

**AFYON ALKALOİDLERİ FABRİKASI' NDA
ENERJİ KALİTESİNİ ETKİLEYEN
HARMONİKLERİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hatice Zeliha TUĞCU

DANIŞMAN

Doç. Dr. Yüksel OĞUZ

ELEKTRİK EĞİTİMİ

Eylül, 2013

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AFYON ALKALOİDLERİ FABRİKASI' NDA
ENERJİ KALİTESİNİ ETKİLEYEN
HARMONİKLERİN İNCELENMESİ

Hatice Zeliha TUĞCU

DANIŞMAN

Doç. Dr. Yüksel OĞUZ

ELEKTRİK EĞİTİMİ

Eylül, 2013

TEZ ONAY SAYFASI

Hatice Zeliha TUĞÇU tarafından hazırlanan “Afyon Alkaloidleri Fabrikası’ nda Enerji Kalitesini Etkileyen Harmoniklerin İncelenmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 24./09/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi **Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak** kabul edilmiştir.

Danışman : Doç Dr. Yüksel OĞUZ

Başkan : Prof. Dr., Hasan ÇİMEN
Teknoloji Fakültesi,

Üye : Doç. Dr. Yüksel OĞUZ
Teknoloji Fakültesi,

Üye : Doç. Dr. İbrahim MUTLU
Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN
Enstitü Müdürü

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**AFYON ALKALOİDLERİ FABRİKASI'NDA ENERJİ KALİTESİNİ ETKİLEYEN
HARMONİKLERİN İNCELENMESİ**

Hatice Zeliha TUĞCU
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yüksel OĞUZ

Teknolojinin gelişmesi ile kullanımı artan non-lineer yükler, akım ve gerilimin sinüs formunda bozukluklar meydana getirmiştir. Bunun sonucu olarak sistemdeki yükler tasarımlarının tam sinüs dalgasına uygun olması nedeni ile sorunlar oluşturmuştur. Bu durumun kontrol altına alınabilmesi amacı ile enerji kalitesi tanımı oluşturulmuş ve Uluslar arası standartlar getirilerek bu sorunların aşılması amacı ile çalışmalar başlatılmıştır. Bu sorunun en büyük dezavantajı, olumsuz etkilerin bireysel olmayıp şebeke ile öncelikle komşu tesisleri ve silsile halinde de tüm enerji sistemini etkilemesidir.

Bu çalışmada Afyon Alkaloidleri Fabrikası'nın enerji sistemindeki harmoniklerin enerji kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerinin tespiti yapılarak çözüm önerileri sunmak amaçlanmıştır.

2013, x + 68 sayfa

Anahtar Kelimeler: enerji kalitesi, harmonikler, kompanzasyon sistemi.

ABSTRACT

M.Sc Thesis

INVESTIGATION OF HARMONICS AFFECTING THE QUALITY OF ENERGY USED IN OPIUM ALKALOIDS PLANT

Hatice Zeliha TUĞCU

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electric Education

Supervisor: Doç. Dr. Yüksel OĞUZ

Non-linear loads that increasing use of with the development of technology, caused disorders in the sinusoidal form of current and voltage signals. As a result the system are designed in accordance with the perfect sine wave, cause some problems.

In order the situation control was created definition of energy quality and international standards. The most important disadvantage of this problem, negative effects doesn't local, rather impress before neighbour systems then all energy network.

In this research, was aimed that determine energy quality problems and analyze especially harmonic effects and suggest solutions in Opium Alkaloids Plant.

2013, x + 68 pages

Key words ; energy quality, harmonics, compensation systems.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın konusu, çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve her türlü teknik desteği sağlayan ve çalışmayı tamamlamamda yüreklendiren tez danışmanım Doç. Dr. Yüksel OĞUZ' a ve desteklerini eksik etmeyen iş yeri amirlerim ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Hatice Zeliha TUĞCU
AFYONKARAHİSAR, 2013

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
RESİMLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Harmoniklerin Tarihçesi	3
2.2 Harmoniklerin Tanımı	3
2.3 Akım Harmonikleri ile Gerilim Harmonikleri arasındaki ilişki	5
2.4 Harmoniklerin Matematiksel Olarak Tanımlanması	5
2.4.1 Fourier Serisinin Kullanımı	5
2.4.2 Harmonik Analizi	6
2.4.3 Harmonikli Sistemlere Ait Matematiksel Tanımlamalar	8
2.4.3.1 Distorsiyon Gücü (D)	9
2.4.3.2 Toplam Harmonik Distorsiyonu Gücü (THD)	10
2.4.3.3 Tekil Harmonik Distorsiyonu (HD)	11
2.4.3.4 Toplam Talep Distorsiyonu (TDD)	11
2.4.4 Harmonik Seviyeleri	11
2.5 Harmonik Üreten Elemanlar	13
2.5.1 Anahtarlanabilir Güç Kaynakları	13
2.5.2 Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları ve Balastları	14
2.5.3 Transformatörler	14
2.5.4 Generatörler	16
2.5.5 Doğrultucular (Konvertörler)	17
2.5.6 Ark Fırınları	18
2.5.7 Diğer Harmonik Kaynaklar	19
2.6 Harmoniklerin Yapmış Olduğu Etkiler	20
2.6.1 Harmonik Akımların ve Gerilimlerin Yol Açtığı Sorunlar	20

2.6.1.1 Akım Harmoniklerinin Genel Etkileri.....	20
2.6.1.2 Gerilim Harmoniklerinin Genel Etkileri.....	21
2.6.2 Harmonik Cihazlar Üzerindeki Etkileri.....	21
2.6.2.1 Transformatörlere Etkisi.....	21
2.6.2.2 Motorlara Etkisi	22
2.6.2.3 Kontrol Cihazları Üzerinde Etkileri	22
2.6.2.4 Ölçü Aletleri Üzerinde Etkileri.....	23
2.6.2.5 Nötr İletkende Etkisi	24
2.6.2.6 Kablolara Etkisi.....	24
2.6.2.7 Devre Kesicilere Etkisi.....	25
2.6.2.8 Kondansatörlere Etkisi	25
2.6.2.9 Yalıtımın Delinmesi	26
2.6.2.10 Endüksiyon Tip Sayaçlara Etkisi	26
2.6.2.11 Sesli ve Görüntülü İletişim Araçlarına Etkisi	27
2.6.2.12 Mikro Bilgi İşlemciler ve Bilgisayarlara Etkisi	27
2.6.3 Harmoniklerin Kompanzasyon Sistemine Etkileri.....	28
2.6.3.1 Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkisi	28
2.6.3.2 Harmoniklerin Rezonans Etkisi	32
2.6.3.3 Harmoniklerin Reaktif Güç Faktörüne Etkisi	35
2.7 Harmoniklerin Giderilmesi.....	35
2.7.1 Tasarım Aşamasında Alınacak Tedbirler.....	36
2.7.1.1 Generatörlerde Alınabilecek Tedbirler.....	36
2.7.1.2 Dönüştürücülerde Alınabilecek Tedbirler	36
2.7.1.3 Transformatörlerde Alınabilecek Tedbirler.....	36
2.7.2 Harmonik Filtrelerin Kullanılması.....	36
2.7.2.1 Pasif Filtre.....	37
2.7.2.2 Aktif Filtre	38
2.8 Harmonik Standartları.....	39
3. MATERYAL ve METOT	41
4. BULGULAR	49
5. SONUÇ	63
6. KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Amper
AC	Alternatif akım
AGDO	Alçak Gerilim Dağıtım Odası
BDM	Bolvadin Dağıtım Merkezi
C	Kapasitans
ÇDM	Çay Dağıtım Merkezi
D	Distorsiyon Gücü
DC	Doğru akım
dpf	Kayma faktörü
f	Frekans
GKR	Reaktif Güç Kontrol Rölesi
HD	Tekil Harmonik Distorsiyonu
Hz	Hertz
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
KAK	Kaçak akım koruma şalterleri
L	Endüktans
P	Aktif güç
pf	Güç faktörü
Q	Reaktif güç
R	Direnç
Rms	Efektif değer
S	Görünür güç
tan	tanjant
TDD	Toplam Talep Distorsiyonu
THD	Toplam Harmonik Distorsiyonu
W	Watt
UPS	Kesintisiz Güç Kaynağı
V	Volt
VA	Volt Amper
VAR	Volt Amper Reaktif
V	Gerilim
Vo	DC bileşeni
w	açısal frekans
X	Reaktans
Z	Eşdeğer reaktans

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Harmonik Bileşenler.....	4
Şekil 2.2 Harmonikli bir sinyalin bileşenleri.....	7
Şekil 2.3 Ortalama değer gösteren ve etkin değer gösteren ölçü aletlerinin ölçüm değerleri.....	23
Şekil 2.4 Bilgisayarlara ait harmonik distorsiyonu	27
Şekil 2.5 Aktif güç filtresinin prensip şeması	39
Şekil 4.1 Trafo-2'ye ait 3 faz ve nötr akım değerleri.....	50
Şekil 4.2 Trafo-2'ye ait akım, hat gerilim ve faz –nötr arası gerilim harmonikleri	50
Şekil 4.3 Ekstraksiyon -1'ye ait akım, fazlar arası gerilim ve faz –nötr arası Gerilim harmonik değerleri.....	52
Şekil 4.4 Ekstraksiyon -2'ye ait akım, fazlar arası gerilim ve faz –nötr arası gerilim harmonik değerleri.....	53
Şekil 4.5 Pres hattına ait akım değerleri.....	54
Şekil 4.6 Pres'e ait akım, fazlar arası gerilim ve faz –nötr arası gerilim harmonik değerleri.....	55
Şekil 4.7 Seperator'e ait 3 faz ve nötr hattı akım değerleri.....	55
Şekil 4.8 Seperator'e ait akım, fazlar arası gerilim ve faz –nötr arası gerilim harmonik değerleri.....	56
Şekil 4.9 Trafo-2'ye ait 3 faz ve nötr akım dalga şekilleri.....	56
Şekil 4.10 Trafo-2'ye ait T fazının tekil harmoniklerinin grafiksel gösterimi.....	57
Şekil 4.11 Pres'e ait 3 faz ve nötr dalga şekilleri.....	57
Şekil 4.12 Pres'e ait nötr hattının tekil harmoniklerinin grafiksel gösterimi.....	58
Şekil 4.13 Seperator'e ait 3 faz ve nötr dalga şekilleri.....	58

Şekil 4.14 Seperator'e ait nötr hattının tekil harmoniklerinin grafiksel gösterimi.....	59
Şekil 4.15 Ekstraksiyon-1'e ait 3 faz ve nötr dalga şekilleri.....	59
Şekil 4.16 Ekstraksiyon-1'e ait nötr hattının tekil harmoniklerinin grafiksel gösterimi	60
Şekil 4.17 Ekstraksiyon-2'e ait 3 faz ve nötr dalga şekilleri.....	60
Şekil 4.18 Ekstraksiyon-2'e ait nötr hattının tekil harmoniklerinin grafiksel gösterimi	61
Şekil 4.19 Ekstraksiyon-3'e ait 3 faz ve nötr dalga şekilleri.....	61
Şekil 4.20 Ekstraksiyon-3'e ait nötr hattının tekil harmoniklerinin Grafiksel gösterimi.....	62
Şekil 4.21 Ekstraksiyon-4'e ait nötr hattının tekil harmoniklerinin grafiksel gösterimi	62

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Reaktif güç kontrol rölesi.....	41
Resim 3.2 RGK'nin değer aldığı 3 adet akım trafosu.....	42
Resim 3.3 Enerji Analizörü.....	44
Resim 3.4 Enerji analizörü ile ölçüm yapılması.....	45
Resim 3.5 Alçak Gerilim Dağıtım Odası.....	46
Resim 3.6 Kontaktörlü kompanzasyon sistemi.....	46
Resim 3.7 Kompanzasyon sisteminde kullanılan kondansatörler.....	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 Trafo-2'ye ait dpf, pf ve tanjant değerleri	51
Çizelge 4.2 Ekstraksiyon-2' ye ait dpf, pf ve tanjant değerleri.....	53

1.GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesine paralel olarak evlerde ve sanayide kullanılan cihazlar her geçen gün daha fazla elektronik donanım içermektedir. Bu cihazlar yapıları gereği bir yandan enerji kalitesini bozarken bir yandan da beslendikleri enerjinin kalitesine karşı daha hassaslaşmaktadırlar.

20. yüzyıldan önce endüstride elektriğin ağırlıklı kullanım alanı motorlar, aydınlatma ve ısıtıcı cihazlar idi. Bu kullanımın temel frekansa etkisi çok küçüktü. Lineer yükler olarak adlandırılan bu yüklerin kullanımında akımın artış ve düşüşü gerilim ile doğru orantılıdır.

Geçtiğimiz yıllarda bazı endüstri kollarında verimi artırmak için doğrultucu, güç kaynakları gibi cihazları kullanılmaya başlandı. Bu cihazlarda akım ile gerilim orantılı olmadığından dolayı sinüs dalgası bozuldu. Bu yükler doğrusal olmayan (non-lineer) yükler olarak adlandırılır.

Doğrusal olmayan yüklerin kullanımındaki artış ile birlikte sistemlerde pek çok sorunlar ortaya çıktı. Bunun sonucunda da enerji kalitesi kavramı ile birlikte uluslararası standartlar belirlendi.

Kaliteli Elektrik enerjisi, şebekenin tanımlanan bir noktasında, gerilimin genlik ve frekansının anma değerlerini koruması ve gerilim dalga şeklinin sinüs formuna uygun şekilde bulunmasıdır.

Enerji kalitesinin belirlenmesinde akım, gerilim ve frekansın aşağıda sıralanmış parametrelerinin uluslararası standartlara uygun olup olmadığı incelenir. Bu parametreler şunlardır.

- Akım-Gerilim Harmonikleri
- Gerilim düşmesi ve yükselmesi (Sags & Swells)
- Transient
- Kırpışmalar (Flicker)

- Nötr-Toprak arası potansiyel farkı
- Fazlar arası akım ve gerilim dengesizliği
- Frekans değişimi
- K faktör

Harmonikler güç kalitesinin en önemli ölçülebilir parametrelerinden biridir. Harmoniklerin ekonomik etkilerinden dolayı güç sistemlerinin ayrıntılı bir şekilde izlenmesi bir ihtiyaç olmuştur (Mazumdar 2006).

Harmoniklerin varlığı, elektrik sistemlerinin çalışmayacağı anlamına gelmez. Diğer güç kalitesi olayları gibi, harmoniklerin varlığında da çalışmanın sürekliliği, güç iletim sisteminin sağlamlığına ve donanımın hassasiyetine bağlıdır. Bir fabrika yüksek harmoniklerin kaynağı olurken, diğer bir taraftan ise normal çalışmasına devam edebilir. Bu harmonik kirlenme çoğu kez şebeke elektrik dağıtım sistemi üzerinden taşınabilir ve aynı sistemde ondan daha duyarlı komşu tesisleri de etkileyebilir.

Bu çalışmada bir fabrikada enerji sistemindeki harmonik bileşenlerin enerji kalitesindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Harmoniklerin Tarihçesi

Alternatif Akımın Ortaya çıkması ile harmonik kavramı ilgi alanı oluşturmuştur. Trafoların non-lineerliği, Y/ Δ yol vermedeki 3. Harmonik oluşumu Clinker ve Curtis tarafından 1914’ de araştırılmıştır. Trafoların dalga şekilleri Steinmetz tarafından 1916–17’ de verilmiş. Harmonik dalganın azaltılması için filtre önerilmiştir (Filiz 2006).

1930’ lu ve 1940’ lı yıllardaki literatürde, transformatörlerden yayılan harmoniklerin sebepleri ile ilgili Rissik’ in 1935’ de Distorsiyon ile yayınları vardır. Pender ve Delmar 1967 Yılında Trafolar için 3 ve 3’ ün katları Harmonikleri geniş olarak araştırmışlardır. 1971 Yılında Kimbark’ın Evirici ve Doğrultucu için Hat komütasyonu karakteristiği çalışması, harmonik araştırmalarının ana kaynağını oluşturmaktadır (IEEE PES 1984). IEEE 1984 yılında Harmoniklerin tarihi gelişimini yayınlamıştır.

2.2 Harmoniklerin Tanımı

Alternatif akım tesislerinde akım ve gerilim dalga seklinin tam sinüs fonksiyonu şeklinde olması istenir. Bunun sağlanabilmesi için kaynağın sinüzoidal olmasının yanında yükün de doğrusal olması gerekir. Ancak sisteme bağlanan ve sayıları gün geçtikçe artan dönüştürücüler, ark fırınları ve güç elektroniği elemanları gibi doğrusal olmayan yüklerin akım-gerilim karakteristikleri de doğrusal olmadığı için akımın ve gerilimin dalga seklini sinüs seklinden uzaklaştırırlar. Temel frekanstan farklı frekans değerlerine sahip akım ve gerilim sinyallerinin elektrik dağıtım sistemlerinde oluşmasına harmonik bozunma adı verilir (Dugan et al. 2002).

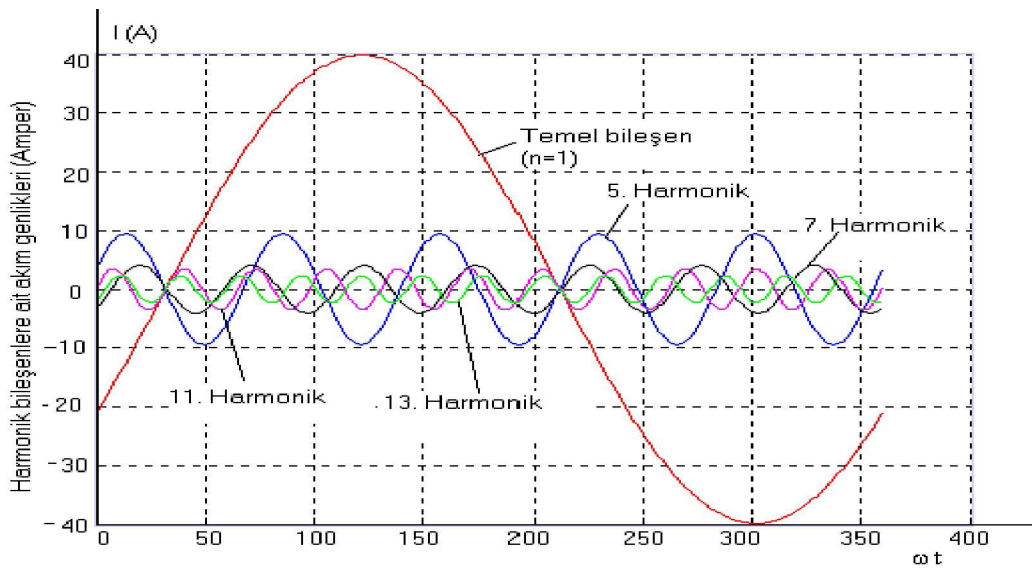
Elektrik sistemlerinde enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtımı sırasında, akım ve gerilimin 50 Hz frekansta salınan ve sinüs eğrisine çok benzer bir biçimde olması istenir. Bu koşul, elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir. Ancak işletmedeki cihazların lineer olmayan elemanlarından gelen etkilerden dolayı akım ve gerilim, sinüs formundan uzaklaşır.

Bu anlamda harmonik; Güç sistemlerinde akım ve/veya gerilimin dalga şeklinde meydana gelen periyodik sürekli hal bozulmaları olarak tanımlanabilir.

Harmonikler, enerji kalitesini bozan en büyük etkenlerden birisidir. Doğrusal olmayan yüklerin oluşturduğu harmonik bileşenleri, sistemde harmonik gerilimlerin oluşmasına neden olur. Böylece, kendileri harmonik üretmeyen elemanlar da harmonik kirlenmeye maruz kalabilirler (Kocatepe ve ark. 2003).

Sinüzoidal olmayan dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından oluşmaktadır. Temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalara “harmonik bileşen” adı verilir.

Güç sistemindeki sinüzoidal dalganın simetrisinden dolayı 3., 5., 7., 11 gibi tek harmonik bileşenleri bulunur. Çift harmonikli bileşenler bulunmaz. Şekil 2.1’ de yarı periyottaki temel bileşen ve harmonik bileşenler gösterilmiştir (Adak 2003).



Şekil 2.1 Harmonik Bileşenler (Adak 2003)

Harmonikler, genel olarak nonlineer elemanlar ile nonsinüzoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması sinüzoidal dalganın bozulması anlamına gelir (Şenyurt 2005).

2.3 Akım Harmonikleri ile Gerilim Harmonikleri Arasındaki İlişki

Harmonikler akım harmonikleri olarak oluşur ve olumsuzlukların çoğu da bu akımların etkisi ile ortaya çıkmaktadır; bu nedenle, enerji tesislerinde harmonikler söz konusu edildiğinde akım harmonikleri anlaşılmalıdır (Chapman 2001).

Harmonik içeren bir akım, yüksek bir empedans yolunda veya rezonans devresinde akarsa, gerilimde harmonik bileşenler içermeye başlar. Bu, dolaylı bir etkidir. Akım harmoniklerinin doğrudan etkisi, akım yolundaki elemanlarda ek ısınma ve kayıplara yol açmasıdır. Harmonik içeren bir akım, yüksek bir empedans yolunda veya rezonans devresinde akarsa, gerilimde harmonik bileşenler içermeye başlar. Bu, dolaylı bir etkidir. Akım harmoniklerinin doğrudan etkisi, akım yolundaki elemanlarda ek ısınma ve kayıplara yol açmasıdır.

Sistemin herhangi bir yerinde oluşan harmonik akımlarının her zaman sorunlara neden olacağı söylenemez. Güç sistemi herhangi bir sorun oluşturmadan önemli miktarda harmonik akımı taşıyabilir. Bir sorunun ortaya çıkması için harmonikli akımın yüksek bir empedans yolunda veya iletişim devrelerinde akması gerekir.

Güç sisteminde gerilim, harmonik bileşenler içerdiğinde bundan tüm yükler etkilenir. Harmonik içeren bir akım ise sadece harmonik akımı üreten bir yüke etki edebilir. Gerilimdeki harmoniklerin nedeni sistem empedansında akan harmonikli bir akım olduğundan, gerilim harmoniklerini önlemenin yolu, harmonik akımlarının akışını kontrol ederek gerilim harmoniklerine neden olabilecekleri yerlerden uzak tutmaktır.

2.4 Harmoniklerin Matematiksel Olarak Tanımlanması

2.4.1 Fourier Serisinin Kullanımı

Sinüsoidal şeklindeki bu bozulmalar istenilen bir durum değildir. Bu tür işaretlerle çalışan elemanlarda ya da yüklerde fazladan güç kaybı ve arızalar meydana gelir. Bu durum alternatif akımın kullanıldığı ilk günlerden bu yana var olmuştur. Bilim adamları

sinüsoidal şekildeki bozulmaları belirli sınırlar içinde tutmak veya tamamen yok etmek için çözümler aramışlardır. Fransız fizikçisi ve matematikçisi Joseph Fourier 1882 yılında çözüm olabilecek bir teori geliştirmiştir Buna göre nonsinüzoidal periyodik dalgaların genlik ve frekansları farklı birçok sinüzoidal dalgaların toplamından oluştuğu ve bu tür dalgaların genlik ve frekanslarının temel dalga frekansının tam katları sinüzoidal dalgalara ayrılabilceği gösterilmiştir.

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

Harmonikli sinyal, Fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinde ifade edilebilir. Harmonik, temel sinüzoidal dalga (50Hz) dışındaki dalga şekillerine denir. Buna göre 150 Hz üçüncü harmonik, 250 Hz besinci harmonik, 350 Hz yedinci harmonik bileşen olarak adlandırılır (Şenyurt 2005).

Pozitif ve negatif yarı periyotlarda aynı şekil ve büyüklükte olan simetrik dalga şekillerinde tüm çift sayılı harmonikler sıfırdır. Yarım dalgalı redresörlerin yaygın olarak kullanıldığı dönemlerde sık karşılaşılan çift harmoniklere günümüzde oldukça ender rastlanılmaktadır (Chapman 2001).

2.4.2 Harmonik Analizi

Periyodik dalga şeklinin temel bileşeni ve daha yüksek dereceli harmoniklerinin genlik ve faz açılarının hesaplanması işlemi harmonik analizi olarak adlandırılmaktadır (Demirkol 2006).

Sinüsoidal olmayan bir dalganın sinüsoidal dalgaların toplamı olarak ifade etmek için yaygın matematiksel ifade ve formüller kullanılabilir.

Harmonikli bir fonksiyon Fourier serisi ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$v(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t) + V_2 \sin(2\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) + \dots + V_n \sin(n\omega t) \quad (2.1)$$

V_0 : DC bileşeni

V_n : n. harmoniğin tepe değeri

Temel bileşen frekansı f ise,

2. harmoniğin frekansı 2f,

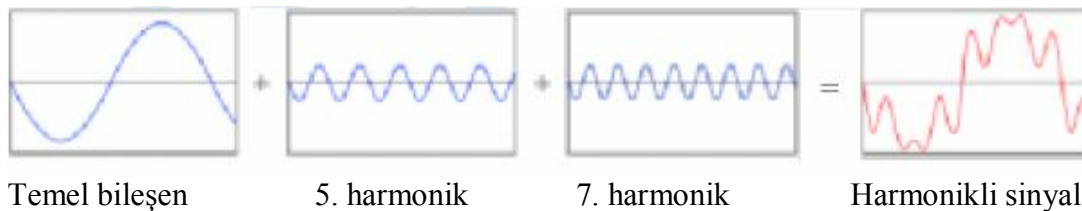
3. harmoniğin frekansı 3f

n. harmoniğin frekansı nf'dir.

Harmoniklerle çalışırken frekansların yerine harmonik numaraları üzerinden gitmenin nedeni Türkiye'de Avrupa ülkelerinde temel frekans 50 Hz iken ABD ve Japonya'da temel frekansın 60 Hz olmasıdır.

Temel frekans 50 Hz alındığında 2. harmonik 100 Hz, 3. Harmonik ise 150 Hz frekansta olur. Temel frekans 60 Hz alındığında 2. harmonik 120 Hz, 3. Harmonik ise 180 Hz frekansta olur.

Sinüzoidal olmayan bir gerilim veya akımın elektriksel donanıma olan etkilerini incelemek için, her bir harmoniğin etkilerini tek tek incelemek sonra da bunları vektörel olarak toplamak yeterlidir. Şekil 2.2' de sinüzoidal harmoniklerin bir araya gelerek sinüzoidal olmayan bir dalga oluşturmaları ve bu dalgayı oluşturan bileşenler görülmektedir.



Şekil 2.2 Harmonikli bir sinyalin bileşenleri

Bir gerilim veya akım fonksiyonunun pozitif ve negatif kısımları benzer özellikteyse

(noktasal simetri varsa), fonksiyonun yalnızca tek sayılı harmonikleri oluşabilir.

Enerji sistemlerinde görülen dalgalar da bu özellikte olduğundan dolayı, dağıtım şebekelerinde çift sayılı harmoniklere pek rastlanmaz, çoğunlukla tek sayılı harmonikler görülür.

Harmonikler çoğu zaman yalnızca tamsayı olarak düşünülse de bazı durumlarda tamsayı olmayan harmonik akımları ve gerilimleri de meydana gelebilir. Bunlara interharmonikler denir. İndüksiyon fırınları, ark ocakları ve kaynak makineleri bu duruma iyi birer örnektir. Bu cihazlar, yol alma süresince ondalıkli harmonikler üretirler, ancak normal çalışma rejimine geçtiklerinde ondalıkli harmonikler kaybolur, yalnızca tamsayıli harmonikler kalır. Ayrıca motorların hız kontrolünde kullanılan sürücülerdeki inverter de akım interharmonikleri üretebilir (Engin 2008).

Bir dağıtım sistemine yayılan harmonik akımlar, bu akımların taşınması ile alakası olmayan alt devrelerde gerilim harmonikleri olarak taşınırlar. Ölçülen gerilim ve akım değerlerinin ayrı ayrı net bir şekilde tanımlanarak kullanılması son derece önemlidir (Chapman 2001).

Akım harmonikleri spektrumu hakkında bilgi edinmeden doğru sonuçlara ulaşmak mümkün değildir, buna rağmen toplam harmonik bozulmalarını (THD) gösteren rakamlar hala kullanılmaya devam edilmektedir (Chapman 2001).

2.4.3 Harmonikli Sistemlere Ait Matematiksel Tanımlamalar

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

1. Distorsiyon Gücü (D)
2. Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)
3. Tekil Harmonik Distorsiyonu (HD)

4. Toplam Talep Distorsiyonu (TDD)

2.4.3.1 Distorsiyon Gücü (D)

Akım ve gerilimi sinüsoidal biçimde olan lineer bir devrede güçler arasında eşitlik

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

ile sağlanır.

Harmonikli akım veya gerilim içeren sistemlerde güç ifadeleri arasında

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.3)$$

şeklinde bir bağıntı vardır.

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (2.4)$$

şeklinde bulunabilir ve birimi (VAr)' dir.

Burada,

S: Görünür güç (VA),

P: Aktif güç (W),

Q: Reaktif güç (VAr),

D: Distorsiyon gücü (VAr).

Harmonikler güç tüketmezler, ancak sistem kapasitesini azaltırlar. Hatları gereksiz yere meşgul ettiklerinden güç çeken yük miktarını azaltırlar (Suriadi 2006).

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

2.4.3.2 Toplam Harmonik Distorsiyonu Gücü (THD)

Bozulmanın miktarını hesaplamak için Toplam Harmonik Bozulma (THD) terimi kullanılır. THD değeri, tüm harmonik akımların veya gerilimlerin toplam etkin değerinin temel akımın veya gerilimin etkin değerine oranıdır.

THD genellikle % olarak ifade edilir. Bu değer, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin, tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını belirlemek için kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga şekli için THD sıfırdır.

Sistemdeki harmoniklerin sınırlandırılmasını amaçlayan standartlarda yaygın olarak kullanılan THD, akım ve gerilim için ayrı ayrı tanımlanmaktadır.

Gerilim için,

$$THD_V = \sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2)} \quad (2.5)$$

şeklindedir. Akım için ise,

$$THD_I = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2)} \quad (2.6)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Burada,

THD_I : Akımın Toplam Harmonik Distorsiyonu,

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

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

V_1 : Devreye uygulanan gerilimin temel frekanstaki etkin değeri,

I_1 : Devreden geçen akımın temel frekanstaki etkin değeridir.

2.4.3.3 Tekil Harmonik Distorsiyonu (HD)

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

$$HD_V = V_n / V_1 \quad (2.7)$$

$$HD_I = I_n / I_1 \quad (2.8)$$

olarak tanımlanır.

HD_V : Gerilimin n . derecede harmonik distorsiyonu,

HD_I : Akımın n . derecede harmonik distorsiyonudur.

2.4.3.4 Toplam Talep Distorsiyonu (TDD)

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

$$TDD = THD_I / I_1 \quad (2.9)$$

şeklinde tanımlanır.

Burada,

TDD : Toplam Talep Distorsiyonu,

I_1 : Yük tarafından, besleme sisteminden çekilen temel frekanslı akımdır (Demirkol 2005).

2.4.4 Harmonik Seviyeleri

Değişken hız kontrolörü, kesintisiz güç kaynakları (UPS) üniteleri ve doğru akım (DA) dönüştürücülerinde genellikle 3-faz köprü sistemi esas alınır ve DA çıkışında, her bir yarı periyotta (her fazın yarı devir sürecinde) altı darbe olduğundan bu sistemler ‘altı-darbeleri köprü’ olarak tanımlanmaktadır (Chapman 2001). Cihaz içerisinde diyot ve

tristörler sayısı 6 adet veya 12 adet kullanılarak 6 darbeli veya 12 darbeli sistemler oluşturulur.

6 darbeli bir sistem için;

$$n = hq + 1 \quad (2.10)$$

h: darbe sayısı,

q: ardışık tam sayılar ise;

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

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

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

$$n = 6.4 + 1 = 23 \text{ ve } 25 \text{ gibi harmonik akımlar üretilmektedir.}$$

Harmoniklerin genliği oniki-darbeli bir köprü kullanılarak önemli ölçüde azaltılabilir. Bu, aralarında 30 derece faz farkı olan bir yıldız ve bir üçgen transformatör sargısından beslenen iki adet altı-faz köprü demektir.

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

$$\% = 100 / n \quad (2.11)$$

formülü ile hesaplanabilir.

Örnek;

$$5. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 5 = \% 20$$

$$7. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 7 = \% 15$$

$$11. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 11 = \% 9$$

$$13. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 13 = \% 8$$

$$17. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 17 = \% 6$$

$$19. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 19 = \% 5$$

$$23. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 23 = \% 4$$

$$25. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 25 = \% 4$$

2.5 Harmonik Üreten Elemanlar

Elektrik üreticileri, dağıtıcı firmalar ile elektriği kullanan müşteriler elektrik enerjisinin iyi kalitede olmasını isterler. Ancak gerilim ve akım arasında lineer bağıntının olmayan yükler besleme gerilimini ve akımını bozarlar. Bu yükler, genel olarak ark prensibine uygulayan cihazlar, gaz deşarjlı aydınlatma armatürleri, demir çekirdekli sargı bulunduran makineler, yarı iletken teknolojisinin uygulandığı elektronik cihazlar olarak sıralanabilir.

Güç elektroniğinde yarı iletken teknolojisinin kullanımındaki büyük artış teknolojinin gelişmesine büyük katkı sağlamaktadır. Ancak kullanımı hızla artan bu cihazlar enerji kalitesinde daha önce önemsenmeyecek düzeydeki bazı bozulmaların oldukça büyük değerlere ulaşmasına neden olmuştur.

Ürettikleri harmonikler ile enerji kalitesini bozan başlıca yükler şunlardır.

2.5.1 Anahtarlabilir Güç Kaynakları

Günümüzde elektronik ünitelerin çoğunda anahtarlabilir güç kaynakları (SMPS) kullanılmaktadır. Bu sistemlerde indirici transformatör ve redresör yerine bir kapasitör bataryasını doldurarak istenilen çıkış gerilim ve akım değerlerine uygun gücü üreten bir doğrultucu bulunmaktadır. Hem maliyet hem de boyutun düşürülmesinden dolayı kullanım alanı gittikçe artan bu sistemler diğer sistemler gibi sürekli akım çekmek yerine çalışmalarının belli zamanlarında darbeler halinde 3. Ve 5. Harmonik içeren akımlar çekerler.

Hatlarda ve nötr-toprak bağlantılarındaki yüksek frekans bileşenlerini süzmek üzere besleme girişinde basit bir filtre kullanılmaktadır. Ancak, girişe geri dönen harmonik akımlara karşı bu filtrenin etkinliği söz konusu olmaz. Tek fazlı UPS üniteleri ile SMPS çok yakın özellikler taşımaktadır (Chapman 2001).

2.5.2 Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları ve Balastları

Bir tüpün içinde bulunan gazın deşarj olması prensibine dayanarak geliştirilen aydınlatma elemanları (cıva buharlı ve sodyum buharlı lambalar, flüoresan lambalar), doğrusal olmayan akım-gerilim karakteristiğine sahip olduklarından dolayı harmonik üretirler. Bu aydınlatma elemanlarının ürettikleri harmoniklerin miktarı küçük olsa da bina ve  evre aydınlatmasında çok miktarda kullanıldıklarından dolayı toplamda tek sayılı harmoniklerin seviyesi, sistemi önemli oranda etkiler.

   nc  harmonik ve katları, nötr iletkeninden geçerek yüklenen iletkenin ısınmasına neden olur. Ayrıca flüoresan lambalara bağlanan balastlar da manyetik devreleri olması nedeniyle harmonik üretirler. Bu tip balastların verimleri de düşüktür. Bundan ötürü son yıllarda eski tip manyetik balastların yerine yüksek verimli ve daha ekonomik olan elektronik balastlar kullanılmaktadır.

Akım harmoniklerinin oluşması bu lambaların en büyük dezavantajıdır. “g  -faktörü düzeltilmiş” olarak nitelenen tipler harmonik problemleri azaltılmış güçlü lambalardır, fakat fiyatları daha yüksektir. Küçük tip lambalar ise genel olarak ‘düzeltilmiş’ özelliğine sahip değildirler.

Tungsten flamanlı lambalar yerine kullanılmak üzere piyasada satılmakta olan tasarruflu lambalarda, 8 mm çaplı bükülmüş bir flüoresan tüpünü kontrol eden bağlantı kutusunun içine yerleştirilmiş minyatür bir balast bulunmaktadır. Örneğin, 60 Watt gücünde bir flaman lambanın yerine kullanılan 11 Watt gücünde bir kompakt flüoresan lamba kullanılmaktadır. Bu lambaların meskenlerde ve özellikle otellerde yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte çok ciddi harmonik problemleri de ortaya çıkmaya başlamıştır.

2.5.3 Transformatörler

Demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin doğrusal olmamasından ötürü, transformatörler ve bobinler gibi demir çekirdeği bulunan sargılar, dağıtım sistemlerindeki en önemli harmonik  rete leridir. Bunun sebebi, manyetik devredeki

doymadan dolayı manyetik devreden geçen akım ile oluşan akı arasında lineer bir bağıntı bulunmamasıdır. Doyma sebebiyle akım ne kadar artarsa artsın akı artmayacaktır. Transformatörler sürekli olarak enerji altında olduklarından sistemde harmonik akımlarının dolaşmasına sebep olarak harmonik bozunumuna yol açarlar (Engin 2008).

Mıknatıslama akımı harmonikleri günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır. Çünkü sistemin yükü en az seviyededir, gerilim yükselerek aşırı uyarma oluşturur. Aşırı uyarımayla oluşan akım harmonikleri 3. 5. ve 7. harmoniklerdir (Arrillaga et al. 1985).

Transformatörlerin mıknatıslanma akımları nominal akımlarının %0.5 ile %1 'i kadardır. Buna rağmen seri bağlı generatör, hat ve transformatör reaktansları frekansla orantılı arttıklarından, özellikle düşük yüklerde yüksek harmonik akımlarının bunlar üzerinde sebep oldukları reaktif gerilim düşümleri büyük değerler alır. Mıknatıslanma akımlarının şebekeye geçişleri aşağıdaki faktörlere bağlıdır (Boduroğlu 1988).

- a) Transformatör sargılarının bağlantı tarzı
- b) Primlerdeki yıldız bağlı sargılarda, yıldız noktasının şebekenin nötr hattına bağlanıp bağlanmamasına,
- c) Transformatörlerde mıknatıslanmanın serbest veya zorunlu olmasına.

Transformatörün bağlantı şeklinin mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesine etkisi şu şekildedir;

Transformatörün Yıldız/Yıldız bağlı olması halinde;

Primer yıldız noktası nötre bağlı ise; her faz sargısından geçen 3 ve 3'ün katları harmonik akımları nötrde topraklanarak 3 katı akımın geçmesine sebep olur. Diğer harmonikler (5., 7., 11., 13. v.b. gibi) yıldız noktasında sıfıra eşit olurlar. Böyle transformatörlerde akılar ve her bir faz sargısında endüklenen gerilim sinüs şeklindedir.

Primer yıldız noktası nötre bağlı değil ise; mıknatıslanma akımının 3 ve 3'ün katları

olan harmonikleri yıldız noktasında dışarı çıkamazlar ve mıknatıslanma akımı 3. harmoniksiz (tepesi basık) bir akı oluşturur (Engin 2008).

Transformatörün Yıldız/Üçgen bağlı olması halinde;

Primeri üçgen bağlı transformatörlerde, faz sargılarındaki mıknatıslanma akımlarında 3., 9., 15. v.b. harmonikler meydana geldiklerinden şebekeden çekilen mıknatıslanma akımında 1., 5., 7. v.b. gibi harmonikler oluşur. Magnetik akı 3., 9., 15. gibi harmonikleri içermez. Transformatörler nasıl bağlanırsa bağlansın, primer şebekenin nötrüne bağlansın ya da bağlanmasın, çekirdek tipi nasıl olursa olsun şebekeden 1., 5., 7., 11., 13. gibi harmonikli mıknatıslanma akımı daima çekilir.

Güç transformatörleri mıknatıslanma eğrisinin lineer olduğu bölgede çalışmak üzere tasarlanır. Ancak transformatör yükünün az olduğu zamanlarda gerilimin yükselmesi sebebiyle manyetik çekirdek aşırı uyarılır ve çalışma mıknatıslanma eğrisinin lineer olmayan bölgelerinde gerçekleşir. Bu durumda transformatör harmonik üretir ve özellikle üçüncü harmonik bileşenleri etkin olur (Demirkol 2006).

Bunun yanında Nonlineer yük dengesiz ise transformatör bağlantısı ne olursa olsun üç ve üçün katı harmonik akımları dengesizlik sebebiyle şebekeye geçer (Demirkol 2006).

2.5.4 Generatörler

Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan seklinden, manyetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşmasından, kaçak akımlardan ve sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır.

Dönen makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretirler (Arrillaga et al. 1985).

Bunu önlemek için oluk sekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi kısımlarda

uygun yapısal tedbirler alınır ve generatör amortisman sargısı ile donatılır (Engin 2008).

Endüklenen elektromotor kuvveti alan eğrilerinin içerdği harmoniklere uygun olarak 1., 3., 5., 7., 9., vb gibi tek bileşenleri içerir. Harmonik mertebesi artıkça genlikleri azalır, harmonik frekansı ise artar.

Eğer statorun sargısı yıldız bağlanmışsa, 3 ve 3' ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunup faz arası gerilimlerinde bulunmazlar. Eğer yıldız bağlı generatöre 3 fazlı simetrik bir tüketici bağlanır ve yükün yıldız noktası generatörün yıldız noktasına bağlanmazsa, 3 ve 3'ün katı harmonik akımları geçmez.

Yıldız noktası nötre bağlı bir yük değil ise, faz iletkenlerinden 3 ve 3'ün katı frekanslı I_0 akımı, nötr üzerinden de bunların toplamı olan $3.I_0$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde 3 ve 3'ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getirir. Eğer generatör sargıları üçgen bağlı ise, bu sargılardan 3'ün katları frekanslı sirkülasyon akımları geçer. Bu akımlar yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olur (Demirkol 2006). Bu sebeplerden dolayı, generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir.

2.5.5 Doğrultucular (Konvertörler)

Doğru Akım iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler şebeke denetimli çeviriciler üzerinden beslenirler. P darbeli bir çeviricinin meydana getireceği akım harmoniklerinin mertebesi,

$$n = k.p \pm 1 \quad (2.12)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots$$

n : harmonik seviyesidir (Sundberg 1980).

Sanayide genel olarak kullanılan 6 darbeli doğrultucularda 5., 7., 11., 13., 15. vs. harmonikler üretilir.

$$I_n / I_1 = I / n \quad (\text{Rashid 1993}). \quad (2.13)$$

Harmonik akımın efektif değeri harmonik mertebesi ile ters orantılıdır. Harmonik akımın mertebesi p darbe sayısı ile arttırılarak harmonik akımın efektif değeri azaltılabilir.

Sistemdeki bir fazlı büyük güçlü kontrollü doğrultucuların kullanım alanlarından birisi de elektrikli demiryolu ulaşım sistemleridir. Üç fazlı ideal doğrultucuların bir fazlı doğrultuculara göre avantajı, üç fazlı doğrultucuların üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir (Doggan and Morrison 1993).

Üç fazlı konverterler, konverter transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen AC akımın dalga formunun içerdiği darbe sayısı ile tanınır.

Üç fazlı konverterlerde, p darbe sayısı ile harmonik akımının mertebesi arttırılarak harmonik akımının efektif değeri azaltılır.

2.5.6 Ark Fırınları

Ark fırınları, geniş spektrumlu harmoniklerin bir örneğidir. Ark fırınları, yüksek gerilim iletim şebekesine doğrudan bağlanan, anma gücü MW mertebesinde olan ve elektriksel ark oluşumu esasına dayanan fırınlardır. Elektrik arkının akım-gerilim karakteristiği lineer değildir.

Harmoniğin üretilme nedeni, ark direncinin lineer olmaması yani ateşleyici elektrotlarının akım gerilim karakteristiğinin lineer olmayışındır (Arrillaga et al. 1985).

Ark olayının başlamasının ardından ark gerilimi azalırken sadece güç sistemi eşdeğer empedansı ile sınırlandırılabilen ark akımı artar. Bu anda ark olayında negatif direnç etkisi görülür Ark fırınlarının empedansı dengesiz olup, zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının rastgele değişimine sebep olduğu için ark fırınının modellenmesi oldukça zordur.

Ark boyundaki ani değişimin oluşturacağı şebeke dalgalanmaları, frekansın 0,1 den 30 Hz' e kadar geniş bir aralıkta dolaşmasına neden olur. Tipik bir ark fırınında 2, 3, 9 mertebesinde akım harmonikleri bulunur; maksimum harmonik temel bileşenin %30' u kadardır (Sundberg 1980).

2.5.7 Diğer Harmonik Kaynaklar

Yukarıda açıklanan belli başlı bu harmonik kaynaklarına ilaveten diğer harmonik kaynakları;

1. Elektrik makinelerindeki diş ve oluklar,
2. ıkık kutuplu senkron makinelerde hava aralığındaki relüktans değişimi,
3. Senkron makinelerde hava aralığı döner alanı,
4. Senkron makinelerde ani yük değişimlerinin meydana getirdiği manyetik akı dalga şeklindeki bozulmalar,
5. Transformatörlerin ilk enerjilenmesi ve motorların kalkış akımları,
6. Güç üretim tesislerinde pompa, ateşleyici ve fanları sürmede kullanılan elektronik kontrol düzenleri,
7. Özellikle imento ve maden sanayiinde kullanılan lineer motorları sürekle için kullanılan frekans dönüştürücüler,
8. İndüksiyonla ısıtmanın kullanıldığı elik sanayi, haddehaneler,
9. Kaynak makineleri,
10. Yarı iletken kontrollü cihazlar (motor hız kontrol düzenleri, ısıtıcılarda ısı regölasyon düzenleri, elektronik termosifonlar vb.),
11. Başta teyp, portatif tv adaptörleri, ütü, tıraş makinesi ve uzun ömürlü tekrar dolabilen piller gibi şarjlı cihazlarda kullanan doğrultucu devreler,
12. Reaktif gücün çok hızlı ve ani değiştiği (özellikle ark fırınlarında) sistemlerde,
13. Kesintisiz güç kaynakları ve anahtarlamaalı güç kaynakları,
14. Bilgisayar /network sistemleri ve bunlarla yönetilen otomasyona dayalı üretim tesisleri,
15. Doğru akım ile enerji iletimi kontrolü ve dönüştürücü istasyonlar,

16. Elektrikli trenler ve tek-raylı ulaşım araçlarında yüksek güçlü doğrultucuları, üniversal ve üç fazlı motorları beslemek için kullanılan dönüştürücüler, elektrikli taşıtlarda akü şarj devreleri,
17. Konutlarda kullanılmaya başlanan fuzzy kontrollü çamaşır ve bulaşık makineleri, özellikle çok ekranlı televizyonlar, akıllı fırınlar ve mikro dalga fırınları, otomatik ayarlı aspiratörler ve hava düzenleyiciler (klimalar),
18. Elektrokimya teknolojisinde plakalara şekil verme, elektro kaplama işlemlerinde ve elektrophoretic boya spreylерinde kullanılan statik dönüştürücüler,
19. Rüzgar ve güneş enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarında özellikle AC/DC dönüştürücülerde kullanılan yarı iletken teknolojisi (Demirkol 2006).

Bu kaynakların şebekede ürettiği harmonikler 100 Hz ile 50 kHz arasında değişmektedir. 5kHz'e kadar olan harmonikler güç elemanları ve makineleri üzerinde etkili olur. 5 kHz üzerindeki harmonikler iletişim sistemlerinde problemler oluşturmaktadır.

2.6 Harmoniklerin Yapmış Olduğu Etkiler

2.6.1 Harmonik Akımların ve Gerilimlerin Yol Açtığı Sorunlar

Genel olarak akım harmoniklerinin ve gerilim harmoniklerinin etkileri şu şekilde gruplanabilir.

2.6.1.1 Akım Harmoniklerinin Genel Etkileri

- Kullanılabilir güçte azalma ve kayıplarda artma, düşük güç faktörü,
- Üç faz sistemlerde nötr hatta aşırı akımların oluşumu,
- Trafo ve jeneratörlerde aşırı ısınma,
- Akustik gürültüde artma,
- Telefon hatlarında artan girişim.

2.6.1.2 Gerilim Harmoniklerinin Genel Etkileri

- Trafo ve jeneratörlerde aşırı ısınma,
- Kondansatörlerde aşırı ısınma,
- Motorlarda ısınma,
- İzolasyon sistemlerinde yalıtkan stresinin artması,
- Rezonans oluşumu ve yüksek gerilim delinmesi,
- Trafo ve jeneratörlerde aşırı ısınma,
- Endüksiyon motorlarda problemler, mekanik salınımlar (Filiz 2006).

2.6.2 Harmoniklerin Cihazlar Üzerindeki Etkileri

Harmonik oluşturan pek çok cihaz aynı zamanda harmoniklerden de etkilenmektedir. Bu durumda sistemde harmoniklerden kaynaklanan bir kısır döngü oluşmaktadır. Burada, harmoniklerin cihazlar üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.6.2.1 Transformatörlere Etkisi

- Efektif (rms) akıma etkisi: Transformatör etiket değerinde belirtilen görünür gücünde (kVA) çalıştırılıyorsa, harmonik bileşenler bu değeri daha yukarı çekecek ve transformatörün aşırı yüklenmesine sebep olacaklardır. Bununla birlikte artan efektif akım iletken kayıplarını arttıracaktır.
- Girdap (eddy) akımı kayıpları: Bu akımlar transformatörlerde magnetik akıdan dolayı oluşmaktadırlar ve ayrıca bir ısınmaya sebep olurlar. Normal olarak tam yükte %10 olan girdap akımı kayıpları harmonik numarasının karesi ile orantılı olarak artar. Bu nedenle özellikle yüksek frekanslardaki harmoniklerin oluşturdukları ısınma ve kayıplar daha fazladır (Chapman 2001).
- Çekirdek (nüve) kayıpları: Harmonikli transformatörlerde çekirdek kayıpları gerilim distorsiyonuna ve çekirdeğin tasarımına göre değişkenlik göstermektedir. Gerilim

distorsiyonundaki artış çekirdeğin tabakalarında girdap akımlarının artışına sebep olmaktadır. Bu etki tabakaların kalınlığına ve çekirdekte kullanılan malzemenin kalitesine bağlıdır. Genel olarak bu kayıplar diğer kayıplara göre daha azdır.

- Sirkülasyon akımları etkisi: Üçlü-n harmonikleri üçgen sargıya geldiklerinde hepsi aynı fazda oldukları için sargı içinde dolanırlar, etkin bir şekilde absorbe olmuşlardır ve besleme devresine ulaşmazlar. Bu nedenle, üçgen sargılı transformatörler izole özellikli transformatörler olarak yararlıdır. Ancak, üçlü-N özelliği taşımayan diğer tüm harmonikler için durum farklıdır, bunlar devreye yayılırlar. Transformatörlerin anma değerlerinin belirlenmesinde, sirkülasyon akımlarının dikkate alınması gerekir (Chapman 2001).

2.6.2.2 Motorlara Etkisi

Motorlar harmonik gerilimlerinden oldukça fazla etkilenirler. Motor statorundaki harmonik gerilimler, rotorda harmonik akıya dönüşürler. Bu akı motor momentine doğrudan etki etmese bile rotorda nominal frekanstan büyük frekanslarda harmonik akımlarının oluşmasına sebep olur. Harmonikler, motorlarda düşük verim, aşırı ısınma, titreşim, gürültü gibi etkiler doğurmaktadırlar. Motorlar için Uluslararası Standartlara göre gerilim distorsiyonu) %5'in altında olmalıdır. Ayrıca standartlara göre gerilim distorsiyonu %8 değerini aştıktan sonra ısınma probleminin ortaya çıkacağı belirtilmiştir.

Hem senkron hem de indüksiyon motorlarında harmoniklerin oluşturduğu ana problem demir ve bakır kaybı ve yüksek akımın etkisi ile ısınmadaki artıştır. Bunun sonucu olarak verim düşer. Harmonikler, motor torkunda salınma sebep olabilirler. Ayrıca yüksek akım yüksek sese de sebebiyet verebilir (Dugan 1999).

2.6.2.3 Kontrol Cihazları Üzerinde Etkileri

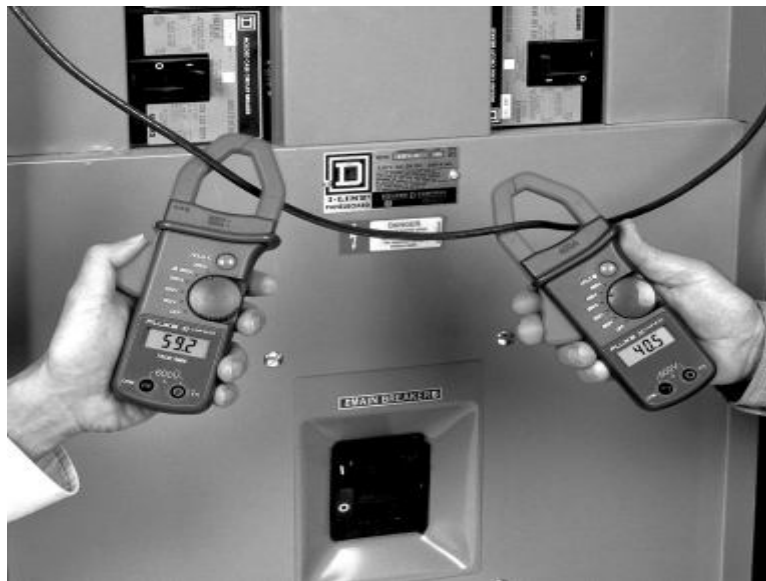
Özellikle ateşleme anları gerilimin sıfırdan geçmesine göre ayarlanmış olan kontrol

cihazları ve otomatik anahtarlar, harmonikler sebebi ile yanlış çalışırlar. Bunun nedeni bir periyotta 2 kere sıfır noktasından geçmesi beklenen gerilim sinyalinin harmoniklerden dolayı çok daha fazla sıfır noktasını görmesini ve cihazın hatalı olarak pek çok defa anahtarlama yapmasıdır.

2.6.2.4 Ölçü Aletleri Üzerinde Etkileri

Sinüs dalgasına göre tasarlanmış olan, ortalama değeri gösteren normal ölçü aletleri kontrol cihazlarındaki gibi sıfır noktasını referans aldığından hatalı ölçümler yapacaktır. Bunun sonucu olarak silsile halinde yanlış hesaplamalar yapılacaktır. Dalga şekli, şebeke frekansından farklı frekanslar içermektedir ve değerlendirmelerin de buna göre yapılması gerekir. Portatif ölçü aletlerinin çoğu gerçek etkin değerleri ölçmez ve sinüs eğrisi şeklinde olmayan akımları %40 daha farklı gösterebilirler.

Şekil 2.3'te harmonik içeren aynı devreye bağlı iki adet ölçü aleti görülmektedir. Her iki alet de imalatçı firma şartnamelerine göre kalibre edilmiş olup, doğru çalışmaktadır. Aradaki fark aletlerin çalışma prensiplerinden kaynaklanmaktadır. Soldaki ölçü aleti etkin değer (RMS) ölçer sağdaki alet ise ortalama değeri ölçer. Etkin değer ölçen soldaki alet doğru değeri ölçerken, ortalama değere ölçen sağdaki alet %32 daha düşük değer gösterecektir (West 2002).



Şekil 2.3 Ortalama değer gösteren ve etkin değer gösteren ölçü aletlerinin ölçüm değerleri

2.6.2.5 Nötr İletkende Etkisi:

Üç-fazlı bir sistemde gerilim dalga şekli her bir fazdan nötr yıldız noktasına 120° lik açı değişimi yapar ve her faz eşit olarak yüklendiğinde nötrdeki akım bileşkesi sıfır olur. Dengesiz yüklü sistemlerde nötrden sadece denge dışı kadar net akım geçer. Standartlara göre faz iletkeninin yarısı ölçüsünde nötr iletken kullanılarak tasarruf yapılmaktadır. Ancak, şebeke akımlarının birbirini dengelemesine rağmen harmonik akımların birbirini dengelememesinden dolayı sistemlerde dengesizlik olmakta ve temel harmoniğin üç katının tek sayılı çarpanları olan harmonik akımlar ‘üçlü-N’ harmonikleri halinde nötrde birleşmektedir (Chapman 2001).

Örnek olarak her fazdaki %70, üçüncü harmonik akım nötrde % 210 şeklinde bir akım olarak sonuçlanmaktadır.

Harmonik etkisinden dolayı frekans arttıkça akım yüzeyden geçmeye meyilli olur. Büyük harmonik derecelerinde iletken kesitinden geçen akım miktarı azalır, akım yoğunluğu iletkenin sınır değerlerini aşarak ısınmaya neden olur (Lemerand 1998).

Deri etkisi, harmoniklerin sebep olduğu ısınmadaki artışa bağlı olduğundan iletken yüzey alanının genişletilerek ısınma etkisinin azaltılması mümkündür. İletkenin etkili yüzey alanı her bir şerit yüzey alanının toplamı olduğunda, iletkenlerin tek damarlı yerine ince telli çok damarlı kullanılması ile deri ısınma azaltılabilir (Fehr 2004).

Ticari binalarda yapılan durum araştırmaları, yarım-ölçüdeki iletkenlerde, genel olarak nötr akımların, faz akımlarının %150 ile %210’ u arasında olduğunu göstermiştir (Chapman 2001). Bu durumda sistemdeki nötr kablusunun standartlara uygun olmasına rağmen aşırı ısınma olacağından yangın riski mevcuttur.

2.6.2.6 Kablolara Etkisi

Harmoniğin etkisi kabloları gereksiz yere fazla yükleyeceğinden dolayı, kabloların aktif güç taşıma kapasitelerinde azalmaya neden olurlar.

2.6.2.7 Devre Kesicilerine Etkisi

Kaçak akım koruma şalterleri (KAK), faz ve nötr iletkenlerdeki akımları toplayarak sonucun anma değerin üzerine çıkması halinde harekete geçerek gücü yükten ayırırlar. Harmoniklerin mevcut olduğu sistemlerde “istenilmeyen devre açılmaları” iki nedenden kaynaklanır.

Birincisi; elektromekanik olarak çalışan bir KAK şalterinde yüksek frekanslı bileşenlerin hatalı toplanması halinde cihaz devreyi kesebilir.

İkincisi; harmonik üreten bir cihaz aynı zamanda gürültü üretir ve bu ses filtrelenerek toprağa iletilir. Ancak KAK şalterine bağlı harmonik üreten başka yüklerin de olması durumunda bu gürültü seviyesi standartlara göre şalterin ayarlı olduğu 3.5mA'yı geçerek KAK şalterini açacaktır. Bu sorunla karşılaşmamak için sistemde her biri daha az yükü besleyen daha fazla KAK şalteri kullanmaktır.

Anahtarlı otomatik sigortalar gibi kesicilerdeki istenmeyen devre açmalarının nedeni, proje aşamasında yapılan hesaplamalarda harmoniğin göz ardı edilmesi veya yapılan ölçümlerin harmonikten dolayı hatalı okunması nedeni ile akım açma değerinin olması gerekenden daha düşük olarak seçilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle ölçümlerin rms değerini ölçen aletlerle ölçülmesi yapılması gerekmektedir.

2.6.2.8 Kondansatörlere Etkisi

Harmonik frekansı yükseldikçe kondansatör empedansı düşmekte, genellikle endüktif olan kaynak empedansı yükselmektedir. Bundan dolayı kondansatör nominal akımdan çok daha fazla akım taşımaktadır. Bunun sonucunda aşırı ısınmadan dolayı kondansatörde patlama ya da kablolarında erime riski mevcuttur.

Kondansatörler harmonik oluşturmazlar ancak mevcut harmoniği artırır. Aynı zamanda harmonik etkisinden sistemde ilk etkilenen elemanlardır. Bundan dolayı Harmonik akımları kondansatörlerde patlamaya, kapasite azalmasına ve kondansatör

ömrünün ksalmasına sebep olmaktadır

IEEE 18-2002 numaralı standarda göre kondansatörlerin anma gerilimlerinde veya anma geriliminin altında çalışabilmeleri beklenir. Kondansatörler, aşağıdaki çalışma durumları aşılmadığı sürece sürekli çalışma durumlarına devam edebilirler (IEEE 2003).

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

Harmonik etkisinin kondansatörlere zarar vermemesi için, büyük bir sisteme küçük bir kondansatör eklendiğinde bile harmonik rezonans ihtimali göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü 23. derece gibi büyük dereceli harmoniklerde, küçük kondansatör gücündeki küçük bir artış bile önemli ısı artışı ve girişim sorunları oluşturabilir (Carnovale and Eaton 2003).

Kondansatörlerin temel eleman olarak kullanıldığı kondansatörlü kompanzasyon sistemindeki etkileri ayrı bir maddede ayrıntılı olarak incelenecektir.

2.6.2.9 Yalıtımın Delinmesi

Sinüs şeklindeki gerilim eğrisine eklenen gerilim harmoniklerinin meydana getirdiği iğne ucu şeklindeki çok kısa süreli ani gerilim yükselmeleri, örneğin gerilim rezonansı gibi durumlarda makine ve transformatör sargılarının izolasyonu ve kondansatörlerin dielektrik maddesi için büyük bir tehlike oluşturur ve bazen delinmelere neden olabilirler.

2.6.2.10 Endüksiyon Tipi Sayaçlara Etkisi

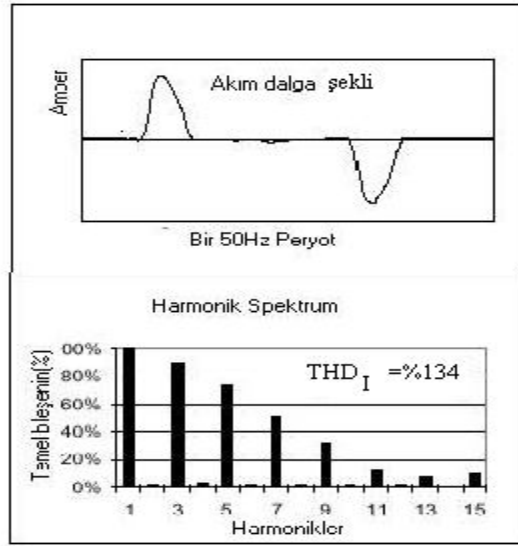
Sayaçların yanlış ölçüm yapmasına neden olur.

2.6.2.11 Sesli ve Görüntülü İletişim Araçlarına Etkisi

Bu cihazlarda parazit ve anormal çalışmalar oluşur.

2.6.2.12 Mikro Bilgi İşlemciler ve Bilgisayarlar Üzerine Etkisi

Elektronik cihazlarda, hatalı çalışmalar meydana gelir. Bilgisayar sistemleri, hem harmonik üreticisidir. Hem de harmonik bileşenlerden son derece etkilenirler. Şekil 2.4' de bir bilgisayarın akım dalga şekli ve harmonik spektrumu verilmiştir (Adak 2003).



Şekil 2.4 Bilgisayarlara ait harmonik distorsiyonu

Pekçok elektronik cihaz düşük gerilim seviyelerinde, gerilim değişikliklerine çok duyarlı olarak çalışmaktadır. Bu cihazların, yüksek dereceli harmonik taşıyan iletkenlere yakın olması durumunda, pek çok problemler oluşacaktır. Cihazın beslendiği hatta filtre konulması da yeterli olmayacaktır. Bu durumda yapılması gereken harmonikten etkilenen cihazın harmonik taşıyan kablodan uzaklaştırılmasıdır (Lemerand 1998).

2.6.3 Harmoniklerin Kompanzasyon Sistemine Etkileri

Harmoniklerin kompanzasyon sistemine etkileri birden fazla şekildedir. Ülkemizde yaygın olarak kullanılan kontaktör ve kondansatörle yapılan kompanzasyonlarda temel eleman olan kondansatörün üzerindeki harmonik etkisi özellikle üzerinde durulması gereken bir durumdur.

Klasik kompanzasyon sistemlerinde kondansatörler kademeler halinde düzenlenmiştir. Reaktif güç kontrol rölesinin kontaktörlere verdiği komutlar ile kondansatörler devreye alınıp devreden çıkartılır. Harmonik oranlarının düşük olduğu tesislerde sorunsuz olarak çalışan bu sistemler tesisteki harmonik oranlarının artması ile birlikte sorunlar çıkartmaya başlar.

Ülkemizde 2008 yılında indüktif gücün aktif güce oranının %33' ün altında olmasını gerektiren düzenleme bu oranın %20' ye, yine aynı şekilde kapasitif gücün aktif güce oranının %15' e çekilmesi şeklinde değiştirilmiştir. Bu durumda kompanzasyon sistemine daha büyük güçte kondansatör girip, daha sık giriş-çıkış yapması gerekmiştir. Bu zaman aralığı aynı zamanda ilerleyen teknolojiye paralel olarak harmonik yüklerde artış olduğundan, sistemlerdeki harmonik zararları daha fazla ortaya çıkmıştır. Bilinmektedir ki kompanzasyon sistemleri mevcut harmonikleri artırır ve kendisi de ilk etkilenen sistemdir. Harmoniğin kondansatöre etkileri, rezonans olaylarına sebep olması ve güç faktöründeki etkileri aşağıda detaylı olarak anlatılacaktır.

2.6.3.1 Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkisi

Güç Kaybı: Kondansatörler ideal kabul edildiklerinde teoride hiçbir güç kayıpları olmasa da uygulamada küçük bir kayıpları vardır. Kondansatör için tanımlanan kayıp faktörü, başka bir deyişle kayıp açısının tanjantı,

$$\tan\phi = 1 / (w.R.C) = P / Q \quad (2.14)$$

formülü ile belirlenir. Buradaki P, kondansatörün aktif kayıplarını göstermektedir.

Kondansatör uçlarında harmonikli gerilim bulunduğunda aktif kayıp güç değeri şöyle verilir:

$$P = R. (I_{R1}^2 + I_{R2}^2 + \dots + I_{Rn}^2) \quad (2.15)$$

Burada I_{Rn} , n. harmonige ait direnç akımıdır.

Görüldüğü gibi akımdaki harmonik bozunum değeri arttıkça kayıp değeri de artacak ve kondansatörde sıcaklık artışı olacaktır. Bu sıcaklık artışının kondansatörün ömrü üzerine olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Yapılan bir deneysel çalışmada, harmonik akımlarının sebep olduğu %10' luk bir gerilim yükselmesinin, bir kondansatör grubunun çalışma sıcaklığını %7 oranında arttırdığı bunun da kondansatör ömrünü % 30 oranında azalttığı bulunmuştur (Engin 2008).

Harmonikler kondansatörlerde aşırı gerilim ve akımlara ve bunların sonucunda aşırı reaktif yüklenmeye yol açarlar. Ayrıca harmonikler sebebiyle kondansatörlerde ısı artışı meydana gelir ki bu durumda kondansatörlerin ömrü kısalmır. Bir başka tehlike ise harmoniklerin sistemdeki kondansatörlerle bobinler arasında rezonansa sebep olarak işletmenin sürekliliğini etkilemesi ve çalımsa güvenliğini tehlikeye sokmasıdır (Engin 2008).

Aşırı Gerilim: Aşırı gerilimler, gerilimdeki harmonik bileşenlerden kaynaklanır. Kondansatörlerdeki harmonik bileşenler de sistemdeki gibi sadece tek sayılı harmonikleri kapsar. Gerilim değeri;

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2} \quad (2.16)$$

eşitliği ile belirlenir.

Harmonikler nedeni ile kondansatörde oluşan gerilim, kondansatör içindeki yalıtkan malzemede delinmeye neden olur.

Aşırı Akım: Kondansatör üzerine uygulanan harmonikli gerilim kondansatör üzerinden harmonikli akımlar akıtır. Harmonikli kondansatör reaktansı;

$$X_{Cn} = X_C / n = 1 / (n.w.C) \quad (2.17)$$

w: açısal frekans

X_C : kondansatör reaktansı

Burada harmonik arttıkça kondansatör reaktansının azaldığı görülmektedir.

Harmonik içeren kondansatör akımı;

$$I_n = V_n / X_{Cn} = n.w.C.V_n \quad (2.18)$$

V_n : Harmonik içeren gerilim

Burada akım harmoniğindeki artışın gerilim harmoniğindeki artıştan daha fazla olacağı ve harmonik sayısı arttıkça bu artışın daha büyük değerlere ulaşacağı anlaşılmaktadır.

Genel olarak harmonikli sistemde kondansatör reaktansı artar, kondansatör akımı artar.

Nominal akımı 140 amper olan 100 kVAr'lık bir kondansatör bataryası harmonikli bir ortamda çalışıyorsa bunun nominal akımı yaklaşık 200-250 amperlere çıkabilir (Filiz 2006).

Bu eşitliğe göre harmonik bozunumu, kondansatör akımında gerilimden daha fazla olur. Kondansatörlerin n. harmonik için kapasitif reaktansları 1/n katsayısı ile azalacağından n. harmonik için akım harmonik bileşeni yüzdesi, gerilim harmonik bileşeni yüzdesinden daha büyük olur.

Tek dereceli harmonikler için kondansatör akımının efektif değeri,

$$I = w.C.\sqrt{(V_1^2 + 9V_3^2 + \dots + n^2V_n^2)} \quad (2.19)$$

formülü ile bulunur.

Kondansatör akımının, gerilim temel bileşenine eklenen harmonik gerilimleriyle arttığı görülmektedir. TS EN 60871-1 standardına göre bu artış sonucunda, kondansatörün nominal akımın en az 1,3 katına eşit efektif akıma dayanabilmesi istenir (TS EN 60871-1).

Genellikle tüm harmonik problemleri öncelikle paralel bağlı kondansatör gruplarında ortaya çıkar. Rezonans olayları sonucu oluşan aşırı gerilim ve akımlar, kondansatörlerde ısınmaya ve gerilim zorlanmalarını arttırarak ömürlerini kısaltırlar (Adak 2003).

Aşırı Reaktif Yüklenme: Harmonikler Kondansatörün nominal değeri üzerinde bir değerde çalışmasına neden olur. Kondansatörler nominal reaktif güç değeri;

$$Q = w.C.V^2 \quad (2.20)$$

C: Kondansatör kapasitesi

V: Kondansatör gerilimi

Harmonikten etkilenen bir kondansatörün reaktif güç değeri;

$$Q_n = n.w.C. V_n \quad (2.21)$$

formülü ile tanımlanır.

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

$$Q_T = Q + (Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n) \quad (2.22)$$

değerine ulaşır (Engin 2008).

2.6.3.2 Harmoniklerin Rezonans Etkisi

Bazı frekans aralıklarında sistemin kapasitif ve indüktif bileşenlerin bileşkesi çok yüksek empedans değeri verir. Bu frekansa aralığında küçük bir akım harmoniği çok yüksek ve istenmeyen gerilim harmoniği oluşturabilir. Bu duruma rezonans adı verilir.

Üç fazlı güç dağıtım sistemlerinde 3 fazlı köprü diyot doğrultuculardan kaynaklanan 5. ve 7. harmonikler baskındır (Hansen et al. 2000).

Kompansasyon sisteminde bulunan kondansatörlerin kapasitif reaktansı ile sistemin endüktif reaktansının birbirine eşit olması haline rezonans denir. Kapasitif reaktansın endüktif reaktansa eşit olduğu frekansa rezonans frekansı adı verilmektedir.

Sistemde oluşabilecek bir rezonans frekansı, sistemde bulunan harmonik frekanslardan birine yakın bir değerde ise, aşırı büyüklüklerde harmonik akım ve gerilimleri meydana oluşacaktır. Harmonik akımdaki bu yükseliş sık sık anahtarların hatalı açılması, kapasitör arızaları, açıklanamayan sigorta açılmaları, elektronik cihazlarda işleyiş ve telefon hatlarında karışmalar vb. sorunlara neden olur. Güç sistemlerinin %15 ile %20'den fazlası harmonik yüklerden oluşur. Bu yüklerin etkilediği problemler alanlar üzerinde araştırmalar yapılmalıdır (Grady et al. 2002). Rezonans durumu harmonik seviyelerini etkileyen en önemli etkenlerden birisidir.

Şebeke reaktansının değeri sabit olmayıp şebekenin o anki durumuna bağlı olarak değiştiğinden sönümsüz salınımın gerçekleştiği frekans değeri tam olarak hesaplanamaz, ancak bu değer genellikle 250 Hz ile 350 Hz arasındadır. Şebeke reaktansındaki değişimler sonucunda sönümsüz salınımın gerçekleştiği değer 5. harmonik frekansı olan 250 Hz'e veya 7. Harmonik frekansı olan 350 Hz'e gelirse, gerilimin 5. veya 7. harmonik değerleri toprağa kısa devre olur.

Bu durum kondansatörlerin zarar görmesine yol açar. Bu istenmeyen durumu engellemek için kondansatör reaktansı ile şebeke reaktansının mutlak değerlerinin eşit olduğu frekans değerinin güvenli bir bölgeye çekilmesi gerekmektedir. Bu nedenle

kompanzasyon sistemlerindeki kondansatörlerin önüne uygun değerli bir şok bobini yerleştirilmesi gerekmektedir (Demirkol 2006).

Rezonans durumlarını seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki gruba ayrılır.

Paralel Rezonans: Paralel rezonans durumu en çok karşılaşılan problemlerden birisidir. Sistem endüktansı ile kondansatör grupları arasında, harmonik frekanslardan birinin yakında paralel rezonans oluşabilir. Bu rezonans frekansı çok yükek olduğundan yüksek bir akım kapasitans-indüktans döngüsünde dolaşacaktır (Suriadi 2006).

Sistemde iki temel ve birbirine paralel empedans söz konusudur. Trafo empedansı;

$$Z_{tr} = wL \quad (2.23)$$

Kompanzasyon sisteminin empedansı;

$$Z_T = 1/(wC) \text{ 'dir.} \quad (2.24)$$

Bu iki empedans paralel olduğundan toplam empedansı;

$$Z_T = wL / (1 - w^2 LC) \quad (2.25)$$

olarak hesaplanır.

Paralel empedansın paydasının “0” olduğu frekans değerinde toplam frekans teoride sonsuz olur. Bu duruma “paralel rezonans” denir.

Paralel rezonansta pratik uygulamalarda üretilen harmonik akımların 3 ila 6 katına çıkmasına neden olur. Bu durumda trafo hattı için ve kompanzasyon sistemi için en tehlikeli boyutlara yükselir.

Akım değerleri devreye giren kompanzasyon miktarına bağlı olarak %100 kadar

yükselebilir (Demirkol 2006).

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

Dağıtım sistemindeki kondansatörlerin bir arada olması rezonans frekansın büyük olmasına sebep olur, bunun yerine kondansatörlerin sistemin farklı yerlerine bağlanmış olması durumunda çok sayıda rezonans frekans olmasına rağmen bu değerlerin küçük değerde olması rezonanstaki dolaylı oluşacak sorunları azaltır (IEEE 1992).

Dikkat edilmesi gereken husus şudur ki, rezonans frekansı hangi harmonik bileşene gelirse o harmonik sistem için en tehlikeli harmonik haline gelir. Bu neden ile sistemde üretilen hiçbir harmonik frekansı için rezonansa izin verilmemelidir.

Seri Rezonans: Seri rezonans durumunda, rezonans frekanstaki empedans değeri yalnızca sistemin rezistans değerine eşit olur. Bu da büyük akım salınımlarına ve dolayısı ile yüksek gerilim harmoniklerine yol açabilir (Suriadi 2006).

Seri rezonans, paralel rezonanstaki gibi harmonik akımlarında büyümeye neden olmaz ancak çok küçük bir rezonans frekansı oluşacağı için harmonik akımının sistemde istenmeyen yerlere gitmesine neden olur. Bu durumda sistemde istenmeyen parazitler oluşur. Ayrıca kondansatörlerde gerilim harmoniğinden dolayı yalıtım malzemelerinde delinmeler olabilir.

Görüldüğü gibi rezonans durumu sistemlerde arızalar ve ekipmanlarda hasarlar meydana getirebilir. Sistem yükünün az olduğu zamanlarda, rezonansın etkisi daha fazladır. Yük seviyesi arttıkça akımın akabileceği daha küçük empedans yollarından dolayı rezonans nedeniyle oluşan harmonik artışı zayıflar. Bir çok endüstriyel tesiste olduğu gibi, devreler daha az yüklendiklerinde ve yüklerin tümü motor olduğunda, rezonans nedeniyle oluşan harmoniklere karşı daha duyarlı olurlar (Demirkol 2006).

2.6.3.3 Harmoniklerin Reaktif Güç Faktörüne Etkisi

Güç üçgeninde aktif gücün görünür güce oranını gösteren “cosφ” değeri aynı zamanda akım ile gerilim arasındaki faz farkını işaret eder. Ancak bu tanımda harmonikli akımların yeri yoktur.

Güç faktörü (power factor) ise harmoniklerin dahil olduğu akımlar ile harmoniklerin dahil olduğu gerilimler arasındaki faz farkıdır.

$$pf = \eta \cdot \cos \phi \quad (2.26)$$

$$\eta = 1 / [1 + (THD(I))^2] \quad (2.27)$$

Burada akım harmoniğinin arttıkça güç faktörünü düşürdüğü bu da kompanzasyonun amacına ulaşamamasına ve yasal düzenlemelere göre reaktif güç cezası ödenmesine sebep olacaktır.

Örnek:

THD(I) =%30 seviyelerinde ve cos φ=0,97 iken;

$$\eta = 1 / [1 + (0,3)^2] = 0,917$$

pf = 0,917 x 0,97 = 0,89 değerinde bir güç faktörüne sahip olacaktır.

Günümüzde “güç faktörü” ile “cos φ “ arasındaki ilişki yeterince bilinmediği ve kullanılan reaktif güç kontrol rölelerinin çoğunda da hesaplamalar harmonikleri göz ardı edilerek yapıldığından özellikle sanayide harmonik akımlarındaki artışla birlikte beklenilmeyen reaktif güç cezaları ödeneceği düşünülmektedir.

2.7 Harmoniklerin Giderilmesi

Harmoniklerin sistem üzerindeki etkileri tamamen kaldırılamaz. Ancak çok daha düşük seviyelere çekilerek sisteme zarar vermesi engellenebilir. Öncelikle istenen harmonik üreten cihazların tasarım aşamasında harmonik üretmeyecek şekilde ya da sisteme

harmonik vermeyecek şekilde filtreli imal edilmesidir. Bu başarılmazsa ya da sistemdeki cihazlar yenilemiyorsa bu sefer harmonik sorununun üretildiği yerde kaldırılması için filtreleme çalışmaları yapılmalıdır.

2.7.1 Tasarım Aşamasında Alınacak Tedbirler

2.7.1.1 Generatörlerde Alınabilecek Tedbirler

Senkron generatörlerde hava aralığındaki manyetik alanın şeklinin sinüz eğrisine yaklaştırmak için kutup oluklarının $2 / 3$ ' ü sarılır veya sarım adımları birbirlerinden farklı olan sarım tipi kullanılır (Adak 2003).

2.7.1.2 Dönüştürücülerde Alınabilecek Tedbirler

Dönüştürücülerde darbe sayısının artırılması ile küçük dereceli harmoniklerin giderilmesi mümkündür. Dönüştürücülerde $n=5, 7, 11, 13$ olduğu için, harmonik akımları $I_5 = I_1 / 5$ ve $I_7 = I_1 / 7$ gibi değerler almaktadır. Bundan dolayı darbe sayısı ne kadar büyük olursa, harmonik mertebeleri de o kadar küçük olur (Adak 2003).

2.7.1.3 Transformatörlerde Alınabilecek Tedbirler

Büyük transformatörlerde magnetik endüksiyon değerinin büyük tutulması ile demir çekirdekten en büyük yarar sağlanır. Ancak büyük endüksiyon değerinde, doyma nedeni ile mıknatıslanma akımında harmonikli bileşenler artar. Mıknatıslanma akımının harmonik bileşenlerini azaltmak için alınabilecek en iyi tedbir, manyetik endüksiyonu düşük tutmaktır (Adak 2003).

2.7.2 Harmonik Filtrelerin Kullanılması

Devreye yerleştirilen ve harmonik akımının süzülmesini sağlayan devrelere “Harmonik filtresi” adı verilir. Harmonik filtrelerin amacı bir ya da daha fazla frekanstaki akımların etkisini yani harmonik içeriğini azaltmak veya yok etmektir. Akım harmoniği etkisi azalırsa, gerilim harmoniği de azalacaktır. Burada uygulanacak sınır IEEE tarafından

belirlenmiştir. Sistemdeki toplam gerilim tekil harmonik değerin %3 ve toplam akım harmoniğinin %5 değerini geçmemesi istenir (IEEE 1992).

Filtreler değişen harmoniklere uyum sağlayıp sağlayamamasına göre 2'ye ayrılır. Bunlar pasif filtreler ve aktif filtrelerdir.

2.7.2.1 Pasif Filtre

Pasif filtrede amaç yok edilmek istenen harmonik akımların kontrolsüz şekilde sistemde akarak cihazlara zarar vermesini engellemektir. Bu amaçla harmoniklerin akabileceği düşük dirençli filtrelere gitmesi sağlanır. Bu amaçla kompanzasyon sistemindeki kondansatörler ile seri bağlanacak uygun değerdeki endüktansın rezonansa girmesi sağlanır.

Elektrik dağıtım şebekelerinde çoğunlukla karşılaşılan harmonikler 3., 5. ve 7. gibi tek katsayılı olanlardır. Çift katsayılı harmoniklere pek rastlanmaz. Bu nedenle genel olarak pasif filtre uygulamalarında tek katsayılı harmonikler göz önünde bulundurulur (Kocatepe ve ark. 2003).

Pasif filtreler, kaynak ile tüketici arasına bağlanan ve temel frekans dışındaki bileşenleri yok eden seri bağlı kondansatör ve bobinden oluşan devrelerdir. Bazı durumlarda filtreye omik direnç de eklenebilir. Pasif filtrelerde amaç, yok edilmesi istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelen L ve C değerlerini belirlemektir.

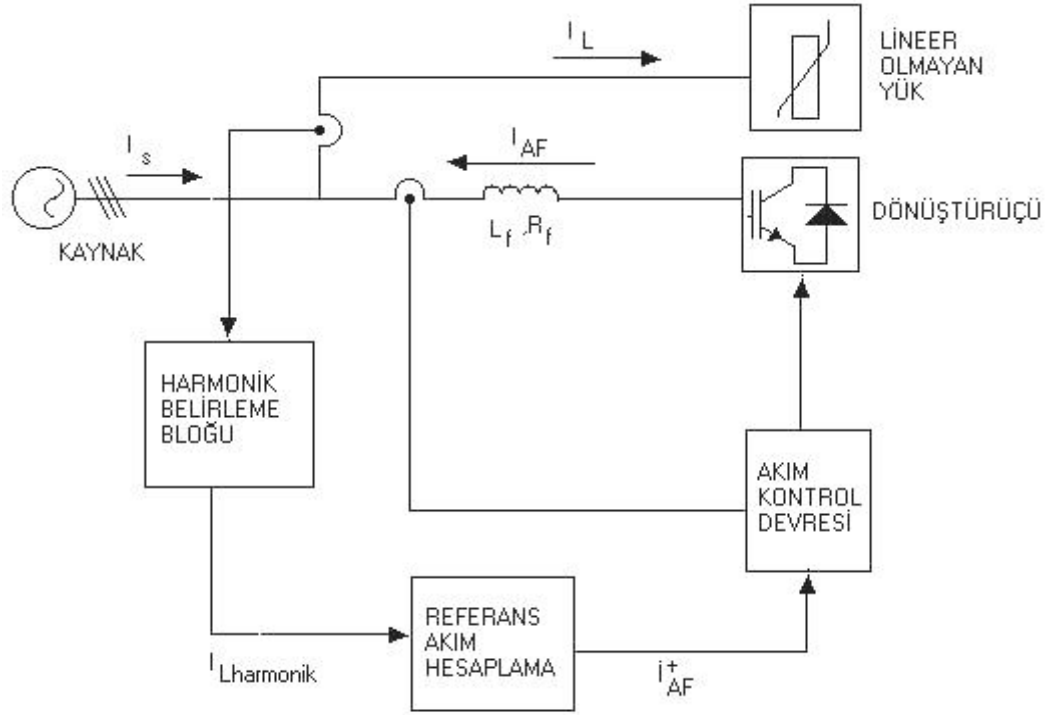
Her bir harmonik bileşen için ayrı filtrelerin kullanılması gerektiğinden sadece en etkili harmonikler seçilir. Ayrıca sisteme eklenen yeni cihazlardan dolayı harmoniklerdeki değişiklik durumunda tekrar hesaplamalarla filtre sisteminin baştan hesaplanması gerekmektedir.

2.7.2.2 Aktif Filtre

Aktif Filtre, pasif filtre ile tamamen farklı bir mantıkla çalışır. Bu filtre çok daha karmaşık bir güç elektroniği devresidir. Sistemdeki harmonik akım ve gerilimleri ölçer ve harmonik akımın ters yönünü devreye tekrar vererek sistemdeki harmonik akımları sıfırlar. Böylece akım sinyali ve dolayısı ile gerilim sinyali sinüs şekline döner. Bu sistemler kapalı kontrol ile çalıştıklarından sinyalin %100'e yakın normal haline gelmesi beklenir. Aktif filtrenin yapısı, pasif filtre yapısından tamamen farklı olup bir güç elektroniği sistemidir.

Aktif filtreler pasif filtrelere göre pahalı olmakla birlikte çok sayıda harmonik frekansı için ayarlanabilirler. Ayrıca aktif filtreler, mevcut sistemde değişiklik yapıldığı zaman bile harmonikleri yok etmeye devam ederler ki bu, onların en önemli üstünlükleridir (Kocatepe ve ark. 2003).

Aktif güç filtresi, dönüştürücü, akım kontrol devresi ve harmonik belirleme bloğu olmak üzere üç kısımdan oluşur. Şekil 2.5'de aktif güç devresinin prensip şeması gösterilmiştir (Gonzales 1987).



Şekil 2.5 Aktif güç filtresinin prensip şeması

Aktif filtreler harmonikleri yok eder, güç faktörünü düzeltir ve otokontrolünü yapar. Bu filtreler hiçbir şekilde harmonik üretmez ya da harmonik derecesini artırmaz

2.8 Harmonik Standartları

Harmoniklerin etkisinin sistemde yol açtığı zararları en aza indirebilmek ve enerji kalitesinin üst düzeyde tutabilmek amacı ile harmoniklerle ilgili standartlar oluşturulmuştur. Bu standartlar ülkelere göre değişmektedir.

Uluslararası IEC 519-1992 'ye göre standartlar içinde kabul edilen harmonik bozulma değerleri, gerilim için % 3, akım için % 5 olarak belirlenmiştir . Bu limit değerlerinin üzerinde bulunan harmonik oranlarında, elektrik sistemleri için tehlikeli ve büyük maddi zararlar oluşturabilecek problemler meydana gelmektedir.

Elektrik Güç kalitesinin bozulması ile ilgili belli başlı standartlar:

- EN 50 006 ‘‘The Limitations of Disturbances in Electricity Supply Networks caused by Domestic and Similar Appliances Equipped with Electronic Devices’’ Comite Europeen de Normalisation Electrotechnique, CENELEC.
- IEC Norm 555-2 555-3, Ineternational Energy Commission
- IEC 1000-3-2,1995,(EN 6100-3-3) 1995 Alçak gerilimde gerilim dalgalanması ve fliker sınırlarını belirler.
- VDE 0838 Beyaz Eşya, VDE 0160 Çeviriciler, VDE 0712 Floresant
- IEEE 519-1992 ‘‘Guide for Harmonics Control and Reactive Compensation of Static Power Converters, ANSI/IEEE Std.519
- TS 9882: Ev tipi cihazlar ve benzeri elektrik donanımının elektrik besleme sistemlerinde yol açtığı bozulmalar. Bölüm 2: Harmonikler
- EN 6100-3-2:Elektromanyetik uyumluluk (EMC) –Kısım 3. Sınırlar, Bölüm2:
- Harmonik akım emisyon sınırları (Faz başına 16 A’dan küçük cihazlar).
- IEC 1000-3-4:Elektromanyetik uyumluluk (EMC) –Kısım 3. Sınırlar ,Bölüm4:3
- Harmonik akım emisyon sınırları (Faz başına 16 A’dan büyük cihazlar)
- IEC 1000-2-2:Elektromanyetik uyumluluk (EMC) –Kısım 2: Düşük frekanslı iletken dağıtımları ve düşük gerilim sistemleri işletlemede uyumluluk seviyeleri

3. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada, Bolvadin Sanayisinde yer alan Afyon Alkaloidleri Fabrikası İşletmesindeki enerji kalitesinde harmoniklerin etkileri incelenmiştir.

Afyon Alkaloidleri Fabrikasında, 1 Ocak 2008 tarihinden itibaren geçerli olmak üzere indüktif gücün aktif güce oranının %33' den %20' ye çekilmesi ve aynı şekilde kapasitif gücün aktif güce oranının %20' den %15' e çekilmesi konusunun gündeme gelmesinden dolayı 2007 yılında kompanzasyon sistemi ile ilgili geliştirme çalışmaları başlamıştır. Bu dönemde fabrikanın enerji dağıtım kurumuna karşı sorumlu olduğu ana sayaçtaki indüktif gücün aktif güce oranının %27 civarında idi. Bu oranın düşürülmesi amacı ile birkaç adımda iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

Bunlar:

- Kondansatör sayısı ve güç çeşitliliği artırılmıştır,
- Trafoları reaktif güç ihtiyacı güç kontrol rölesi tarafından algılanamadığından trafo gücüne uygun sabit kondansatörler konulmuştur,
- Güç kontrol rölesinin bağlı olduğu akım trafosu 3000/5' lik iken rölenin hassasiyetini artırmak amacı ile bu akım trafosu 2000/5' lik olarak değiştirilmiştir,
- Mevcut Reaktif Güç Kontrol Röleleri (GKR), Resim 3.1' deki 3 fazlı bir GKR ile değiştirilmiştir,



Resim 3.1 Reaktif güç kontrol rölesi

- Fabrika her ne kadar ağırlıklı olarak üç faz yüklerle beslense de tek fazlı yüklerden dolayı çekilen akımlarda dengesizlik olduğu tespit edilmişti. Mevcut GKR tarafından yalnızca tek bir akım trafosundan akım ölçüp diğer 2 fazın da aynı değerde olduğunu varsayıliyordu. Yeni GKR ile birlikte akım trafosu sayısı birden Resim 3.2’de görüldüğü gibi üçe çıkarılmıştır. Böylece her bir fazın akım değerinin ayrı ayrı ölçülmesi sağlanmıştır.



Resim 3.2 RGK’nin değer aldığı 3 adet akım trafosu

- Yeni GKR ile yük dengesizliği durumunda fazların ayrı ayrı kompanze edilebilmelerini sağlayan tek fazlı kondansatör bağlantısı yapılabilme imkânı oluşmuştur,
- Mevcut GKR ile en az 10 saniye olan kondansatörün devreye girme ve çıkma süresi yeni GKR ile 1 saniyeye düşürülmüştür.

Böylece %27 olan indüktif gücün aktif güce oranı, %7 civarına düşürülmüştür. Ancak bu çalışmaların sonrasında sistemde bazı sorunlar meydana gelmeye başlamıştır. Fabrika 2005 yılından itibaren teknolojisini yenilemeye başlamış ve sürücülü sistemlere geçmiş, özellikle üretim ve laboratuarda kullanılan elektronik cihazlar yenilenmiş ve sayıca artmış, UPS kullanım alanı artmıştır.

Sistemdeki sorunlar ile kompanzasyon sisteminin kapasite artımı ve artan

hassasiyetinden dolayı sisteme sürekli değişen kondansatör bağlayıp çıkarması ve ayrıca fabrikadaki yenilenen teknolojik cihazlar arasında bir bağlantı olup olmadığı incelenmeye çalışılmıştır.

Bu süreçte karşılaşılan elektriksel sorunlar:

- Kondansatörlerde patlamalar,
- Kondansatörlerde önceki yıllarda yapılan ölçümlere göre daha kısa bir sürede kapasite azalması,
- Kompanzasyon panosunda ısınma sıcaklık artışı,
- Kondansatör kablolarında ısınma sonrası erimeler,
- Fabrikanın doğru akım redresörünün kendisinde ve bağlantısında hiçbir sorun olmamasına rağmen belirsiz aralıklarla devreden çıkması,
- Fabrika geriliminde flicker olarak adlandırılan kırpışmalar ve gerilim sönümlerinde belirgin artış,
- Alçak Gerilim odasında bulunan ve trafo çıkışına bağlı bulunan ana şalterde nedensiz açılmalar,
- A.G. ana şalterlerinde gürültülü çalışma,
- Motor yanmalarında artış,
- Fabrikayı besleyen ana 2 trafodan birinde nominal değerlerin altında çalışması, ortam havalandırılmasının yapılması ve yağ analizlerinde de sorun çıkmamasına rağmen aşırı ısınma meydana gelmesi,
- Özellikle laboratuarda Kaçak Akım Koruma (KAK) şalterleri ile sigortalarda dönem dönem sıklaşan açmalardır.

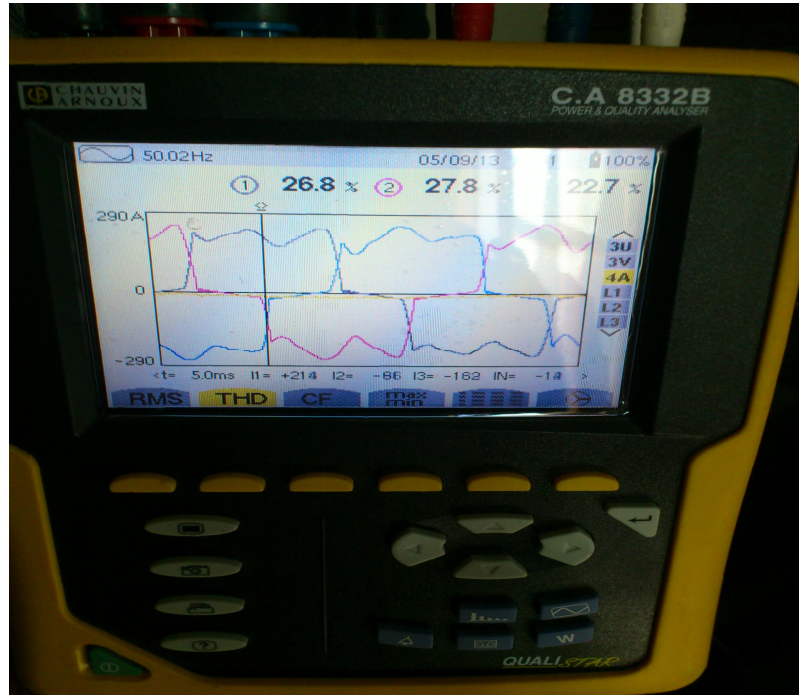
Bu sorunlar bazı dönemler daha sık yaşanmış bazı dönemlerde ortadan kalkmıştır. Bu sorunların bir kısmına bireysel çözümler yapılmıştır. Mesela kullanılan kondansatörlerin nominal gerilim değerleri daha yüksek olanlarla değiştirilmiş, pano soğutmasına ilaveler yapılmış, trafo yağındaki bozulmanın yağ değişimi için sınır değere henüz gelmemesine rağmen yağ değişimi yapılarak trafodaki ısınmanın azaltılması sağlanmıştır. Ancak bu sorunların elle tutulamamasına rağmen harmonik kaynaklı olabileceği düşüncesi ile bir enerji analizörü ile fabrikada ölçümler yapılmış ve fabrikada ileri düzeyde bir harmonik

sorunu olduğu anlaşılmıştır.

Kullanılan Enerji Analizörü ile AC gerilim ölçümleri, 6500 A'e kadar akım ölçümleri, frekans ölçümleri, akım ve gerilim pik faktörlerinin hesaplanması, akım ve gerilimde faz dengesizliğinin hesaplanması; aktif, reaktif ve görünür güç ölçümü, güç, kayma ve tanjant faktörlerinin hesaplanması yapılabilmektedir.

Enerji analizörü ile ayrıca gerilim ve akım harmoniklerinin 50. Dereceye kadar değerleri, temel bileşene göre açılarının ölçümü, Resim 3.3' de görüldüğü gibi toplam harmonik distorsiyonun hesaplanması yapılabilmektedir.

Cihazın en önemli özelliklerinden biri de kesinti, gerilim ve akım değerleri, harmonikler, güç değerleri gibi pek çok parametrenin zamana göre değişimini kaydedebilmesidir. Resim 3.4'de enerji analizörü ile yapılan bir ölçüm görülmektedir.



Resim 3.3 Enerji Analizörü



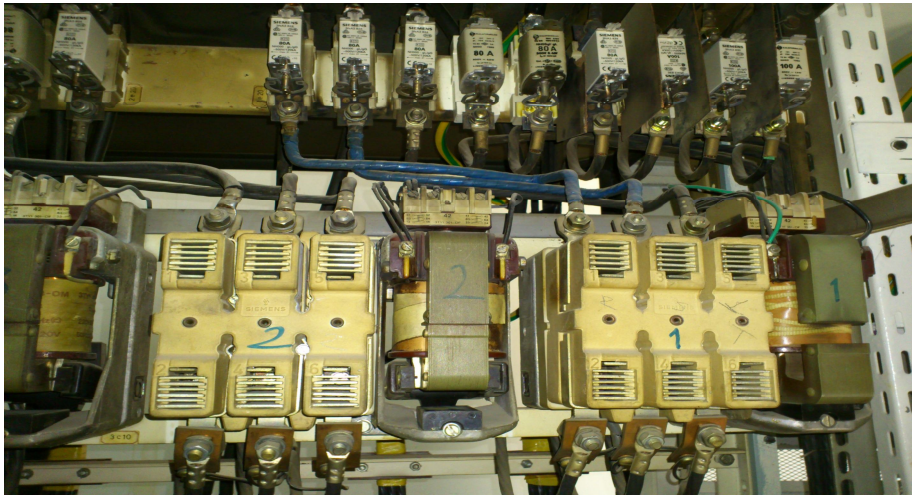
Resim 3.4 Enerji analizörü ile ölçüm yapılması

Yapılan ölçüm sonuçlarına geçmeden fabrika yapısını anlatmak gerekirse, fabrikaya enerji TEİAŞ SEKA Trafo Merkezi üzerinden, 1 hat Çay Dağıtım Merkezi (ÇDM)'nden diğer hat da Bolvadin Dağıtım Merkezi'nden (BDM) olmak üzere 2 hat olarak gelmektedir. BDM üzerinden gelen hat fabrikada yedek hat olarak bulunmaktadır, ancak Su Tasfiye trafosu ve lojman trafosu bu hattın beslenmektedir. Resim 3.5' de görünen fabrika alçak gerilim dağıtım odası (AGDO), 2 adet 34.5/0.4 KV, 1600 KVA'lık AEG-ETİ marka trafodan beslenir. AGDO'nda trafo çıkışları 2 ayrı panodan dağıtılır, bu panoların enerjisi 1100 KVA'lık 2 ayrı jeneratörle yedeklenir.



Resim 3.5 Alçak Gerilim Dağıtım Odası

Her panonun kompanzasyon sistemi ayrıdır. Her kompanzasyon panosunda 1 adet GKR bulunur. 440V gerilime dayanan 50 KVAR ile 70 KVAR arasında değişen muhtelif güçlerde kondansatörler bulunmaktadır. Kompanzasyon Resim 3.6 ve Resim 3.7’ de görüldüğü gibi halen kontaktörlü klasik yöntemle yapılmaktadır.



Resim 3.6 Kontaktörlü kompanzasyon sistemi



Resim 3.7 Kompanzasyon sisteminde kullanılan kondansatörler

Fabrikada Trafo1' den beslenen hatlar şunlardır:

- Derive
- Kalite kontrol binası
- Isı santrali
- Hidrafor
- Soğutma Kulesi
- Kimyevi Depo
- B ve C deposu
- AR-GE

Fabrikada, Trafo-2' den beslenen hatlar ise şunlardır:

- Ekstraksiyon-1
- Ekstraksiyon-2
- Ekstraksiyon-3
- Ekstraksiyon-4
- Seperatör
- Pres
- İdari bina

Ayrıca fabrika sahası içinde, Su Tasfiye binası, Tohum Üretim ve Haşhaş binası ile

seranın beslendiği 160 KVA' lık Su Tasfiye trafosu ile lojmanların beslendiği 630 KVA' lık Lojman trafosu mevcuttur. Bu iki trafonun enerjisi fabrika trafolarından ayrı olarak Bolvadin dağıtım merkezinden gelmektedir.

Ölçüm çalışmaları harmonik değerlerin en yüksek olduğu Trafo-2' nin beslediği dağıtım panosundan beslenen hatlarda yapılmıştır.

4. BULGULAR

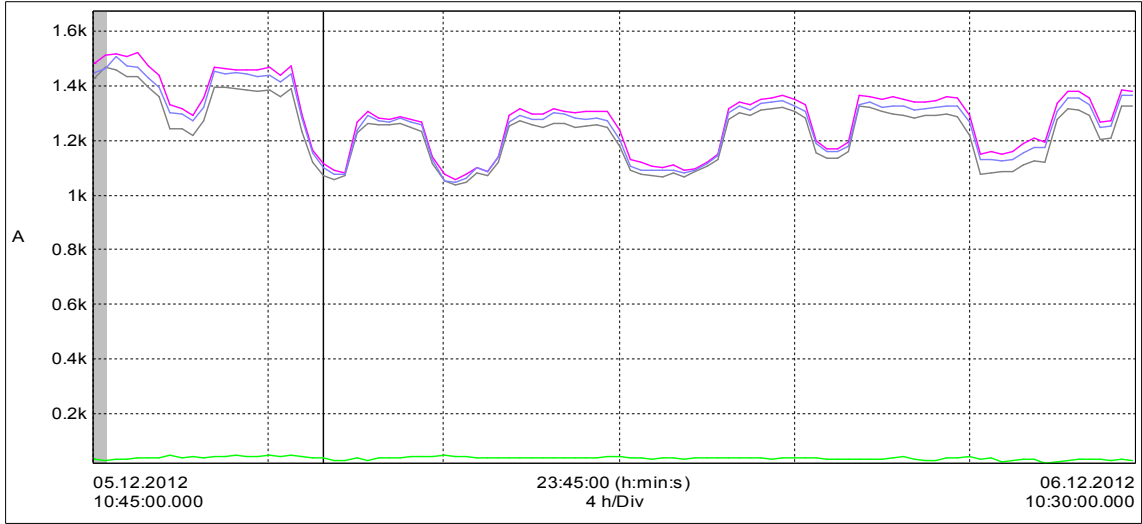
Afyon Alkaloidleri Fabrikası'nda yapılan harmonik ölçüm sonuçları değerlendirilirken göz ardı edilmemesi gereken konu, bu hatlarda ölçüm yapılırken yalnızca o hatta bağlı yüklerin sebep olduğu harmonikler ölçülmez. Örneğin prese ait harmonik ölçümlerinde seperatörlerin etkisi ile birlikte, trafo-1'e bağlı yüklerin etkisi, hatta enerji dağıtım şirketinden fabrikaya gelen şebekedeki harmonik bozulmalar da ölçülür. Enerji hattı bir havuz gibi düşünülürse enerji çeken bütün hatlar hem bu hattın enerji kalitesini birlikte bozuntuya uğratırlar, hem de tekrar buradan enerji çekerek kendi hatlarındaki bozulmayı artırır. Bu şekilde bir kısır döngü oluştururlar.

Bu çalışmada yapılan ölçümlerin daha doğru değerlendirilmesi için öncelikle şebeke harmonik değerlerinin belirlenebilmesi için fabrikanın yük çekmediği dönemde ölçüm yapılması gerekmektedir. Bu amaçla fabrika enerjisi kesilerek şebekeden gelen gerilim harmoniğinin %3 civarı olduğu tespit edilmiştir. Ancak fabrika enerjisi kesildiğinde herhangi bir akım çekilmediği için akım harmoniği de ölçülememiştir. Akım harmoniğinin ölçülebilmesi için fabrikanın enerjisi kesilerek Çay Dağıtım Merkezi çıkışından bir ölçüm yapılması gerekmektedir. Böylece, şebekeden fabrikaya gelen enerji kalitesindeki bozulma ile fabrikanın kendi ürettiği harmonik daha iyi analiz edilebilecektir.

Ayrıca sistemin durdurularak her hattın müstakil harmonik bozulmalarının tespiti amacı ile cihazların tek tek devreye alınması daha uygun olacaktır. Ancak bu durum da fabrika şartlarına uygun değildir. Bunun nedeni fabrikada 24 saat devam eden proses nedeni ile cihazlar birbirine bağlı olarak ve daimi çalışmaktadır. Her hangi bir hatta enerji kesmek mümkün değildir.

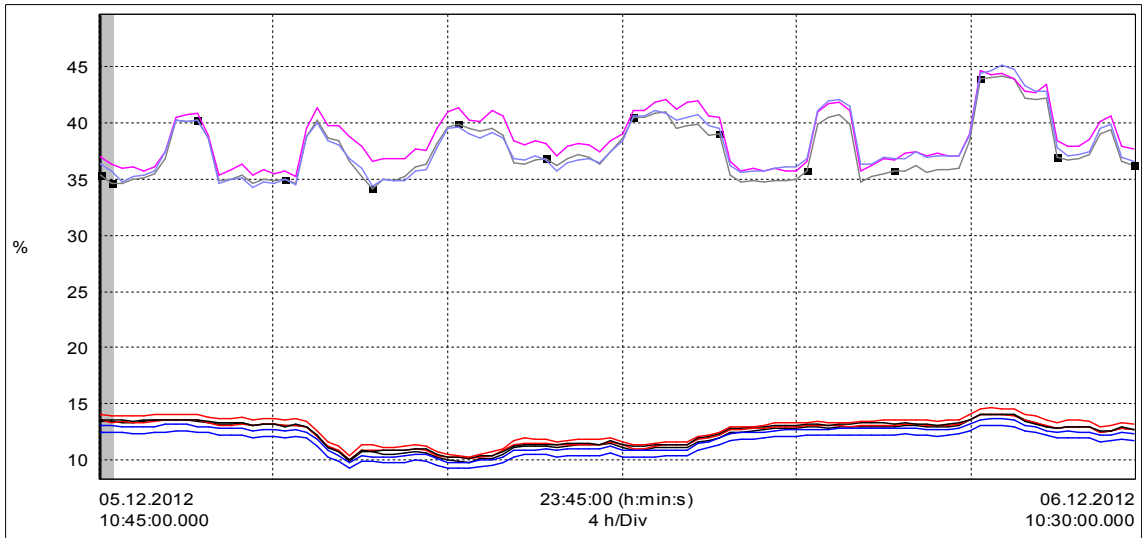
Afyon Alkaloidleri Fabrikası'ndaki enerji kalitesi üzerine yapılan çalışmada, daha yoğun bozulmanın olduğu Trafo-2' den beslenen hatlarda enerji analizörü ile yapılan ölçüm sonuçlarının program çıktıları ve analizlerin yorumları:

1. Trafo-2 çıkışında 05.12.2012 tarihinde 24 saate yakın yapılan ölçümde akım değerlerinin 1039 A ile 1522 A arasında değiştiği Şekil 4.1’ deki cihaz kaydından tespit edilmiştir.



Şekil 4.1 Trafo-2’ye ait 3 faz ve nötr akım değerlerinin zamana göre değişimi

Aynı ölçümde, akım harmoniklerinin %34.1 ile %45.2 arasında, faz-nötr arası gerilim harmoniklerinin %9.7 ile %14.1 arasında değiştiği Şekil 4.2’ deki cihaz kaydından tespit edilmiştir.



Şekil 4.2 Trafo-2’ ye ait akım, fazlar arası gerilim ve faz –nötr arası gerilim harmoniklerinin zamana göre yüzdesel değişimi

Bu oran standartlara göre akım harmoniğinin %8'i gerilim harmoniğinin %5'i geçmemesini belirleyen sınırı fazlası ile aşmaktadır.

Yine aynı ölçümde akım harmoniklerinin, akımın etkin değerinin arttığı evrelerde düştüğü, akımın etkin değerinin azaldığı evrelerde yükseldiği Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'deki cihaz kayıtlarından tespit edilmiştir.

Ayrıca sabah 06:00 civarında akım harmoniğinde yükselme olduğu Şekil 4.1'deki cihaz kaydından tespit edilmiştir. Belirtilen saatte fabrika çalışmasında bir değişiklik olmayıp, bu etkinin fabrikanın dış aydınlatma sisteminin ve fabrikayla aynı şebekeye bağlı olan diğer dış aydınlatma sistemlerinin devreden çıkmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

Aynı tarihli ölçümde güç faktörü (pf) değeri ortalama 0,932 geri iken kayma faktörü (dpf) değeri ortalama 0.998 geri olduğu Çizelge 4.1'deki cihaz kaydından tespit edilmiştir. Sistemdeki reaktif güç kontrol rölesinin cosφ değeri 1'e ayarlı olmasına rağmen cihazda gösterilen cosφ değerine karşılık gelen dpf değerinin 0.998 geri olmasının, mevcut GKR'nin hassasiyeti ile kullanılan cihazın hassasiyeti arasındaki farktan kaynaklandığı düşünülmektedir.

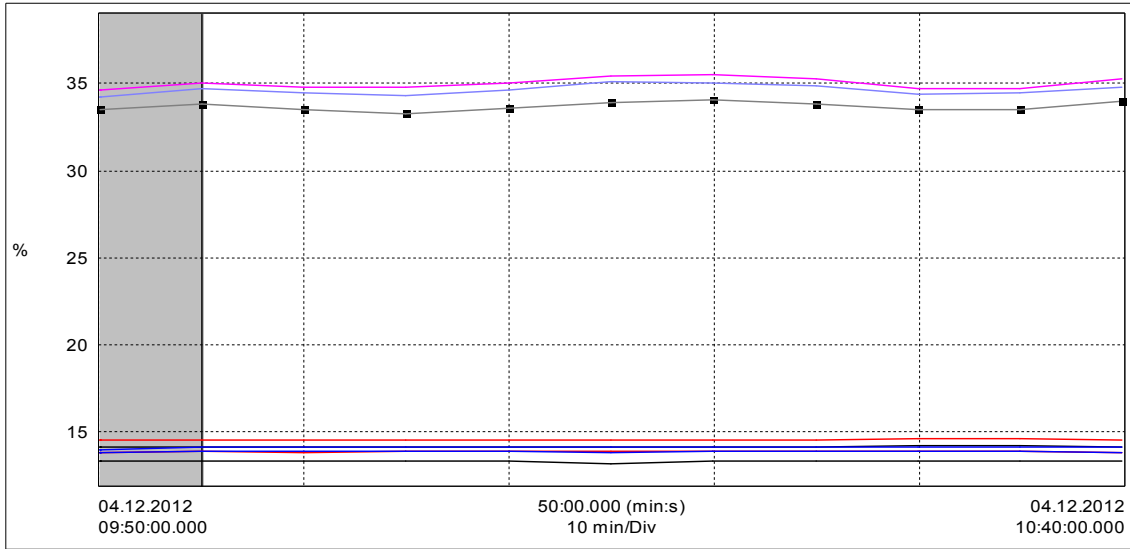
Çizelge 4.1 Trafo-2' ye ait dpf, pf ve tanjant değerleri.

İsim	Tarih	Zaman	Ort.	Min.	Max.	Birimler
DPF Ortalama	05.12.2012	10:45:00.000	0.998	0.997	0.999	
DPF1	05.12.2012	10:45:00.000	0.998	0.996	0.999	
DPF2	05.12.2012	10:45:00.000	0.998	0.996	0.999	
DPF3	05.12.2012	10:45:00.000	0.998	0.997	0.999	
PF Ortalama	05.12.2012	10:45:00.000	0.932	0.916	0.942	
PF1	05.12.2012	10:45:00.000	0.931	0.915	0.94	
PF2	05.12.2012	10:45:00.000	0.931	0.916	0.942	
PF3	05.12.2012	10:45:00.000	0.934	0.917	0.945	
Tan Ortalama	05.12.2012	10:45:00.000	50.5	35	75	%
Tan1	05.12.2012	10:45:00.000	52.052	25	85	%
Tan2	05.12.2012	10:45:00.000	54.781	37	83	%
Tan3	05.12.2012	10:45:00.000	44.594	23	61	%

pf değeri ile dpf değeri arasındaki fark ise mevcut GKR' nin yapısı gereği harmonik bozulmaları hesap dışı bırakmasından dolayı kompanzasyonda yaptığı hatanın

büyükliğini göstermektedir. Bu durum mevcut reaktif güç kontrol rölesinin harmonikleri yok sayılarak yaptığı kompanzasyonun yanıltıcı olduğunu ve yeterli şekilde yapılamadığını göstermektedir.

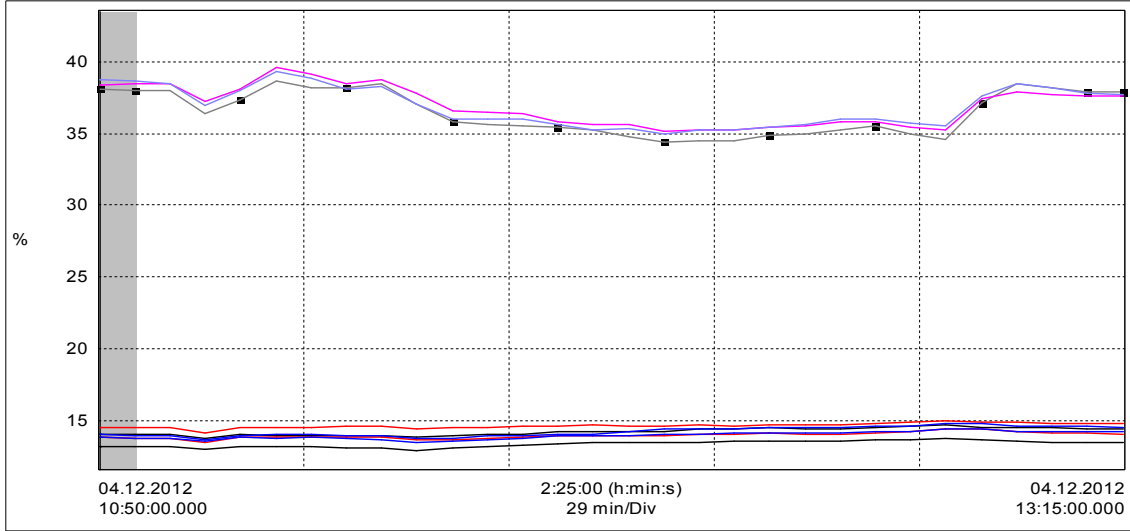
2. Trafo-2' ye bağlı ekstraksiyon -1 hattında 04.12.2012 tarihinde yapılan ölçümde akım harmoniklerinin 3 fazdaki değerlerinin birbirinden en fazla % 1.5 civarında fark gösterdiği ve bu değerlerin %34 civarında neredeyse sabit olduğu Şekil 4.3' deki cihaz kaydından tespit edilmiştir. Yine 3 faza ait gerilim harmoniklerinin birbirine çok yakın olduğu ve gerilim harmoniğinin %14 civarında neredeyse sabit olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.3 Ekstraksiyon -1' ye ait akım, fazlar arası gerilim ve faz –nötr arası gerilim harmonik değerlerinin zamana göre yüzdesel değişimi

Ekstraksiyon-1 hattındaki akım ve gerilim harmoniklerinin yine uluslararası sınır değerleri olan %8 ve %5' in çok üstünde olduğu görülmüştür. Bu hattaki harmonik değerlerinin birbirine çok yakın ve neredeyse sabit olmasının bu hattın tamamına yakınının 3 fazlı ve dengeli yüklerden oluşması, bu yüklerin 24 saat kesintisiz çalışması ve yüklerin çalışma prensibinden olduğu düşünülmüştür.

3. Ekstraksiyon-2 hattında 04.12.2012 tarihinde ölçüm sonucunda akım harmoniklerinin % 35 ila %40 arasında olduğu Şekil 4.4' deki cihaz kaydından tespit edilmiştir.



Şekil 4.4 Ekstraksiyon -2' ye ait akım, fazlar arası gerilim ve faz –nötr arası gerilim harmonik değerlerinin zamana göre yüzdesel değişimi

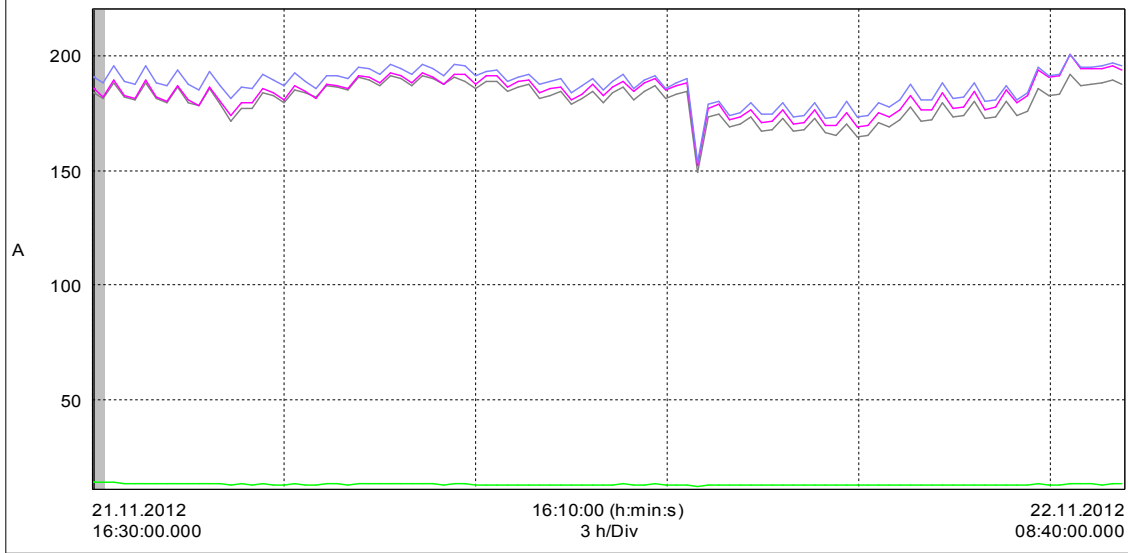
Aynı ölçümde Çizelge 4.2' deki cihaz kaydından tespit edilmiştir dpf ortalama değeri 0.77 geri iken pf ortalama değerinin 0.71 geri civarında olduğu tespit edilmiştir. pf ve dpf değerleri arasındaki fark, hatta harmoniklerin varlığını göstermektedir. Burada güç faktörü değerindeki düşüklüğün sebebi ekstraksiyon-2' ye ait hatta ayrı kompanzasyon olmayıp, merkezi kompanzasyonun trafo-2 çıkışında olmasından dolayıdır.

Çizelge 4.2 Ekstraksiyon-2' ye ait dpf, pf ve tanjant değerleri

İsim	Tarih	Zaman	Ort.	Min.	Max.	Birimler
DPF Ortalama	04.12.2012	10:50:00.000	0,772	0,753	0,792	
DPF1	04.12.2012	10:50:00.000	0,776	0,756	0,798	
DPF2	04.12.2012	10:50:00.000	0,761	0,739	0,782	
DPF3	04.12.2012	10:50:00.000	0,777	0,763	0,796	
PF Ortalama	04.12.2012	10:50:00.000	0,71	0,696	0,724	
PF1	04.12.2012	10:50:00.000	0,716	0,7	0,733	
PF2	04.12.2012	10:50:00.000	0,7	0,684	0,718	
PF3	04.12.2012	10:50:00.000	0,714	0,704	0,726	
Tan Ortalama	04.12.2012	10:50:00.000	0,82	0,765	0,869	
Tan1	04.12.2012	10:50:00.000	0,808	0,75	0,861	
Tan2	04.12.2012	10:50:00.000	0,849	0,791	0,907	
Tan3	04.12.2012	10:50:00.000	0,805	0,755	0,844	

4. Pres hattında 21.11.2012 tarihinde 16 saat boyunca yapılan ölçüm sonucunda 3 fazda çekilen akım değerleri birbirine çok yakın olmasına rağmen akım harmonik değerleri arasında %3' e yakın bir farklılık olduğu Şekil 4.5' deki cihaz kaydından tespit

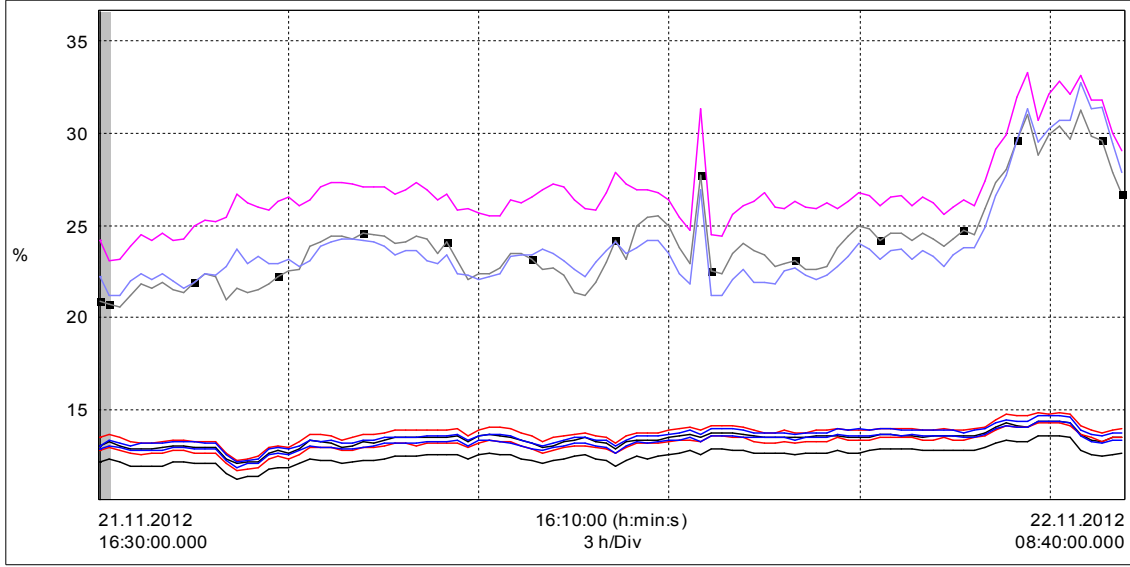
edilmiştir. Bu durumun presin tek fazla çalışan ekipmanlarından kaynaklandığı düşünülmüştür.



Şekil 4.5 Pres hattına ait akım değerinin zamana göre değişimi

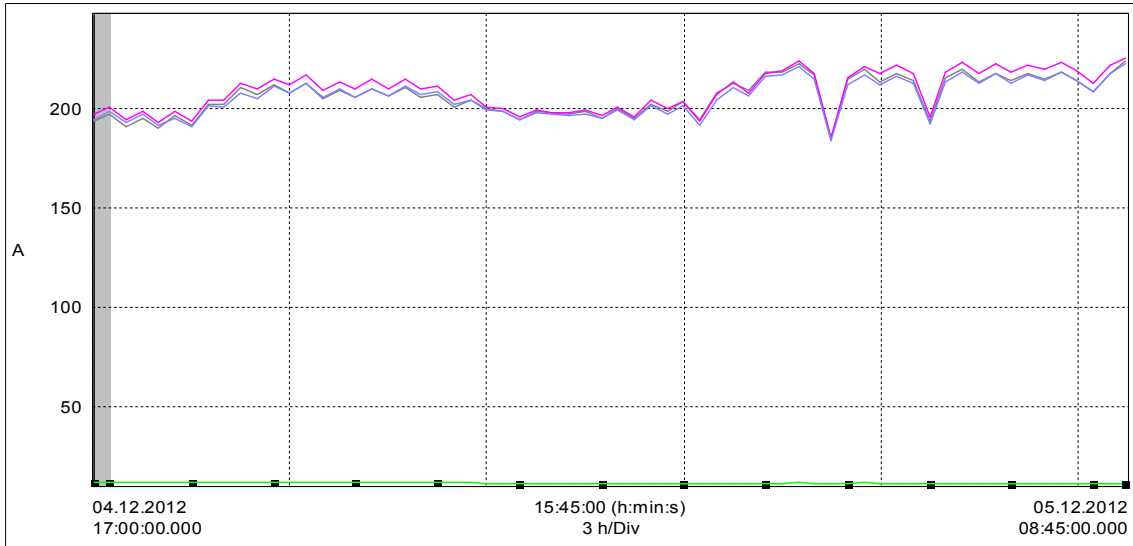
Yapılan ölçümler sonucu Şekil 4.6' daki cihaz kaydından tespit edildiğine göre, %21 ile % 26 arası değişen akım harmoniği saat 17:00 civarındaki ani akım düşüşüne tepki olarak ani bir yükseliş yapmıştır. Eski haline dönen akım harmonik değeri sabah 06:00 civarında ani bir yükseliş yaparak %33 değerine ulaşmış ve tekrar düşüşe geçmiştir. Bu durumun dış aydınlatma sistemlerinin devreden çıkması ile birlikte fabrikanın bağlı olduğu şebekedeki akım değerlerindeki düşüşün etkisi ile olduğu düşünülmektedir.

Yine Şekil 4.6' daki cihaz kaydından gerilim harmoniğinin %12 civarında olmakla birlikte sabah 06:00 civarında %15'lere yaklaşmış, 08:00 civarında eski değerine düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 4.6 Pres' e ait akım, fazlar arası gerilim ve faz –nötr arası gerilim harmonik değerlerinin zamana göre yüzdesel değişimi

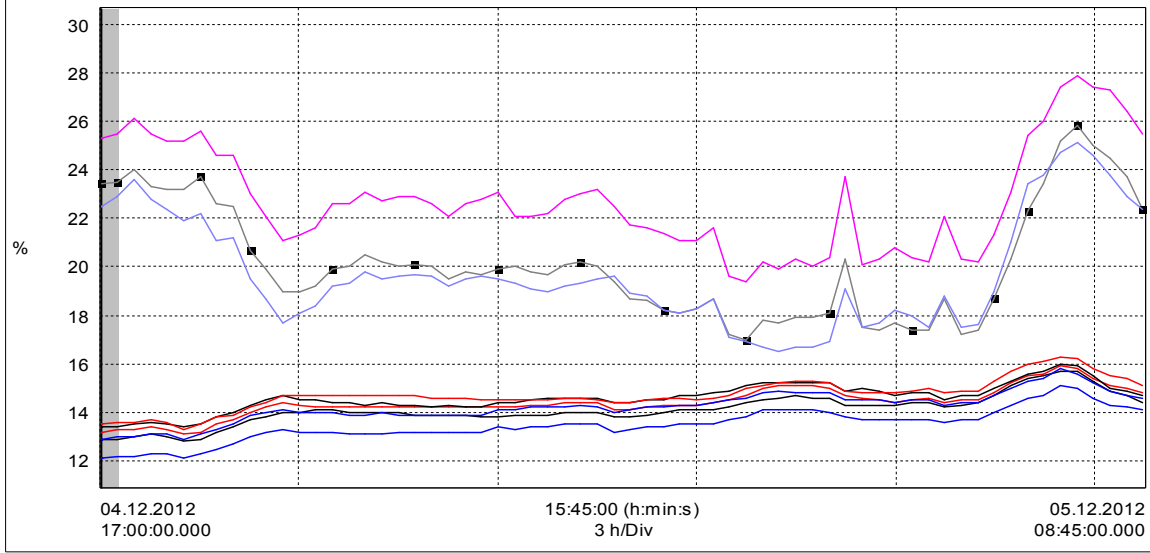
5. Seperator hattında 04.12.2012 tarihinde yapılan 16 saate yakın ölçüm sonucunda, Şekil 4.7' deki cihaz kaydından akım harmoniğinde diğer hatlarda görülmeyen büyük dalgalanmalar tespit edilmiştir.



Şekil 4.7 Seperator' e ait 3 faz ve nötr hattı akım değerlerinin zamana göre değişimi

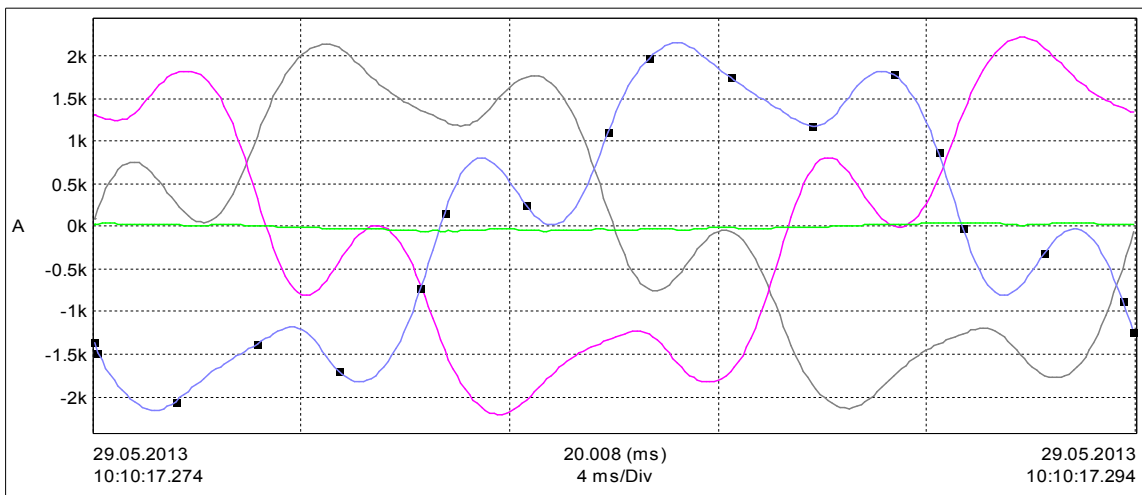
Şekil 4.8' deki cihaz kaydından akım harmoniğinin %16,5 değerini gördüğü gibi % 27,9 değerini de gördüğü tespit edilmiştir. Akım harmoniğindeki bu dalgalanmaya seperatörün etkin akım değerindeki değişikliklerin de etkisi olabileceği düşünülmüştür. Ancak asıl etkinin cihazın çalışma prensibinden kaynaklandığı aşikârdır. Sistem saat

08:00 civarında maksimum akım harmoniği % 27.9 değeri ile gerilim harmoniği de maksimum %14.7 ile azami değerine ulaşmış ve düşük bir ivme ile düşüşe geçmiştir.



Şekil 4.8 Seperator' e ait akım, fazlar arası gerilim ve faz –nötr arası gerilim harmonik değerlerinin zamana göre değişimi

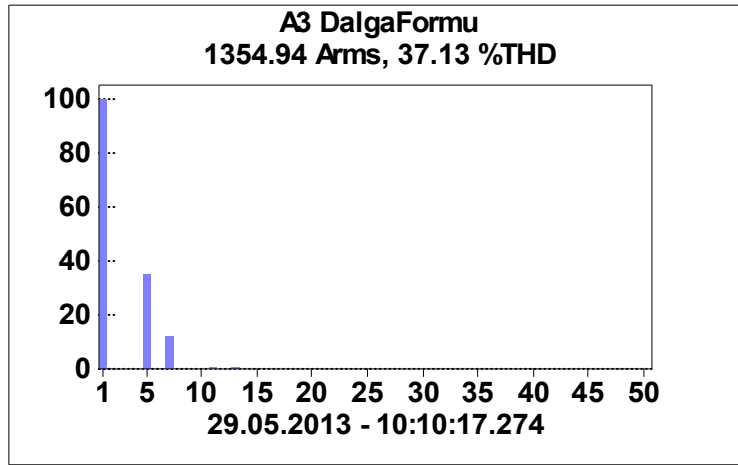
6. Trafo-2 çıkışında 29.05.2013 tarihinde saat 10:10' da çekilen fotoğrafta görüntülenen akım sinyalindeki bozulma Şekil 4.9' da gözlenmektedir. Akım sinyalinin, harmonik etkisinden dolayı sinüs şeklinden oldukça uzaklaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.9 Trafo-2'ye ait 3 faz ve nötr akım dalga şekilleri

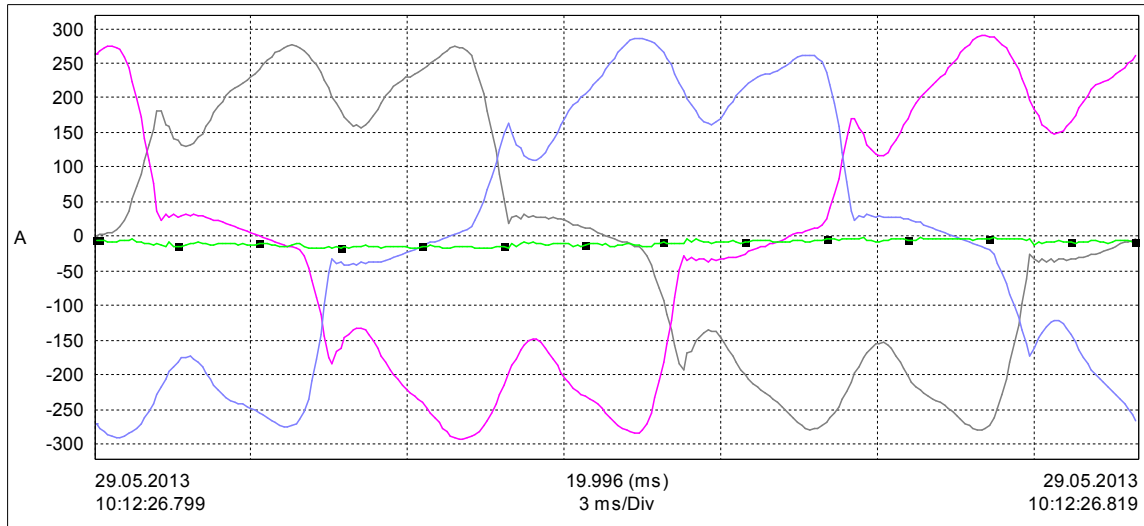
Akım üzerindeki harmoniklerin Şekil 4.10' daki grafiksel gösterimine bakıldığında 5.

ve 7. harmoniklerin etkin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.10 Trafo-2' ye ait A3 fazının tekil harmoniklerinin yüzdesel değerlerinin grafiksel gösterimi

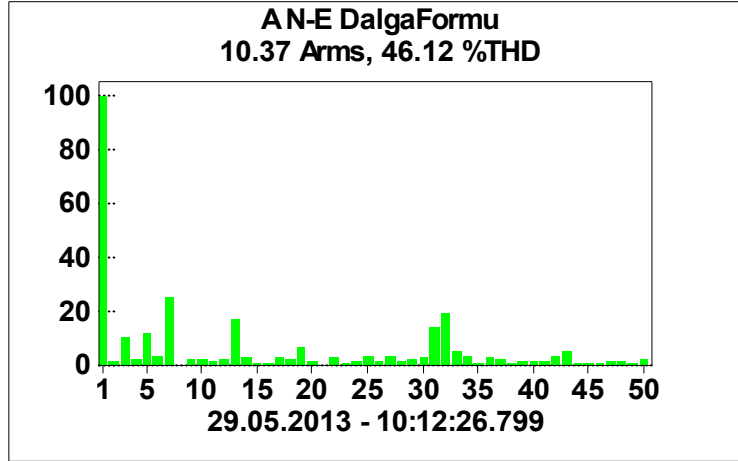
7. Pres hattında 29.05.2013 tarihinde saat 10:12' de çekilen fotoğrafta görüntülenen akım sinyalindeki bozulma Şekil 4.11' de gözlenmektedir. Akım sinyalindeki bozulmanın sistemde mevcut harmonikler ile cihazın çalışma prensibinden ve içyapısından dolayı oluşan harmoniklerden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.11 Pres' e ait 3 faz ve nötr dalga şekilleri

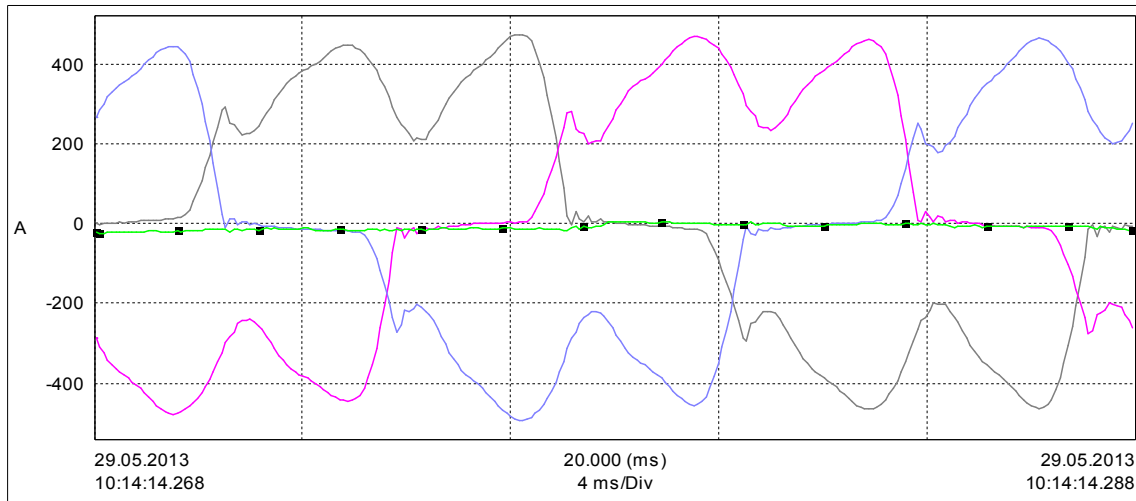
Pres hattında 5. ve 7. harmonik sorunu olduğu Şekil 4.12' de tespit edilmiştir. Hatta çekilen akım şeklinde bariz bozulma gözlenmiştir. Tek harmoniklerin yanında küçük

değerli çift harmonikler de tespit edilmiştir. Baskın harmonik 7. harmonik olmaktadır. Ancak ilerleyen harmonik değerlerinde 13., 31., 33. harmonik değerleri gibi yüksek değerli harmonikleri mevcuttur.



Şekil 4.12 Pres'e ait nötr hattının tekil harmoniklerinin yüzdesel değerlerinin grafiksel gösterimi

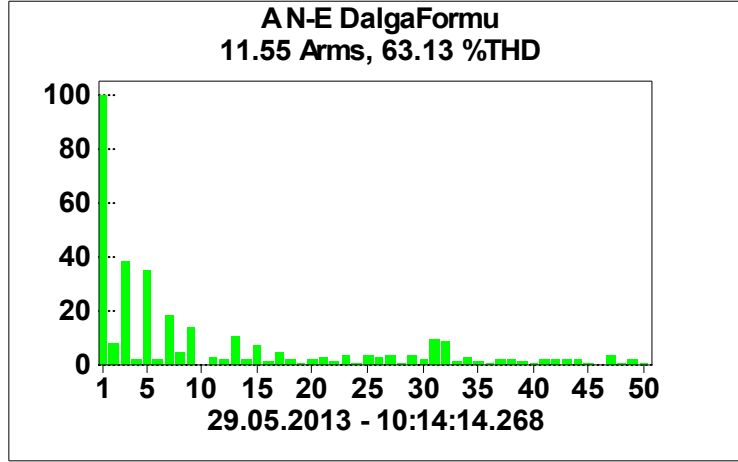
8. Seperatör hattında 29.05.2013 tarihinde saat 10:14' de çekilen fotoğrafta görüntülenen akım sinyalindeki bozulma Şekil 4.13' de gözlenmektedir. Sinyaldeki bozulma sistemdeki harmonikler ile seperatörlerin kendi oluşturdıkları harmoniklerin toplam etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.13 Seperatör'e ait 3 faz ve nötr dalga şekilleri

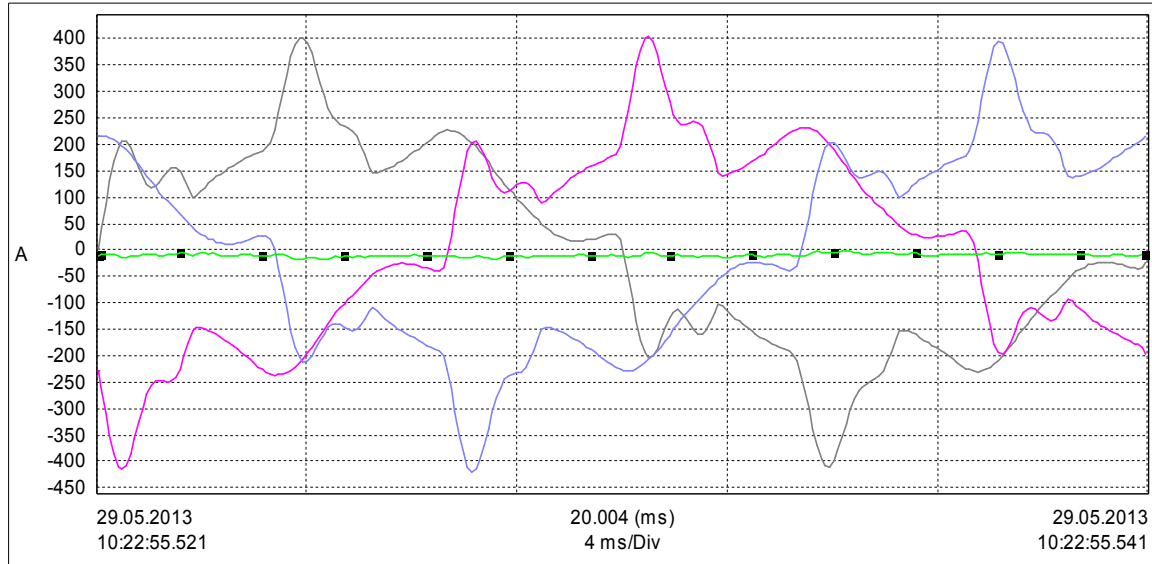
Baskın bozulmaların 3. ve 5. harmonikte %39 ve %35 değerlerinde olsa da 7. ve 9. harmoniklerin de yüksek değerli olduğu Şekil 4.14' de gözlenmektedir. Burada preste

olduğu gibi 31. ve 32. harmonik etkisi olmakla birlikte presteki kadar etkin değildir. Yine preslerde olduğu gibi küçük değerli çift harmonikleri de tespit edilmiştir.



Şekil 4.14 Separatör'e ait nötr hattının tekil harmoniklerinin yüzdesel değerinin grafiksel gösterimi

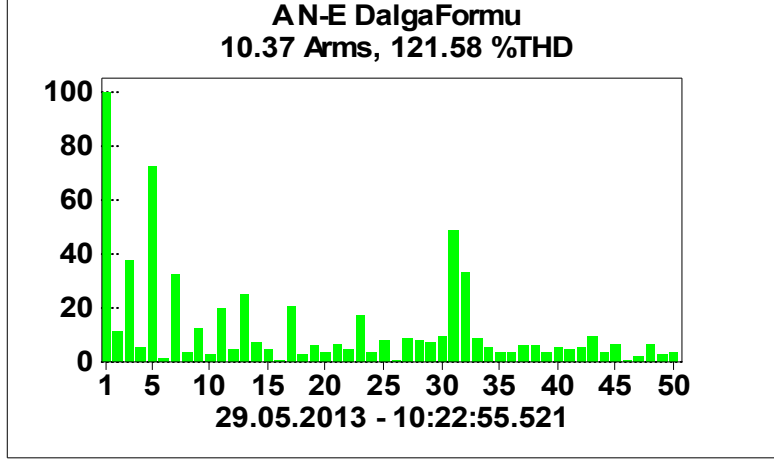
9. Ekstraksiyon-1 hattında 29.05.2013 tarihinde saat 10:22' de çekilen fotoğrafta görüntülenenen akım sinyalindeki bozulmanın çok yüksek seviyede olduğu Şekil 4.15' de gözlenmektedir.



Şekil 4.15 Ekstraksiyon-1'e ait 3 faz ve nötr dalga şekilleri

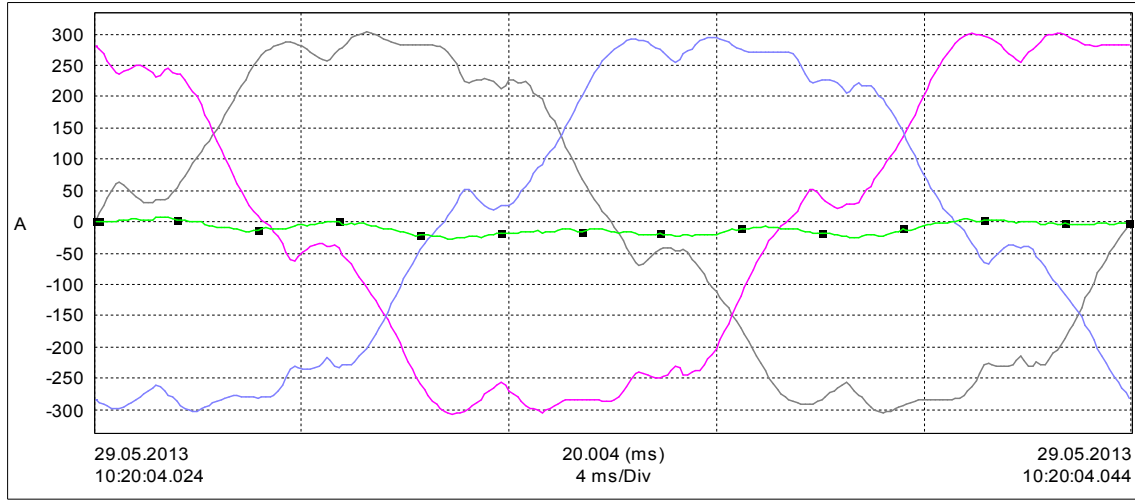
Şekil 4.16' da yüksek değerli tek harmonikler ve 50. harmoniğe kadar giden %1 ila %10 arasında değişen çift harmoniklerin mevcut olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında 5.

harmoniğin %73.1 iken, 31. harmoniğin %49.3, 3.,7. ve 32. harmoniklerin %32 ila %38 arasında olan baskın harmonikler olduğu gözlenmektedir.



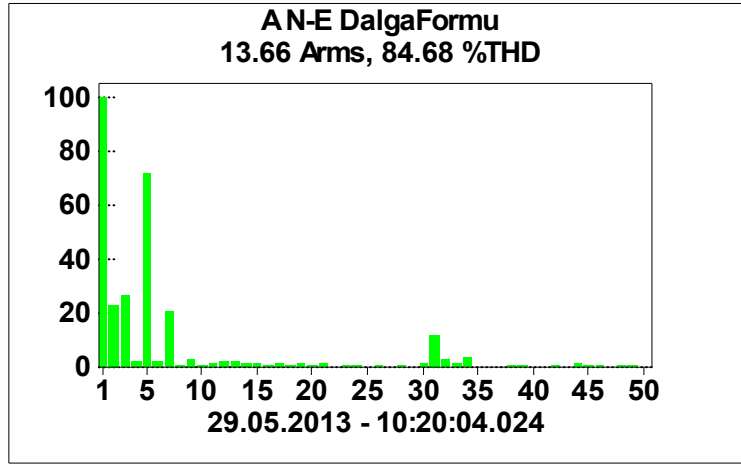
Şekil 4.16 Ekstraksiyon-1'e ait nötr hattının tekil harmoniklerinin grafiksel gösterimi

10. Ekstraksiyon-2 hattında 29.05.2013 tarihinde saat 10:20' de çekilen fotoğrafta görüntülenen akım sinyalindeki bozulmanın ekstraksiyon -1'dekine göre nispeten az olduğu Şekil 4.17' de gözlenmektedir.



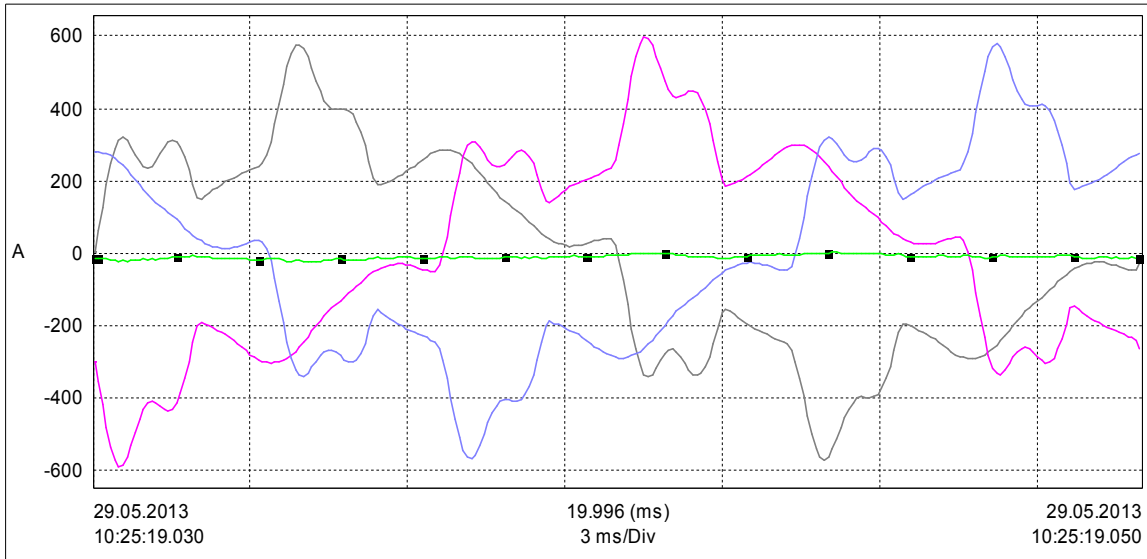
Şekil 4.17 Ekstraksiyon-2'ye ait 3 faz ve nötr dalga şekilleri

Şekil 4.18' de dikkat çeken yine 5. harmonik %72 iken, etkin harmoniklerin yayılmış halde olmadığı, bunların 2., 3. ve 7. harmonikler olduğudur. Bu harmoniklerin değeri %20 ila %27 arasındadır. Bir de 30. harmoniğin değeri %12,5' dir.



Şekil 4.18 Ekstraksiyon-2'e ait nötr hattının tekil harmoniklerinin grafiksel gösterimi

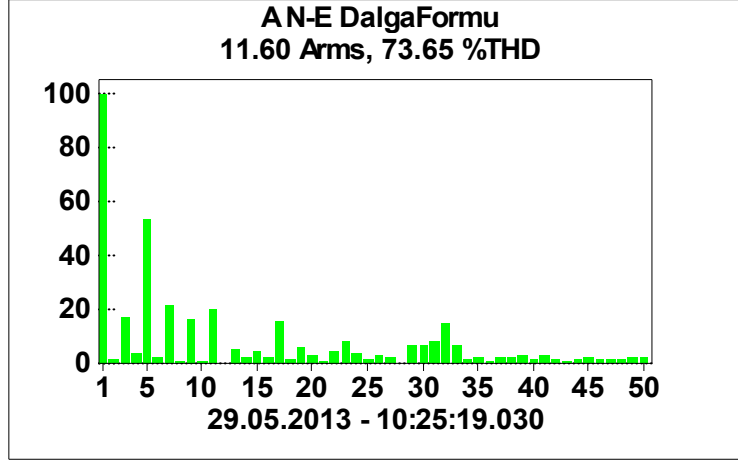
11. Ekstraksiyon-3 hattında 29.05.2013 tarihinde saat 10:25' de çekilen fotoğrafta görüntülenen akım sinyalindeki bozulmanın ekstraksiyon -1'e benzer özellik gösterdiği Şekil 4.19' da gözlenmektedir.



Şekil 4.19 Ekstraksiyon-3'e ait 3 faz ve nötr dalga şekilleri

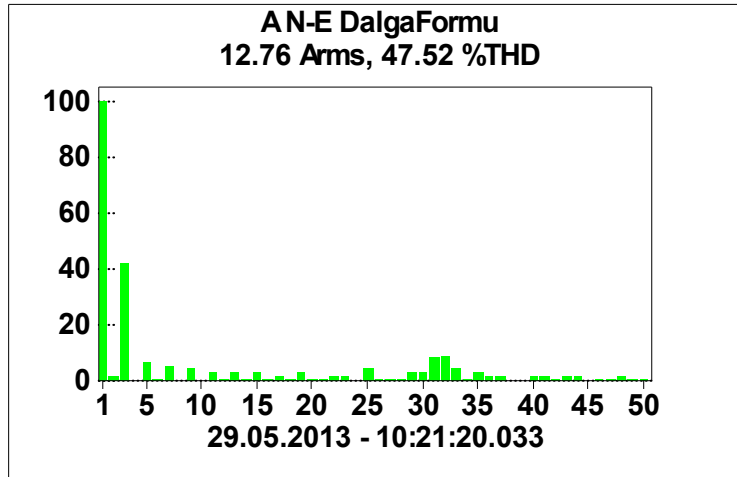
Dolayısı ile Şekil 4.20' de görüldüğü gibi akım harmonik diagramı da benzerlik göstermektedir. Bu benzerlikler daha düşük seviyede olsa da yaygın çift harmonikler, pek çok sayıda yüksek etkin değerlikli tek harmonikler ve 30. harmonik yakınındaki daha düşük değerli olsa da belirgin harmoniklerdir. 5. harmonik %53.7 iken, 3., 7., 9.,

11.ve 17. harmonikler %15 ile %22 değerleri arasındadır. Ayrıca, 32. harmonik %14,8’ dir.



Şekil 4.20 Ekstraksiyon-3’e ait nötr hattının tekil harmoniklerinin grafiksel gösterimi

12. Ekstraksiyon-4 hattında 29.05.2013 tarihinde saat 10:21’ de çekilen fotoğraf görüntüsünün yer aldığı Şekil 4.21’ in incelenmesi sonucunda yalnız 3. harmonikteki %42’ lik tek bir baskın harmoniğin olduğu tespit edilmiştir. %10’un altında olsa da 30. harmonik etrafındaki belirgin harmoniklerin sistemden geldiği düşünülmektedir .



Şekil 4.21 Ekstraksiyon-4’e ait nötr hattının tekil harmoniklerinin grafiksel gösterimi

5. SONUÇ

Bu bulgular ışığında Afyon Alkaloidleri Fabrikası enerji sistemi, harmonik yönünden değerlendirildiğinde, kabul edilemez bir harmonik sorunu olduğu tespit edilmiştir. Sistemin her hattındaki akım harmonik değerleri sınırların çok üzerindedir. Gerilim harmonikleri de yine %3 sınırının üzerindedir.

Bundan sonra yapılacak enerji kalitesini düzeltme çalışmasında 2 farklı yol izlenebilir.

1. Fabrikanın 2 ana trafosu çıkışında merkezi harmonik filtre sistemi kurmak,
2. Her hatta, gerekirse her yüke ayrı ayrı harmonik filtre sistemi kurmak.

Merkezi bir harmonik filtre sistemi kurulduğu zaman ekonomik olarak çok daha uygun olacaktır. Bunun yanında harmoniklerin Dağıtıcı Şebekeye geçmesi engellenecektir. Yakın zamanda uygulamaya geçmesi beklenen harmonik sınırı aşım cezasının ödenmesi engellenecektir. Ancak, komşu tesislere verilecek zarar engellenmekle birlikte sistem içindeki harmoniklerden kaynaklanan sorunlar devam edecektir. Bu nedenle bu uygulama bahsettiğimiz fabrika için uygun değildir.

Diğer durumda her hatta mevcut harmonik üreten yüklere bireysel olarak filtre takılması gerekmektedir. Mesela Seperatör hattından 12 adet sürücüsü olan seperatör bulunmakta, farklı bir yük bulunmamaktadır. Yine pres hattında 6 adet sürücülü eko-pres bulunmaktadır. Bunların bireysel olarak filtrelenmesi çektikleri enerjinin kalitesine bozucu etki vermelerini engelleyecektir. Bu sayede yükler birbirlerine olumsuz etkide bulunmayacaktır. Ancak bu yöntemde de maliyet daha yüksek olacaktır.

Burada kullanılacak filtre sistemi 2 türlü olabilir.

1. Pasif filtre
2. Aktif filtre

Pasif filtrede, her harmonik için ayrı filtrenin ilave edilmesi gerekir. Ölçümlerde

görüldüğü gibi, mesela ekstraksiyon-1’de çok fazla sayıda sınırı geçen harmonik bileşen mevcuttur. Bunların her birinin ayrı filtrelerle yok edilmesi uygun olmayacaktır.

Diğer durumda kapalı kontrollü aktif filtre kullanıldığı zaman hem yük değişimlerine karşı uyumlu olacaktır hem de uygulama sonrasında sinüs dalgasında düzelme olup olmadığı sürekli kontrol altında olacaktır.

Bunun dışında, çalışmada bahsedildiği gibi kompanzasyon sistemlerinde mevcut kondansatörler harmonik oluşturmazlar ancak harmoniği artırırılar. Fabrikanın kompanzasyon sistemi yaygın olarak kullanılan klasik kontaktörlü kompanzasyon sistemidir. Fabrikada kompanzasyon hassasiyetinin artmasına paralel olarak harmonik sorunlarında artışlar olmuştur. Önümüzdeki yıllarda reaktif güç sınırının indüktif güçte %20’den %15’e; kapasitif güçte %15’den %10 çekilmesi gündemdedir. Bu durumda kompanzasyon sistemindeki hassasiyetin artması ile kondansatörlerin daha sık devreye girip çıkması ile harmoniklerin sisteme etkisinin artacağı öngörülmektedir. Ayrıca kontaktörlerin sinüs dalgasının herhangi bir anında devreye girip çıkması enerji kalitesi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir.

Bu sorunu aşmak amacı ile sinüs dalgasının sıfır noktasında devreye girip çıkan tristör kontrollü harmonik filtreli kompanzasyon sisteminin kurulmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Böylece bireysel filtrenin yapılmadığı daha düşük oranlı harmoniklerin şebekeye geçmesi, bunun sonucu sistemdeki enerji kalitesinin düşmesi ve ileride harmonik sınır aşımından dolayı ceza ödenmesi durumları ile karşı karşıya gelinmesi engellenmiş olacaktır.

Fabrikada harmoniklerin yok edilmesi ile ilgili düşünceler ifade edilmekle birlikte kurulacak harmonik filtrenin özelliği ile ilgili optimum hesaplamanın yapılması ve sonuçlara göre seçimin yapılması gerekmektedir. Yeni alınacak cihaz ve donanımların harmonik filtre sistemini destekleyecek özellikte olmasına dikkat edilmelidir. Yapılacak çalışmaların sonuçlarının akademik ve sanayi çevreleri ile paylaşılmasının bölgenin enerji kalitesinin artırılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Adak, S. (2003). Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arrillaga, J., Bradley, D.A. and Bodger, P.S. (1985). Power System Harmonics, John Wiley&Sons, Norwich, New York.
- Bilge, M. (2008). Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Eliminasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Boduroğlu, T. (1988). Elektrik Makinaları Dersleri, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.
- Carnovale, D. J. and Eaton, P. E. (1998) Power Factor Correction and Harmonic Resonance : A Volatile Mix, *Electrical Construction and Maintenance*, Jun2003.
- Chapman, D. (2001). Güç Kalitesi Uygulama Kılavuzu, Copper Development Association, Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ş. , İstanbul.
- Demirkol, Ö., (2006) Harmonik İçeren ve Dengesiz Şebekelerde Ölçme ve Kompanzasyon, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Doggan, E. and Morrison E.R. (1993). Prediction of Harmonic Voltage Distortion When a Nonlinear Loads is Connected to an Already Distorted Supply, *IEE Proceedings-C*, Vol 140 No.3, pp. 161–166.
- Dugan, R. Mcgranaghan, M., Santoso, S.and Beaty, W. (2002). Electrical Power Systems Quality, McGraw Hill, New York.
- Engin, B. (2008). Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Kompanzasyon ve Enerji Kalitesi Sorunları, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Fehr, R. (2004). Harmonics Made Simple, *Electrical Construction and Maintenance*, Jan2004, Vol. 103, Issue 1, pc8.
- Filiz, C. (2006). Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Filtrelemelerin İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.

- Gonzalez, D.A. and Mc Call J.C. (1987). Design of Filters to Reduce Harmonic Distribution in Industrial Power Systems, *IEEE Transactions on Power Industry Applications* **Vol. IA-23**, No 3: pp. 504-511
- Grady, W.M., Mansoor, A., Fucks, E.F., Verde P. and Doyle, M. (2002). Estimating the net harmonic currents produced by selected distributed single-phase loads: computers, televisions, and incandescent light dimmers, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2002, **Vol. 2** , pp. 1090 – 1094
- Hansen, S. , Nielsen, P. and Blaabjerg, F. (2000). Harmonic cancellation by mixing nonlinear single phase and three phase loads, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **Vol. 36**, Issue. 1, pp. 152-159, January/February 2000.
- IEEE Power System Harmonic Working Group, (1984). Bibliography of Power System Harmonics, Part I and II, IEEE PES Winter Power Meeting, Paper 84 WM 214-3, January/February 1984.
- IEEE Std 519-1992, (1992). IEEE Recommended Practices and Requirements For Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE, ABD.
- IEEE Std 1531-2003, (2003). IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, IEEE, ABD.
- Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş A.ve Arıkan, O. (2003). Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Lemerand, C. J., (1998). Harmonic Distortion: Definitions and Countermeasures, *Electrical Construction and Maintenance*, May1998, **Vol. 97**, Issue 5, p56.
- Mazumdar, J. (2006). System And Method For Determining Harmonic Contributions From Nonlinear Loads In Power Systems, Thesis of doctor of Philosophy, Georgia Institute of Technology, Georgia.
- Rashid, M.H. (1993). Power Electronics, Prentice Hall, New Jersey.
- Sundberg, Y. (1980). The Arc Furnace as a Load on the Network, *ASEA Journal*, **Vol.49**: pp.75-87.
- Suriadi, M. S. (2006). Analysis Of Harmonics Current Minimization On Power Distribution System Using Voltage Phase Shifting Concept, Master of Science,
- Şenyurt, Ö. (2005). Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Yüksek Lisans Semineri, Gazi

Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

TS EN 60871-1, (2004). Kondansatörler Tesis ve İşletme Kılavuzu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

West, K.(2002). Güç Kalitesi Uygulama Kılavuzu, Copper Development Association, Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ş. , İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hatice Zeliha TUĞCU
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara-1980
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim(Telefon/e-posta) : 0 272 612 66 61/ haticezeliha.tugcu@tmo.gov.tr

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Isparta Gazi Lisesi-1997
Lisans : Gazi Üniversitesi-2004

Çalıştığı Kurum ve Yıl : T.M.O. Afyon Alkaloidleri Fabrikası-2005-....