

## GÜÇ SİSTEMLERİNDE ENERJİ KALİTESİNİ ETKİLEYEN HARMONİKLERİN İNCELENMESİ

### INVESTIGATION OF HARMONICS AFFECTING THE QUALITY OF ENERGY USED IN POWER SYSTEM

**Mustafa ŞAHİN<sup>1\*</sup>, Yüksel OĞUZ<sup>2</sup>, Hatice Zeliha TUĞCU<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Erzincan Üniversitesi M.Y.O. Uçak Teknolojisi Bölümü, Erzincan/TÜRKİYE*

<sup>2</sup>*Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fak. Elk & Elek. Müh. Böl.,  
Afyonkarahisar/TÜRKİYE*

<sup>3</sup>*T.M.O. Afyon Alkaloidleri Fabrikası., Afyonkarahisar/TÜRKİYE*

**Geliş Tarihi:** 22/08/2014

**Kabul Tarihi:** 15/09/2014

#### ÖZET

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 olmaması nedeni ile sorunlar oluşturmuştur. Bu durumun kontrol altına alınabilmesi amacı ile enerji kalitesi tanımı oluşturulmuş ve Uluslararası 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 enerji sistemindeki harmoniklerin enerji kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerinin tespiti yapılarak çözüm önerileri sunmak amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Güç sistemleri, enerji kalitesi, harmonikler, kompanzasyon sistemi.

#### ABSTRACT

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 isn't designed in accordance with the perfect sine wave, cause some problems. Because of controlling this situation, quality of energy meaning is created and international standards are taken for overcoming these problems by the help of beginning new studies. The most important disadvantage of this problem, negative effects doesn't local, rather impress before neighbor systems then all energy network. In this research, was aimed that determine energy quality problems and analyze especially harmonic effects and suggest solutions.

---

\*Sorumlu Yazar mustafasahin@erzincan.edu.tr

**Key words;** Power systems, energy quality, harmonics, compensation systems

## 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;

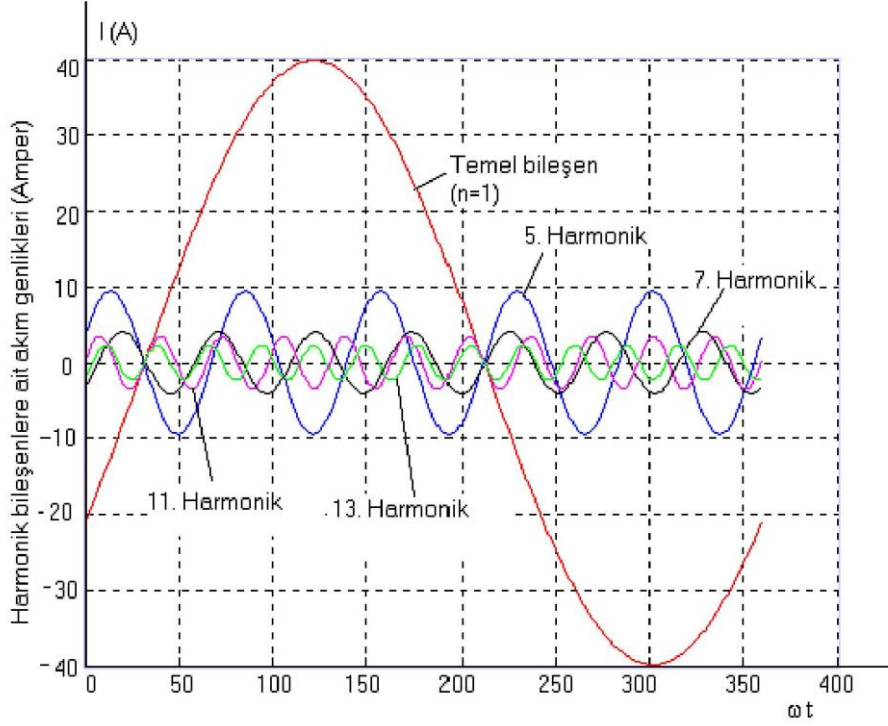
- Akım-Gerilim Harmonikleri
- Gerilim düşmesi ve yükselmesi (Sags & Swells)
- Transient
- Kırpışmalar (Flicker)
- Nötr-Toprak arası potansiyel farkı
- Fazlar arası akım ve gerilim dengesizliği
- Frekans değişimi
- K faktör

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 enerji sistemindeki harmonik bileşenlerin enerji kalitesindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

## **2. Harmonikler**

Alternatif akım tesislerinde akım ve gerilim dalga şeklinin 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 şeklini sinüs şeklinden 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 (Şekil 1).



Şekil 1. Harmonik Bileşenler (Adak 2003)

Güç sistemindeki sinüzoidal dalgaın simetrisinden dolayı 3., 5., 7., 11 gibi tek harmonik bileşenleri bulunur. Çift harmonikli bileşenler bulunmaz. Şekil 1' de yarı periyottaki temel bileşen ve harmonik bileşenler gösterilmiştir (Adak, 2003). Harmonikler, genel olarak nonlinear elemanlar ile nonsinüzoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması sinüzoidal dalgaın bozulması anlamına gelir (Şenyurt, 2005).

### 2.1 Harmonik Analizi

Periyodik dalga şeklinin temel bileşeni ve daha yüksek dereceli harmoniklerinin genlik ve faz açılarının hesaplanması işlemi harmonik analizi olarak adlandırılmaktadır (Demirkol, 2006). Sinüzoidal olmayan bir dalgaın sinüzoidal 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  $2f$ ,

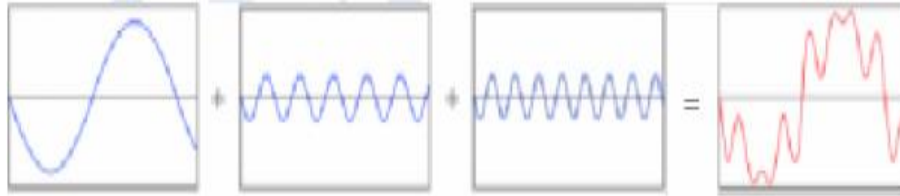
3. harmoniğin frekansı  $3f$

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 donanımına olan etkilerini incelemek için, her bir harmoniğin etkilerini tek tek incelemek sonra da bunları vektörel olarak toplamak gerekir. Şekil 2’ de sinüzoidal harmoniklerin bir araya gelerek sinüzoidal olmayan bir dalga oluşturmaları ve bu dalgayı oluşturan bileşenler görülmektedir.



Temel bileşen      5. harmonik      7.harmonik      Harmonikli sinyal

**Şekil 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).

### **2.1 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 olduğunda 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. 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 (Chapman, 2001).

## **2.2 Harmonik Üreten Elemanlar**

Elektrik üreticileri, dağıtıcı firmalar ile elektriği kullanan müşteriler elektrik enerjisinin iyi kalitede olmasını isterler. Ancak gerilim ve akım arasında lineer bağıntı 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.

### **2.2.1 Anahtarlanabilir Güç Kaynakları**

Günümüzde elektronik ünitelerin çoğunda anahtarlanabilir 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 (Chapman, 2001).

### **2.2.2 Gaz Deşarjlı 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 çevre aydınlatmasında çok miktarda kullanıldıklarından dolayı toplamda tek sayılı harmoniklerin seviyesi, sistemi önemli oranda etkiler.

### 2.2.3 Transformatörler

Demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin doğrusal olmamasından ötürü, transformatörler ve bobinler gibi demir çekirdeği bulunan sargılar, dağıtım sistemlerindeki en önemli harmonik üreteçleridir. Bunun sebebi, manyetik devredeki doymadan dolayı manyetik devreden geçen akım ile oluşan akı arasında lineer bir bağıntı bulunmamasıdır. Doyma sebebiyle akım ne kadar artarsa artsın akı artmayacaktır. Transformatörler sürekli olarak enerji altında olduklarından sistemde harmonik akımlarının dolaşmasına sebep olarak harmonik bozunumuna yol açarlar (Engin, 2008; Arrillaga *et al.* 1985; Boduroğlu, 1988).

### 2.2.4 Generatörler

Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, manyetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşmasından, kaçak akımlardan ve sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Dönen makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretirler (Arrillaga *et al.* 1985). Bunu önlemek için oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi kısımlarda uygun yapısal tedbirler alınır ve generatör amortisman sargısı ile donatılır (Engin 2008).

### 2.2.5 Doğrultucular (Konvertörler)

Doğru Akım iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler şebeke denetimli çeviriciler üzerinden beslenirler. P darbeleri 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 darbeleri doğrultucularda 5., 7., 11., 13., 15. vs. harmonikler üretilir.

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

$$(2.13)$$

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.

### 2.2.6 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).

### 2.2.7 Diğer Harmonik Kaynaklar

Yukarıda açıklanan harmonik kaynaklarına ilaveten diğer harmonik kaynakları şunlardır;

- Elektrik makinelerindeki dişler, oluklar, çıkık kutuplu senkron makinelerde hava aralığındaki relüktans değişimi ve senkron makinelerde hava aralığı döner alanı,
- Senkron makinelerde ani yük değişimlerinin meydana getirdiği manyetik akı dalga şeklindeki bozulmalar,
- Transformatörlerin ilk enerjilenmesi ve motorların kalkış akımları,

- Güç üretim tesislerinde pompa, ateşleyici ve fanları sürmede kullanılan elektronik kontrol düzenleri ve özellikle çimento ve maden sanayinde kullanılan lineer motorları sürmek için kullanılan frekans dönüştürücüler,
- İndüksiyonla ısıtmanın kullanıldığı çelik sanayi, haddehaneler ve kaynak makineleri,
- Yarı iletken kontrollü cihazlar (motor hız kontrol düzenleri, ısıtıcılarda ısı regülasyon düzenleri, elektronik termosifonlar vb.),
- Başta teyp, portatif tv adaptörleri, ütü, tıraş makinesi ve uzun ömürlü tekrar dolabilen piller gibi şarjlı cihazlarda kullanan doğrultucu devreler,
- Reaktif gücün çok hızlı ve ani değiştiği (özellikle ark fırınlarında) sistemleri, kesintisiz güç kaynakları ve anahtarlamalı güç kaynakları,
- Bilgisayar /network sistemleri ve bunlarla yönetilen otomasyona dayalı üretim tesisleri,
- Doğru akım ile enerji iletimi kontrolü ve dönüştürücü istasyonlar,
- Elektrikli trenler ve tek raylı ulaşım araçlarında yüksek güçlü doğrultucuları, üniversal ve üç fazlı motorları beslemek için kullanılan dönüştürücüler, elektrikli taşıtlarda akü şarj devreleri,
- 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),
- Elektrokimya teknolojisinde plakalara şekil verme, elektro kaplama işlemlerinde ve elektrophoretic boya sprelerinde kullanılan statik dönüştürücüler,
- Rüzgâr 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.

### 2.3 Harmoniklerin Yapmış Olduğu Etkiler

Genel olarak akım harmoniklerinin ve gerilim harmoniklerinin etkileri şunlardır;

#### 2.3.1 Akım Harmoniklerinin Genel Etkileri

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

#### 2.3.2 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).

### 2.4 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.

#### 2.4.1 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 oluşmaktadır 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 olurlar 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).

#### **2.4.2 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 (Dugan, 1999).

#### **2.4.3 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.

**2.4.4 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 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 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 3.** Ortalama değer gösteren ve etkin değer gösteren ölçü aletlerinin ölçüm değerleri

**2.4.5 Nötr İletkende Etkisi**

Üç-fazlı bir sistemde gerilim dalga şekli her bir fazdan nötr yıldız noktasına  $120^\circ$  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; Fehr, 2004).

#### **2.4.6 Kablolara Etkisi**

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

#### **2.4.7 Devre Kesicilerine Etkisi**

Kaçak akım koruma şalterleri (KAK), faz ve nötr iletkenlerdeki akımları toplayarak sonucun anma değerinin 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 kullanılmaktadır.

#### **2.4.8 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 artırırılar. Aynı zamanda harmonik etkisinden sistemde ilk etkilenen elemanlardır. Bundan dolayı Harmonik akımları kondansatörlerde patlamaya, kapasite azalmasına ve kondansatör ömrünün kılmasına sebep olmaktadır (Adak, 2003).

#### **2.4.9 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 (Adak, 2003).

#### **2.4.10 Endüksiyon Tipi Sayaçlara Etkisi**

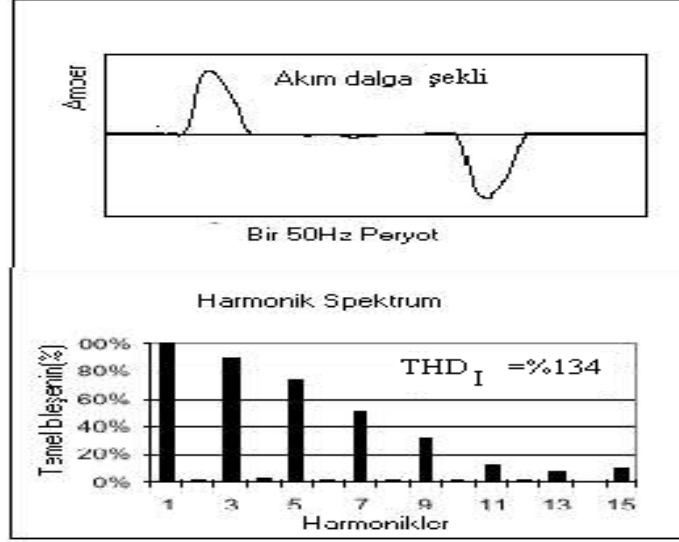
Sayaçların yanlış ölçüm yapmasına neden olur.

#### **2.4.11 Sesli ve Görüntülü İletişim Araçlarına Etkisi**

Bu cihazlarda parazit ve anormal çalışmalar oluşur.

#### **2.4.12 Mikro Bilgi İşlemciler ve Bilgisayarlar Üzerine Etkisi**

Bilgisayar sistemleri, hem harmonik üreticisidir hem de harmonik bileşenlerden son derece etkilenirler. Şekil 4' de bir bilgisayarın akım dalga şekli ve harmonik spektrumu verilmiştir (Adak, 2003).



Şekil 4. Bilgisayarlara ait harmonik distorsiyonu

Pek çok 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).

### 3. Harmoniklerin Giderilme Yöntemleri

Harmoniklerin sistem üzerindeki etkileri tamamen kaldırılamaz fakat tasarım aşamasında alınacak tedbirlerle çok daha düşük seviyelere çekilerek sisteme zarar vermesi engellenebilir.

#### 3.1 Generatörlerde Alınabilecek Tedbirler

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



**3.2 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 frekans ne kadar büyük olursa, harmonik mertebeleri de o kadar küçük olur (Adak, 2003).

**3.3 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).

**3.4 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 azalır, gerilim harmoniği de azalacaktır. Burada uygulanacak sınır IEEE tarafından belirlenmiştir. Sistemdeki toplam gerilim tekil harmonik değerinin %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.

**3.4.1 Pasif Filtre**

Pasif filtrede amaç yok edilmek istenen harmonik akımların kontrolsüz şekilde sistemde akarak cihazlara zarar vermesini engellemektir. Bu amaçla harmoniklerin akabileceği düşük dirençli filtreler 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 vd., 2003). Pasif filtreler, kaynak



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

#### 4. SONUÇ

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. Uluslar arası 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. Standartlar göz önünde bulundurulduğunda harmoniklerin etkileri minimuma indirilir, 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 yenilenemiyorsa bu sefer harmonik sorununun üretildiği yerde kaldırılması için filtreleme çalışmaları yapılmalıdır.

#### 5. 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.
- Boduroğlu, T. 1988. Elektrik Makinaları Dersleri, *Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş.*, İstanbul.
- 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.
- Filiz, C. 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Filtrelemelerin İncelenmesi *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Fehr, R. 2004. Harmonics Made Simple, *Electrical Construction and Maintenance*, Jan2004, Vol. 103, Issue 1, pc8.
- 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
- IEEE Std 519-1992, 1992. IEEE Recommended Practices and Requirements For Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE, ABD.
- 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.
- Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş A. ve Arıkan, O. 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- 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.
- Şenyurt, Ö. 2005. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, *Yüksek Lisans Semineri*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- West, K. 2002. Güç Kalitesi Uygulama Kılavuzu, *Copper Development Association*, Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ş. , İstanbul.