılmalıdır. Harmonik filtrelerinde amaç, sadece özel bir frekanstaki işaretin güç sistemine veya güç sistem elemanlarına girmesini önlemek olduğundan, seri filtreler kullanılması halinde baskın frekanstaki işarete karşı büyük bir empedans gibi davranmaktadır. Fakat bu çözüm kaynakta ortaya çıkan harmoniklerin süzülmesi için çok kullanılan bir yöntem değildir. Kaynakta harmonikleri engellemek, bu cihazların çalışmasını engellemek anlamına gelecektir. Harmonik üreten cihazlarda düşük empedanslı paralel bir filtre yardımıyla harmoniklerin sisteme geçmesini önlemek en uygun çözümdür (Tunçalp vd., 2003). Seri filtreler, tüm yük akımını taşımak zorundadırlar buna karşılık paralel filtreler, hangi anma değeri gerekiyorsa ona göre tasarlanabilir. Paralel filtrelerin en önemli özellikleri de tasarımlarının kolay ve maliyetinin ucuz olmasıdır (Ay, 1996; Yalçın, 2000).

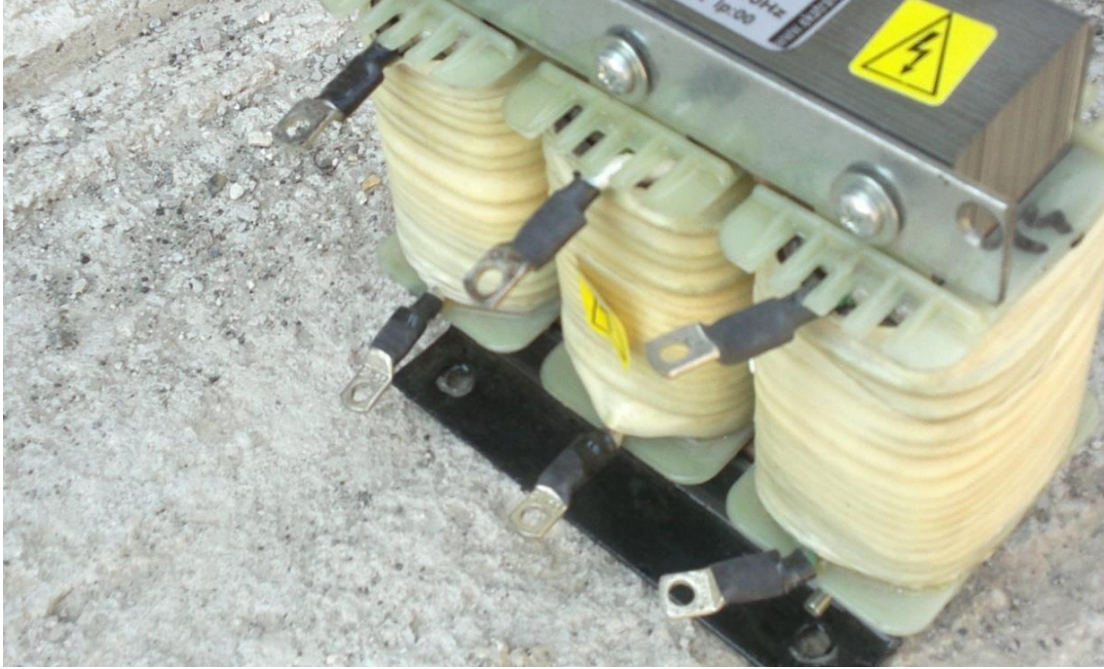
Pasif filtre, bir güç kondansatörü ile uygun değerinde bir indüktansın (reaktörün) seri bağlanması ile elde edilen rezonans devresidir. Böylece tesisin reaktif güç ihtiyacını karşılayan kompanzator, aynı anda harmoniklerin de süzülme işini yerine getirir ve böylece ucuz bir yatırımla filtreleme gerçekleşir. Bunun sonucunda tesisteki harmonik akımlar, başıboş olarak cihazlardan devreyi tamamlamak yerine, kendisine düşük direnç gösteren filtrelere doğru gidecektir (Çorapsız, 2004). Bu yönteme ait prensip sema Şekil 7.10'da verilmiştir.



Şekil 7.10. Pasif filtre prensip şeması

Şekil 7.11 'de piyasada üretilen harmonik reaktör gösterilmiştir. Bu tür reaktörler arzu edilen güç değerine göre yapılır ve etiket değerlerinde O_c , gücü (VAR); p , güç faktörü ;

L, indüktans değeri (mH); I_n ve I_{max} , nominal ve maksimum çalışma akım (Amper) değerleri üretici firma tarafından yazılır.



Şekil 7.11. Harmonik filtre reaktörü

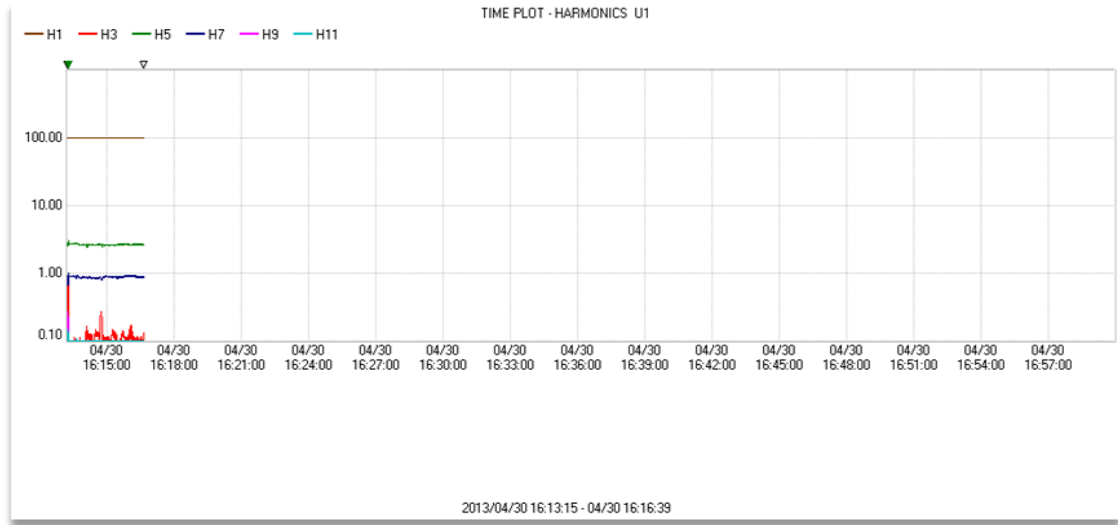
Bu sistemler tesis edilirken seçilecek olan endüktanslara, her firmanın kendi endüktansları için hazırladığı tablolara bakılarak karar verilmektedir. Bu seçim için bazı kriterler vardır. Bunların en önemlisi p faktörüne karar vermektir. Bu faktör;

$$p = X_L / X_C \quad (7.16)$$

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

p faktörü sistemde etkin olan harmonik derecesine göre seçilmelidir. Örneğin, 50 Hz. şebeke frekanslı sistemde 3. harmonik baskın ise, bu sistemi 189 Hz. de rezonansa getirecek (endüktans ve kompanzasyon sistemi arasındaki seri rezonans) p değeri % 7 olan endüktanslar seçilmelidir. Sistemde 5. harmonik baskın ise, bu sistemi 210 Hz. de rezonansa getirecek p değeri % 5,67 olan endüktanslar seçilmelidir.

Şekil 7.12’de de görüldüğü gibi baskın harmoniğimiz 5. harmoniktir. Burada amaç; harmoniği baskın olan sistemde sistemi 5. harmoniğin frekansı olan (5*50) Hz. de rezonansa getirilirse bu durumda 5. Harmoniğin bütün genliği kompanzasyon sistemine akacaktır, bu da kompanzasyon sistemine zarar verecektir. Bu yüzden sistem, sistemde mevcut olan baskın harmoniğin frekansına yakın frekanslarda rezonansa getirilmekte ve böylece sistemde baskın olan harmoniğin genliği önemli ölçüde azaltılmaktadır.



Şekil 7.12. Kompanze edilmiş sisteme ait gerilim harmoniklerinin genlikleri

Öyleyse sistemimizde 5. harmonik baskın olduğu için seçilmesi gereken p değeri % 5,67 dir. Bu değer üretici firmanın yapmış olduğu harmonik filtre reaktör etiketinde yazmaktadır. Bu yöntemle göre; sistemdeki kompanzasyon sisteminin değerlerine bakılarak firmalar tarafından oluşturulan endüktans seçim tablolarından uygun endüktans değerleri seçilerek kompanzasyon sistemine seri bağlanmalıdır.

Kompanzasyon sistemine seri bağlanan endüktanslar, kompanzasyon uçlarındaki gerilimin bir miktar yükselmesine sebep olacağından,

$$V_c = V / (1 - p)$$

$$V_c = (380) / (1 - 0,0567)$$

$$V_c = 403 \text{ V} \quad (7.17)$$

olur. Bununla birlikte 400 V kapasitörler, 440 V'a dayanacak şekilde imal edildiklerinden, $403V < 440 V$ olmaktadır. Böyle bir tesiste 400 V kapasitör kullanılabilir. Kapasitörün etiket gücünün, uygulamada işletme geriliminin karesiyle artıp veya azalması söz konusudur.

Eğer,

$$L_n = 2,45\text{mH}$$

$$p = \%5,67$$

$$Q_c = 12,5\text{kVAr} \quad (7.18)$$

olan bir filtre reaktörü, $U_c = 400 V$ bir kapasitöre seri bağlanırsa, 380 Volt şebekeye filtreden geçen miktar,

$$Q_c = Q_{cn} \times U_n^2 / U_{cn}^2 \quad (1-p)$$

$$Q_c = 12,5 \times 380^2 / 400^2 (1-0,0567)$$

$$Q_c = 11,9\text{kVAR} \quad (7.19)$$

olarak bulunmaktadır. Bu durumda kondansatör güçleri bir üst değer olarak 15 kVAR olarak seçilmelidir. Bununla birlikte, söz konusu sistemin rezonans frekansı baskın harmoğın frekansından uzaklaştırılmamalıdır. 15 kVAR'lık kondansatör gücünde seçilecek kondansatör gerilimimiz eğer 450V olursa bu durumda rezonans frekansımız aşağıda verildiği gibi elde edilmektedir.

$$f_r = U_{cn} \sqrt{f / (2\pi \times Q_{cn} \times L_n)}$$

$$f_r = 450 \sqrt{50 / (2 \times \pi \times 15 \times 2,45)}$$

$$f_r = 210 \text{ Hz} \quad (7.20)$$

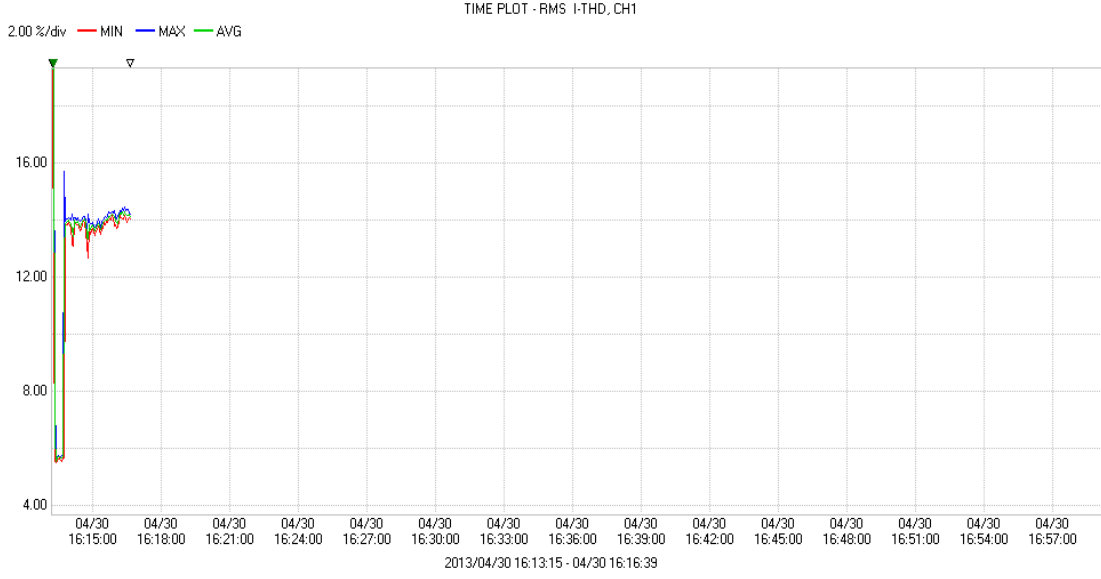
olmuş olacaktır. Şekil 7.13'de harmonik filtre reaktörünün kompanzasyon sistemine bağlantısı görülmektedir.



Şekil 7.13. Harmonik filtre reaktörün kompanzasyon sistemine bağlantısı

7.4. Harmoniklerin Güç Faktörüne Etkisinin Analiz Edilmesi

Buraya kadar yaptığımız hesaplamalarında şebeke ideale yakın, sinüsoidal olarak kompanzasyon hesaplamaları yapılmış ve yapılan hesaplamalarda Q_c , 12,5 kVAR'lık kondansatör değerinde güç katsayısı GF, değeri 0,98 'çıkarılmıştır. Oysa şebeke sinüsoidal durumdan uzaklaştıkça yapılan kompanzasyon hesaplamalarında güç faktörü değerinde sapmalar olmaktadır. Güç faktörüyle bilinen 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. Buna "PowerFactor " denir. Power Factor, $\cos \phi$ değerinden farklı olarak, harmonikler dâhil olan akım ile harmonikler dâhil olan gerilim arasındaki faz farkıdır. Bu iki değer arasında harmonikli ortamlarda denk.(7.21)' deki kadar bir fark oluşur. Şekil 7.14 'de sistemimiz kompanze edildikten sonra ki akım harmoniklerine ait (THDi) analizörümüzden alınan ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Görüldüğü gibi akım harmoniklerimiz %14 seviyelerindedir. Bu değerimiz IEEE-519 standartlarına göre uygun değildir (akım için. %5).



Şekil 7.14. Harmonik akımlarının % 14 seviyelerinde olması durumuna ait THDi grafiği

DPF faz kayması faktörü olmak üzere,

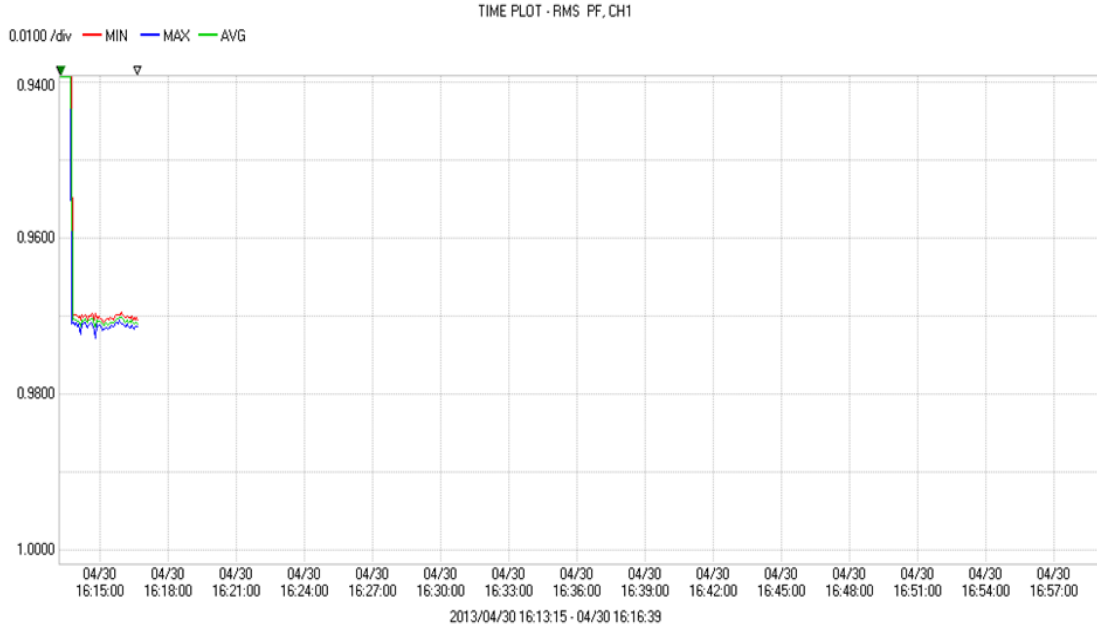
$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad DPF \quad (7.21)$$

görüldüğü gibi, Harmonik bozulmanın göstergesi olan THD değerinin artması ile birlikte PF, güç katsayısı değerinin azalacağı aşikârdır. Şekil 7.15’de de sistemin akım harmonikleri (THDi) değerinin % 13-14 mertebelerinde olması halinde, güç faktörü PF, ölçüm değeri sonucu görülmektedir.

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.14)^2}} \times 0,98$$

PF= 0,97 olarak bulunur. (7.22)

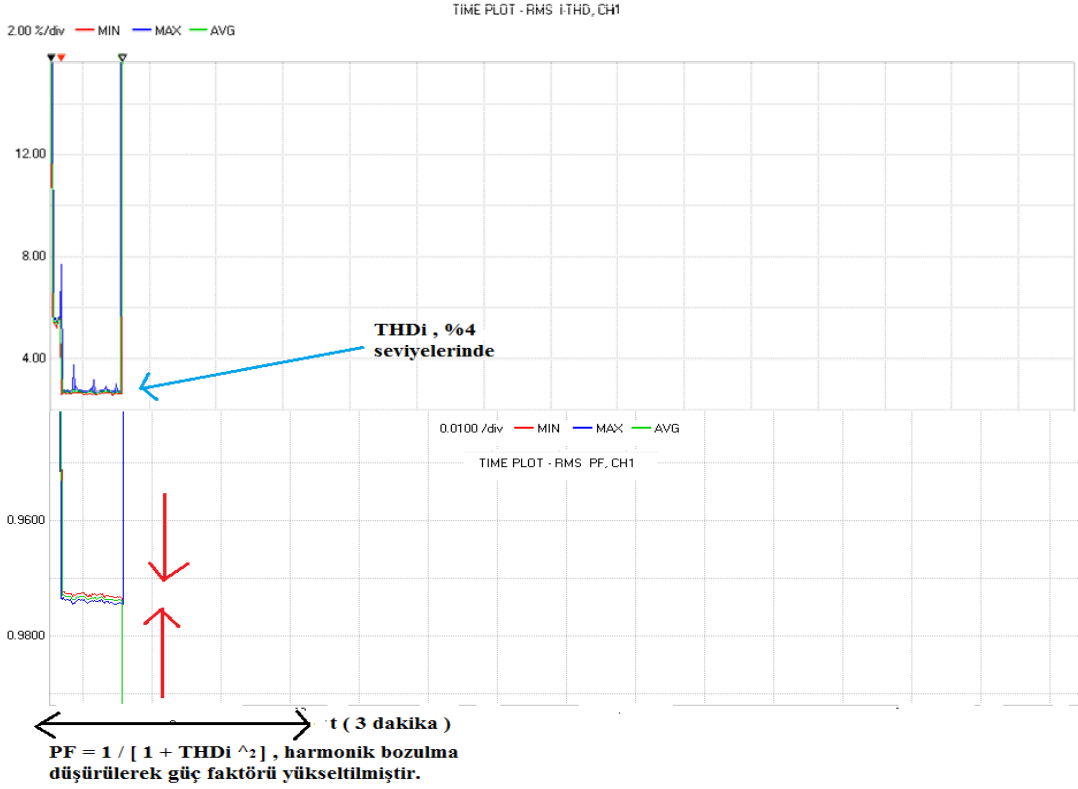
bağıntısından görüleceği gibi akımın sinüs formundan uzaklaşmasıyla güç faktörü değeri küçülmüştür.



Şekil 7.15. THDi değerinin % 14 olması durumunda güç faktörü PF değeri

Harmonik bozulma , % 14 değerlerindeki PF, güç katsayısı değeri 0,97' de kalmıştır. Sistem kompanze edilirken sisteminin sinüsoidal olması durumuna göre hesaplamalar yapılmıştır. Oysa görüldüğü gibi harmonik bozulmalar arttığında istenilen güç faktörü değerimize (PF = 0,98) ulaşmamız mümkün olmamıştır.

Harmonik filtre reaktörleri sisteme reaktif güç verirken aynı zamanda harmonik bozulmaları engellemektedir. Genellikle tesisler işletme esnasında güç faktörünü kondansatör ilavesi yaparak yükseltme yoluna gitmektedir. Oysa belirli bir değerden sonra sisteme kondansatör ilave edilerek güç katsayısı değeri yükseltilemez. Bu uygulamamızda gerçi, harmonik bozulma seviyemiz (%13-14) kabul edilir seviyelerin çok üstünde değildir, fakat harmonik bozulmaların çok yüksek olduğu tesislerde, filtreleme yapmadan kondansatör ilavesi yaparak güç faktörünü iyileştirme yoluna gidilmesi sistemde ki harmonik bozulumu daha da artıracak hemde güç faktörü değerini iyileştirmeye yarar sağlamayacaktır.



Şekil 7.16. THDi değerinin %4 seviyelerinde olması durumunda PF güç faktörü

Şekil 7.16'da görüldüğü gibi harmonik bozulma düşürüldüğünde güç katsayısı değerimiz az bir miktarda olsa yükseltilmiştir. Güç katsayısı değerinin, tüketicide filtreleme yapılarak 0,970 mertebelerinden 0,975 değerine çıkarılması çok fazla anlam ifade etmesede, bunun tüm ülke genelinde, tüm tüketicilerde yapıldığı varsayılırsa ülke ekonomisine büyük fayda sağlayacağı aşikârdır. Kondansatörler harmonik üreten kaynaklar değildirler, fakat şebekede zaten varolan harmoniklerin genliklerini artırıcı yönde etki yapabilirler, dolayısıyla kondansatör ilavesi yapmadan güç faktörünü artırmak daha sağlıklı bir çözüm olacaktır. İdeal bir kompanzasyon yapılabilmesi için şebeke harmoniklerinin azaltılması gerekmektedir. Harmonik bozulmayı (THD,% 3-4) düşürdüğümüzde güç katsayısı değerimiz (yaklaşık olarak, $PF = 0,98$) yükselmiştir. Şebeke harmoniklerinin filtreleme yapılarak azaltılması güç katsayısını değerini ilave kondansatör eklemeden yükseltecektir. Bu da bize ideal bir kompanzasyon olanağı sağlayacaktır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinde güç katsayısının yükseltilmesi için ideal bir kompanzasyon sisteminin tasarımın nasıl yapılması gerektiği araştırılmıştır. İlk olarak, harmoniklerin güç kompanzasyonu ve güç faktörü üzerine etkileri incelenmiştir. Daha sonra harmonik eliminasyonu için etkili ve ekonomik bir yöntem olan pasif filtreleme yöntemi yapılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Reaktif güç kompanzasyonu ile yükün çektiği görünür güç azaltılmış ve sistemde meydana gelen kayıplar en aza indirgenmiştir. Böylece, tüketicinin tesis tasarımındaki yatırım maliyeti (kablo, sigorta vs.) düşmüştür. Ayrıca, şebekeden çekilen reaktif gücün önemli bir kısmı kompanzasyon sisteminden karşılandığı için tüketicinin ödemesi gereken elektrik fatura maliyeti (işletme maliyeti) düşmekte aynı zamanda dağıtım hatlarından bu yük taşınmamaktadır buda ülke ekonomisine katkı sağlamaktadır.

2. Şebekeden veya yükten kaynaklı harmoniklerin güç faktörünü ve kondansatörlerin dayanma sürelerini olumsuz etkilediğinden sağlıklı bir kompanzasyon yapılması için harmoniklerin sınırlandırılması gerektiği tespit edilmiştir. Bu standartlar IEEE-519 standartlarında; akım için belirlenen THDi %5, gerilim için belirlenen THDv değeri ise %3 tür.

Gerçekleştirilen Pasif filtre çalışmalarında aşağıda ki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Şebekeye bağlanan bir yükün güç katsayısını yükseltmek için harmonik filtreleme ile birlikte kompanzasyon işleminin yapılması hem tüketici açısından hem de işletme açısından oldukça önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

2. Harmonik filtreleme yöntemlerinin özellikle aktif filtrelerin maliyetinin yüksek olması ve kullanışlı olmaması nedeni ile tercih edilmediği durumlarda hem maliyeti düşük hem de kullanışlı bir yöntem olan pasif filtrelerin kullanılabileceği gösterilmiştir.

3. Harmonik bozulmayı önleyici tedbirlerin alınmasının, kompanzasyon tesisi yapılması gibi zorunlu hale getirilmesinin hem tüketiciye hem de ülke ekonomisine katkı sağlayacağı söylenebilir.

KAYNAKLAR

Akın, B., 2001. Sinüsoidal Olmayan Şebekelerden Beslenen Lineer Olmayan Yüklerde, Harmonik Akım ve Gerilimlerin Güç Faktörü Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Anonymous., 1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE IAS Std.519-1992.

Arifoğlu, U., 2002. Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi, Alfa Bas. Dağ. İstanbul, 135-137.

Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R., Wood, A.R., 1997. Power System Harmonics, John Wiley & Sons, USA,

Arrilaga, J., Watson, N. R., 2003. Power System Harmonics, John Wiley & Sons, Ltd West Sussex, England.

Ay, S., 1996. Alçak Gerilim Tesislerindeki Gerilim Harmonikleri ve Filtre Tasarımı, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı: 95, Kasım-Aralık.

Batista,J., Afonso,J., Martins,J., 2003. Low-Cost Power Quality Monitor Based on a PC, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Rio de Jenerio, 9-11 July.

Bayram, M., 1977. Güç Katsayısının Düzeltilmesi ve Güç Kondansatörleri, Elektroteknik Mecmuası, 3-25, Mart

Bayram, M., 2000. Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Bilki, F., 2008. Reaktif Güç ve Kompanzasyonu Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Boyrazoğlu, B., Ünsar, Ö., Polat, B., 2007., Elektrik İletim Sisteminde Akım ve Gerilimdeki Harmonik Bileşenlerin Gerçek Zamanlı Ölçülmesi, II.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli/Türkiye, Mayıs.

Buhan,S.,Boyrazoğlu,B.,Ünsar,Ö.,Altıntaş,E.,Haliloğlu,B.,Polat,B.,Özedemirci,E.,2007. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Mobil Güç Kalitesi Ölçümleri, II.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli/Türkiye, Mayıs.

Chi-Jui,W., Wei-Nan,C., 1997. Developing a Harmonics Education Facility in a Power System Simulator for Power Engineering Education, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 12, No.1, February.

Costa,J., Pregitzer,R., Sousa,T., Batista,J., Afonso,J., 2005. A Case of Power Quality Assesment Using a Developed Power Quality Monitor, IEEE 1 st International Conference on Electrical Engineering Coimbra, Portugal,10-12 October.

Çorapsız, M. H., 2004. Pasif Harmonik Filtrelemede Pratik Yaklaşımlar , 3e Electrotech Aylık Dergisi, 1(116): 104-107 s.

Demirbaş, Ş., Bayhan, S., 2009. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Gerçek Zamanlı Ölçüm ve Analizi”, Gazi Üniv. Müh.Mim.Fak. Der., Cilt 24, No 3, 461-468.

Demirci, T., Kalaycıoğlu, A., Salor, Ö., Pakhuylu, S., İnan, T., Küçük, D., Güder M., can. T., Akkaya, Y., Bilgen, S., Çadırcı, I., Ermiş, M., 2008. Türkiye Elektrik İletim Sistemi için Yurt Çapında Güç Kalitesi İzleme Ağı ve Veri Değerlendirme Merkezi: Güncel Gelişmeler, Sinyal İşleme, İletişim ve Uygulamaları Kurultayı, Didim/Türkiye, Nisan.

Didem, E., 2005. Harmonikli Ortamlarda Kompanzasyon, I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, Mayıs.

Dugan R.C. vd., 2002. Electrical Power System Quality , Mc-Graw Hill, Second Edition.

Güler, Ö., 1995. Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Sakıncaları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Efe, Serhat B., 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

Eralp, F.Y., 1985. Mühendisler için Fourier Yöntemi ile Dalga Analizi, Nur Ofset Matbaası, İstanbul.

Erkan, E., 1996. Nonlinear Yüklerde Güç Faktörünün İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ersamut, R., 2009. Statik Var Kompanzasyonu Sistemlerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Filiz,C., 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Filtrelemelerin İncelenmesi,Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

Grady. W.N, Gilleskie. R.J., 1993. Harmonics and How They Relate to Power Factor, Proc. of the EPRI Power Quality, Issues & Opportunities Conference (PQA 93), San Diego, 13p.

Huang, S.J. and Wu, C.J., 1999. A Control Algorithm for Three-Phase Three-Wired Active Power Filters Under Nonideal Mains Voltages, Power Electronics, IEEE Transactions on, 14, 753-760.

İzmirlioğlu, I., 1990. Fourier Serileri ve Laplace Dönüşümleri, Marmara Üniversitesi Matbaa Eğitimi Bölümü, İstanbul.

Kakilli, A., Tunçalp, K. ve Sucu, M., 2008. Harmoniklerin Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemlerine Etkilerinin İncelenmesi ve Simülasyonu, Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bil. Dergisi, Sayı 1.Cilt 20 sf 109-115.

Karakas, A., 2000. Harmonikli Devrelerde Güç Kompanzasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kocatepe, C., 1994. Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kocatepe. C., Uzunoğlu, M., 2001. Harmoniklerin Sınırlanması ve Harmonik Standartları, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı: 150.

Kocatepe, C. Uzunoğlu, M. ve Yumurtacı, R., 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Lin,H., 2006. An Internet-Based Graphical Programming Tool for Teaching Power System Harmonic Measurement, IEEE Transactions on Education, Vol 49, No 3, August.

Mack G., Santoso S., 2001 Understanding Power System Harmonics, IEEE Power Engineering Review, November.

Makram E.B., Haines R.B., Girgis A.G., 1992. Effect of Harmonic Distortion in Reactive Power Measurement, IEEE Trans. on Ind. Appl. Vol.28, No.4, July/August, usa., 271p.

Mandal, R., Basu, S.K., Kar, A., Chowdhury.S.P., 1994. A Microcomputer Based Power Factor Controller., IEEE Trans. On Inds. Electron. Vol. 41, No.3 June 157p.

Marganitz, A., 1992. Power Measurement Of Periodic Current and Voltage by Digital Signal Processing. Eur. Trans. power, pp.117-123.

Miller, T.J.E., 1982. Reactive Power Control Systems, John Wiley & Sons inc. U.S., 15p.

Moreno, J., Paracula, J., 2000. A PC-based Tool for Evaluation of Harmonics and Power in Three- Phase Power Electronic Converters, IEEE 7 th Computers in Power Electronics Workshop, USA,July.

Mutlu,H. H., 2011. DSP Tabanlı Paralel Aktif Güç Filtresi İle Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,Konya.

Salor, Ö., Buhan, S., Ünsar, Ö., Boyrazoğlu, B., Altıntaş, E., Atalık, T., Haliloğlu, B., İnan, T., Kalaycıoğlu, A., Terciyanlı, A., Demirci, T., Özdemirci, E., Çadırcı, I., Ermiş, M., 2008. Mobile Monitoring System to take Nationwide PQ Measurements on Electricity Transmission Systems , Measurement.

Sankaran, C., 2002. Power Quality, CRC Press, New York.

Sheble, G.B., 1987. Reactive Power Basic, Problems and Solutions, IEEE Press, U.S., 167p.

Singh, B., Al-Haddad, K. and Chandra, A., 1999. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement, Industrial Electronics, IEEE Transactions on,46, 960-971.

Sucu M., 2003. Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyon, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Şekkeli,M., 2006. Hassas Bir Reaktif Güç Kompanzasyonu İçin Gerekli Güçlerin Hesabında Temel Bileşenlerin Kullanılması , KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 9, Sayı 2, 66-70, K.Maraş.

Tunçalp K., Kakilli, A., Sucu, M., 2003. Bir Alçak Gerilim Elektrik Enerji Tesisinde Harmonik Ölçüm Sonuçlarının Matlab’da Simülasyonu ve Pasif Filtre Uygulaması, Türkiye 9.Enerji Kongresi, İstanbul, Türkiye.

Türker, T., Öztürk, S., Alboyacı, B., Yörükeren, N., Çetinkaya, H. B., 2005. Harmonikli Yük Akımlarının Konut Bölgelerinde Kullanılan Transformatörler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli-Türkiye, Mayıs.

URL-1, [http:// www.seltaselektrik.com/teknik/181.pdf](http://www.seltaselektrik.com/teknik/181.pdf), 15 Mayıs 2013.

Vural, O., 2003. Alçak Gerilim Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Yalçın, B., 2000. Aktif Harmonik Filtreler, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:134, Mayıs.

Yılmaz, M., 2006. Elektrik Sistem Tasarımında Harmoniklerin Giderilmesi İçin Bir Analiz, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Uğur ERDEM, 02.02.1979 yılında doğdu. Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğini bitirdi. Sırası ile Keban EÜAŞ Grup Müdürlüğü bünyesinde Elazığ İli Karakoçan ilçesinde bulunan Özlüce Hidroelektrik Santralinde İşletme Mühendisi, Aras EDAŞ Erzurum İl Müdürlüğünde, Tahakkuk- Tahsilat Mühendisi ve Fırat EDAŞ Tunceli İl Müdürlüğünde Tahsilat Mühendisi olarak çalıştı. Halen aynı görevi sürdürmektedir.