

GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ DONANIMLAR ÜZERİNDEKİ HARMONİKLERİN ETKİLERİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

¹Nuran YÖRÜKEREN ²Ayşe ERGÜN ³Bora ALBOYACI ⁴Mehlika ŞENGÜL

^{1,3,4}Elektrik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi
²Elektrik Eğitimi Bölümü, TEF
Kocaeli Üniversitesi

Email: ¹nurcan@kou.edu.tr ²ergun@kou.edu.tr ³alboyaci@kou.edu.tr ⁴mehlika@kou.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Harmonikler ve Etkileri, Transformatörler, Aydınlatma Cihazları, Motorlar

ABSTRACT

The aim of this paper is the investigation of the effects of power system harmonics on system equipment and loads. The equipment considered are transformers, reactors, capacitors, electric machines, generators, switchgear, fuses, metering devices, power converters, conductors, relays and lighting. In this study, measurements of the harmonic characteristics of different types of lamps are presented. Also the current harmonics in the transformer and asencron motor are measured. The results of these measurements are given in appendix.

GİRİŞ

Alışılmış sistemler sinüsoidal gerilimler ve akımlarla çalışmak üzere tasarlanmıştır. Sistemlerdeki bu aşırı gerilimlere veya akımlara neden olan donanımlar, doğrusal olmayan akım-gerilim karakteristiğine sahiptirler. Bir güç sisteminin değişik noktalarında tehlikeli rezonans şartlarını belirlemek için, gerilim ve akım dalga şekillerindeki bozulmaları ölçmek ve analiz etmek gereklidir.

Bu çalışmada, harmoniklerin sisteme ve sistemdeki donanıma olan etkileri genel olarak ayrı ayrı incelenerek, birtakım ölçümler yapılmıştır. Bu etkiler, harmonik kaynaklara, bunların güç sistemlerinde yerleşimlerine ve harmoniklerin yayılımını yükselten şebeke karakteristiklerine bağlıdır. Gerilim bozulmasının etkisi üç genel durumda incelenebilir.

- Gerilim etkilerinden dolayı oluşan yalıtım stresi,
- Akım akışından dolayı oluşan ısı stresi,
- Gerilim ve akım harmoniklerinin neden olduğu hatalar veya anormal çalışma (bozulma)[1].

2. GERİLİM BOZULMASI

En çok bilinen bozulma faktörleri gerilim, akım ve telefon girişim faktörüdür. Bu faktörlere ayrıca genlik faktörü ve motor bozulma indeksi de dahildir. Özel uygulamalardaki harmoniklerin etkisinin daha iyi

anlaşılması ve farklı amaçlar için, değişik metotlar geliştirilmiştir. Gerilim bozulma faktörü,

$$V_{DF} = \frac{1}{V_1} \left[\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

denklemleri ile verilir. Burada ve tüm verilen denklemlerde :

V_1 = rms olarak temel bileşen gerilimi

V_n = n. harmonik gerilimi

n = harmonik derecesini göstermektedir.

Gerilim bozulma faktörü, ölçümün bir etkin değeridir ve saf bir direnç yükündeki artan ısı ile doğrudan bağlantılıdır. Harmonik gerilimi sırasıyla bir direnç (R) yüküne ve seri bir RL yüküne uygularsak;

$$\frac{P_h}{P_1} = (V_{DF})^2, \frac{P_h}{P_1} = (V_{DF})^2$$

şeklinde elde edilir. Burada V_{DF} yük uçlarındaki gerilim bozulma faktörüdür. Benzer şekilde akım bozulma faktörü :

$$I_{DF} = \frac{1}{I_1} \left[\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

olur. Burada ve tüm verilen denklemlerde ;

I_1 = rms olarak temel bileşen akımı,

I_n = n. harmonik akımını göstermektedir.

Saf bir direnç (R) yükünde temel güç için harmonik bağıntısı için ise:

$$\frac{P_h}{P_1} = (I_{DF})^2 \quad (3)$$

şeklinde verilir. Burada V_{DF} : genellikle sisteme paralel bağlı çalışan aygıtlarda, I_{DF} ise kesici veya transformatör gibi seri bağlı aygıtlarda uygulanır. Telefon etki faktörü ise, (4) nolu bağıntıda tanımlanmıştır.

$$TIF = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} (V_n \cdot W_n)^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

Burada W_n değişik frekanslardaki ses etkileri için verilmiştir. Genlik faktörü denklem 5 ile verilir.

$$MF = \frac{1}{V_1} \sum_{n=2}^{\infty} V_n \quad (5)$$

Motor bozulma indeksi aşağıda verilen denklem ile ifade edilmektedir. Düşük harmonik derecelerinde bu değer ihmal edilebilir.

$$MDI = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=5}^{\infty} \frac{V_n^2}{(n^{3/2})} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Harmoniklerin etkilerini ısı, yalıtım etkisi ve bozulma şeklinde genelleştirdikten sonra, bu etkilerin güç donanımlarında yarattığı problemleri ve bunları önleme yöntemlerini inceleyelim.

3. ISI ETKİLERİ

Harmonik akımlar, tüm donanımda aşırı ısınmaya neden olacaktır. Bu ısı, donanımın sıcaklığını artıracak ve yalıtım ömrünü azaltacaktır. Bu etkiye duyarlı olan yükler sırasıyla incelenmiştir.

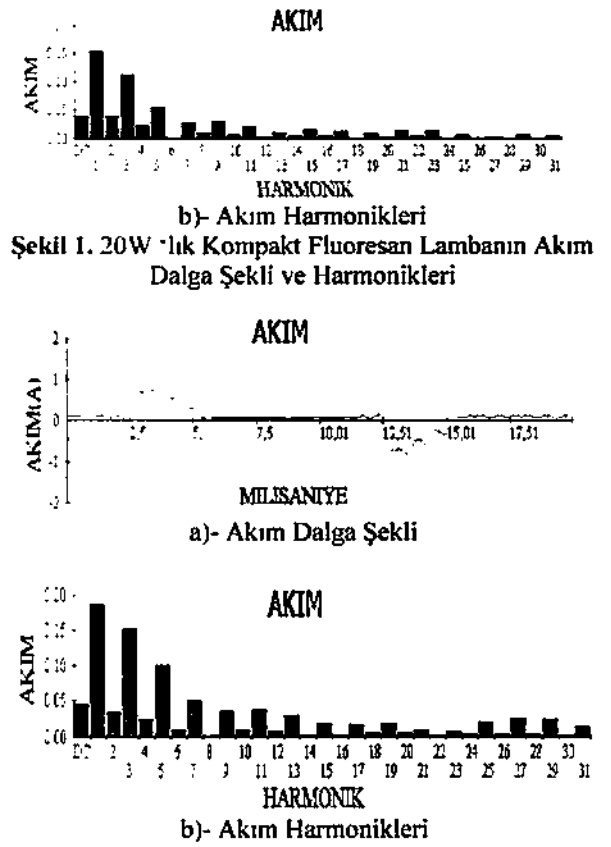
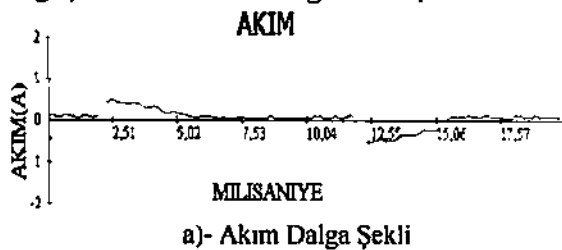
3.1 RL Yükler

Sistem yükünün önemli bir kısmı, pasif direnç veya RL şebekesinden meydana gelen empedans karakteristiğine sahiptir. Isı etkisine en duyarlı olan yük grubu aygıtlarından biri akkor lambadır. Akkor flemanlı lambalarda harmonikler, çalışma geriliminin artmasına neden oldukları için lamba ısınmakta ve dolayısıyla ömrü kısalmaktadır. Yapılan incelemelerde, sürekli çalışmada gerilimin (rms) %105 artırılması halinde, lamba ömrünün %47 oranında düştüğü görülmüştür. Lambanın ömrü için bağlı eşitlik aşağıdaki denklem ile verilir.

$$L = \frac{1}{V^n} = \frac{1}{\left[V_1^2 (1 + DF^2) \right]^{n/2}} \quad (7)$$

L = Birim lamba ömrünü göstermektedir[2].

Deşarj lambalarında ise, harmoniklerin duyulabilir gürültüden başka bir etkisi yoktur. Bu tip lambalarda akım sınırlayıcı görevini gören balastlar ve güç katsayısını düzeltmede kullanılan kondansatörler bozulmuş akım ve gerilim dalga şekli üretirler. Kondansatör ile kullanılan balastlar rezonans problemlerine neden olabilirler. Bu duruma örnek teşkil etmesi için, sırasıyla Şekil 1'de 20 W'lık bir kompakt floresan lamba ve Şekil 2'de 18 W'lık elektronik balastlı floresan lambada ölçülen akım dalga şekli ve harmonikleri gösterilmiştir.



Şekil 2. 18 W 'lık Elektronik Balastlı Floresan Lambanın Akım Dalga Şekli ve Harmonikleri

3.2 Elektrik Makinaları

Statik cihazlardaki harmoniklerin etkisi, sadece ısınmanın artması şeklindedir. Bu etki aynı zamanda motorlar içinde geçerli olup ancak değerlendirilmesi daha karmaşıktır. Harmonik akımın genliği, stator sargı şekline, harmonik reaktanslara ve rotor basturma etkisine göre değişmektedir. Harmonik gerilimlerin herbiri stator sargısındaki harmonik akımlara karşılık bir akım üretmekte ve bu akım stator sargısında bir miktar ısınmaya neden olmaktadır. Statordaki harmonik akışları, hava aralığında MMK meydana getirmekte ve rotorda akım akışına neden olmaktadır. Her bir harmonik akım, pozitif veya negatif sequence olarak tanımlandığında MMK'nın devri rotor devrine bağlı olarak ya ileri ya da geri olacaktır. Bir senkron motor durumunda, rotorda endüklenen harmonik akımların frekansı denklem (8)'de verilir.

$$f_n = (n \pm v) f_1 \quad (8)$$

Döner makinalarda ortaya çıkan önemli bir etkide, harmonik gerilimlerin kompleks titreşimler yaratması ve rotor elemanlarının bağlı olduğu donanımda mekanik rezonanslar meydana getirmesidir. Üç fazlı bir asenkron motorda için n. harmonik akımın genliği aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

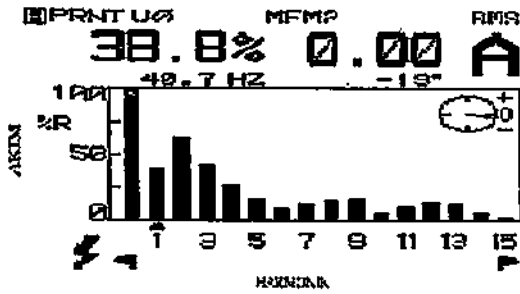
$$I_n = \frac{V_n}{n \cdot W_0 \cdot L_m} \quad (9)$$

W_0 = temel bileşen kaynak frekansı
 L_{10} = etkin stator ve statora ait olan rotor kaçak empedanslarının toplamıdır. Dahili çubuk endüktansları ihmal edildiğinde, stator ve rotorun harici kaçak endüktansı L_1 , minimum değere eşittir. Bu yaklaşık bir eşitliktir ve aşağıdaki gibi verilir.

$$I_n = \frac{V_n}{n \cdot W_n \cdot L_1} \quad (10)$$

Harmonik akımlar nedeniyle oluşan motor kayıpları, parametrelerin büyük farklılıklarıyla etkili olmaktadır. Ek olarak gerilim bozulması yüzünden oluşan nüve kayıpları ihmal edilebilir ve harmonik bileşenler stator sargısı kayıpları, rotor sargısı kayıpları ve boş kayıplar olarak sınıflandırılabilir. Stator ve rotorun harmoniklerden etkilenmesindeki farklılık ve harmonik ısınmaya karşılık alınan termik cevaplar onların fiziksel tasarımlarında önemli değişikliklere neden olmaktadır. Örneğin kutup yüzeyine amortisman çubuğunun eklenmesi, hava aralığının düşürülmesi, daha iyi ısı dağılımını sağlamak için alan sargısının etkin dış yüzeyi alanının artırılması ve rotor yalıtımları ve alan sargıları için F yalıtım sınıfı kullanılması gibi önlemler alınabilir[5].

Çalışmada, 22 kW, 380 V, $n=1500$ dev/dk etiket değerlerine sahip yumuşak yol vericili bir motorun harmonik ölçüm sonuçları Şekil 3'de yer almaktadır.



Şekil 3. 22 kW 'lık Motorun Harmonikleri

3.3. Transformörler ve Reaktörler

Harmonik gerilimler, transformör histeresiz ve fuko akım kayıpları ile yalıtım gerilimlerini artırır. Transformör toplam kayıplarını, yük kaybı ve yük kayıpsız olarak ikiye ayırabiliriz. Yük kayıpları da $I^2.R$ (bobin kayıpları) ve kaçak kayıplar arasında bölünebilir. Kaçak kayıplar bobinlerdeki elektromanyetik akı, çekirdek bağlantıları, manyetik siperler, ana tank ve transformörün diğer yapısal parçalarından dolayı oluşan fuko akım kayıplarıdır. Toplam yük kayıpları aşağıdaki ifade ile gösterilir.

$$P_{LL} = I^2 \cdot R + P_{EC} + P_{OSL} \quad (11)$$

Burada;

P_{EC} = Paralel bobin devreleri arasında dolaşan akımlardan oluşan fuko akım kaybını.

P_{OSL} = Sinüsoidal olmayan yük akımları neden olduğu bobinsiz fuko akım kaybını gösterir. Bu kaybın

artması sonucu yapısal kısımlarda da sıcaklık artışı meydana gelmektedir.

Denklem (11) aşağıda verildiği gibi nominal yük koşulları altında per-unit olarak ifade edilir, bobinler dışındaki fuko akım kayıpları dikkate alınmazsa, müsaade edilen maksimum pu akım;

$$I_{max} (pu) = \left(\frac{1}{I(pu)} \right) \left(\frac{P_{LL-R} (pu)}{P_{LL} (pu)} \right) \quad (12)$$

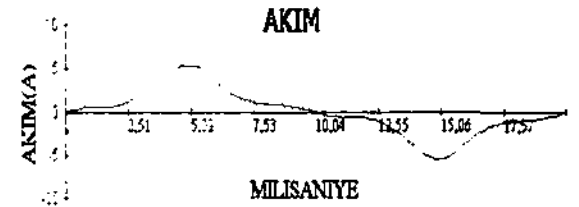
şeklinde elde edilir[5.7]. Transformörleri tasarlayan kişiler tarafından, fuko akım kaybı faktörünün (P_{EC-R}) IEE standardı C57.110'a göre hesaplanması gerekir. Bu hesaplamalar bazı kabullere dayandırılır ve buna göre çeşitli hesaplama yöntemleriyle kapasite düzenleme eğrileri elde etmek mümkündür[5.7]. Tablo 1'de çeşitli tipteki transformörler ve reaktörler için fuko akım kayıp faktörü verilmiştir

Tablo 1. P_{EC-R} Fuko Akım Kayıp Faktörü

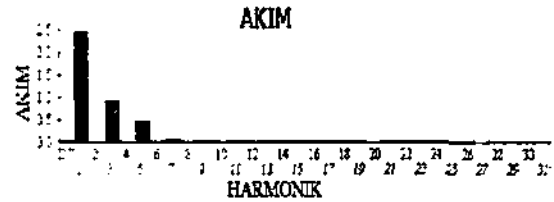
Kuru Tip Transformörler	%
≤ 1000 kVA	3-8
≥ 1500 kVA, 15 kV HV	12-20
≤ 1500 kVA, 5 HV	9-15
Tam Yağlı Transformörler	
≤ 2500 kVA, 480 V L.V.	1
$> 2500 \leq 5000$ kVA	1-5
> 5000 kVA	9-15

*L.V.: Tabaka tip sargılı herhangi bir transformör için uygulanabilir [5]

Bu kısma örnek olarak ise, 50 kVA, Dyn11, 0.4/0.4 kV etiket değerlerine sahip bir transformörün primer tarafında yapılan harmonik ölçüm sonuçları Şekil 3'de yer almaktadır.



a)- Akım Dalga Şekli



b)- Akım Harmonikleri

Şekil 3. Örnek Verilen Trafo İçin Boşta Çalışmadaki Akım Harmonikleri

3.4. Kapasitörler

Kapasitör karakteristiklerinde iki standart kullanılmaktadır. ANSI/IEEE Standart 18-1980 ve NEMA CP-1973. Bu standartlar, sinüsoidal olmayan bir dalga şekli ortamında uygulanırken güvenilir servis istenilirse aşılması gerekli olan sınırları belirtirler. Konuyla ilgili olan üç özel oran, kapasitörün nominal reaktif güç kapasitesi, nominal uç gerilimi ve nominal

rms akımıdır. Kapasitörler için kabul edilen standartlar, nominal reaktif gücün %135' inde sürekli çalışma için uygun olacaktır. Bu tolerans için aşağıdaki ifadelerin hesaba katılması istenir.

- Kapasitör uçlarında bastırılmış harmonik gerilimlerin yol açtığı reaktif gücün ilavesi.
- Etiket oranından fazla temel bileşen geriliminin yol açtığı reaktif güç ilavesi. (Standartlar tarafından izin verilmiş +%10 içerisinde maksimum sürekli aşırı gerilim).
- Üretim toleransının neden olduğu aşırı kapasitanstan reaktif güç ilavesi. (Standartlar %0-15 kapasitans üretim toleransına müsaade ederler). Bu etkilerin tamamından ilave reaktif güç gelir ve özelleştirilmiş toleransın %35'i aşmaması gerekir [5,7].

Reaktif güç sınırlaması pu olarak aşağıdaki şekilde verilen denklemle ifade edilir.

$$kVAr_T (pu) \leq 1.35 = \sum_{n=1}^{nmax} \left(I_n^2 (pu) / n \right) \quad (13)$$

$kVAr(pu)$ = Toplam reaktif güç (pu) göstermektedir. İkinci kapasitör güç sınırlaması gerilime bağlıdır. Harmonikler hesaba katıldığı zaman, standart özellikleri %10'u aşmayacak şekilde olan rms gerilimini hesaplamak için aşağıdaki denklemden faydalanılır.

$$V_T (pu) \leq 1.10 = \left(\sum_{n=1}^{nmax} \left(V_n^2 (pu) \right) \right)^{1/2} \quad (14)$$

$V_T(pu)$ = Toplam rms gerilimini (pu) vermektedir. Harmonik gerilimlerin dağılımı ve temel bileşen ile verilen tepe gerilimine ulaşmak için kullanılan metod temelde hepsinin aritmetik toplamıdır.

$$V_{TP} (pu) \leq 1.2\sqrt{2} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{nmax} V_n (pu) \quad (15)$$

$V_{TP}(pu)$: Toplam pu tepe uç gerilimidir.

Uygulanan bir gerilimde kondansatörün ömründe kısa devreye neden olacak olan her artış ve normal temel bileşen gerilim dalgalanmaları için, izin verilen rms toleransının %10 olduğu unutulmamalıdır. Standartlardaki son kapasite oranı rms akım sınırlamasının %180 olmasıdır..

4. YALITIM ETKİSİ

Aşırı gerilimler koronanın bozulmasına ve çalışma arızasına neden olmaktadır. Elektrik tesisi bileşenlerinde yalıtımın yıpranması, onların yararlı kullanım ömrününün kısalmasına neden olur. Korona başlangıcını önlemek için kondansatörlerin nominal tepe gerilimi değerinden daha büyük, %20'den daha az değerlerinde, kararlı durum tepe gerilimleri ile sınırlandırılır.

4.1 İletim Hatları ve Kablolar

Birincisi ilave iletim kayıplarıdır. Bu durum aşağıdaki ifade ile verilir:

$$\sum_{n=2}^x I_n^2 \cdot R_n \quad (16)$$

R_n = Sistem direncini ifade etmektedir[6].

Harmonik akım akışının ikinci etkisi de, farklı devre empedansları geçişlerinde harmonik gerilim düşümlerinin yaratılmasıdır. Kablo ile iletimde, harmonik gerilimler, kendi tepe gerilimlerine oranla dielektrik gerilmeleri artırılır. Bu etki kablonun yararlı ömrünü kısalttığı gibi, arıza sayısındaki artışlara da neden olur ve bu yüzden onarım maliyetleri artar. Korona başlangıcında ve sönmeye seviyelerindeki harmoniklerin etkileri, tepeden tepeye gerilimin bir fonksiyonudur. Tepe gerilimi, temel bileşen ve harmonikler arasındaki faz ilişkisine bağlıdır. Kablolar da ise harmonik akım akışı, deri olayı (skin effect) ve yakınlık etkisine (proximity effect,) bağlı olarak ilave ısınmalara neden olacaktır. Söz konusu her iki olay, iletken boyu ve aralığı kadar frekansın da bir fonksiyonu olarak değişirler [2,5].

5. BOZULMA

Isı veya yalıtım etkilerinden başka akım veya gerilim bozulması nedeniyle donanımın arzalı veya anormal koşullarda çalışması şeklinde tanımlanmaktadır .Bu durumdan etkilenen cihazlar ise kısa olarak ele alınmıştır.

5.1 Anahtarlar

Akım dalgasındaki harmonik bileşenler , anahtarların akım kesme yeteneğini etkileyebilir. Harmonik bileşenlerin oluşturduğu bu problem, sıfır akımlarda yüksek di/dt genliklerinin olması nedeniyle kesme işleminin daha zor yapılmasıdır. Devre kesicilerindeki bu durum, söndürme bobinlerinden kaynaklanmaktadır. Bu bobinlerin yetersiz çalışması arkın uzamasına ve kesme işleminin başarısız olmasına neden olmaktadır. Havalı kesiciler harmonik akımlara daha az duyarlıdır. Maksimum harmonik akım seviyelerini tahmininde kullanılan , anahtarlama aygıtlarında maksimum di/dt'yi yakalamak için temel frekansı kesme yeteneğini kullanılmaktadır. Bu söz konusu olan harmoniklerin temel frekans bileşenleri ile aynı fazda olduğu kabul edilmektedir.

5.2 Sigortalar

Bir sigortada harmonik akımın önemli bir seviyesi, aşırı ısınma ve aletin zaman akım karakteristiğinde kaymaya neden olmaktadır. Buna özellikle düşük genlik arızaları sırasında önemli olabilmektedir.

5.3 Ölçme aygıtları

Doğrusal olmayan yükler ve harmonik bozulma nedeniyle oluşan faz ayarsızlıklarından dolayı meydana gelen harmonik akımlar, bu aygıtların çalışmalarında hataya neden olmaktadır. Gerilim ve

akım arasındaki sıfır geçiş açısının kosinüsü ile rms gerilim ve akımın çarpılması sonucu elde edilen gerçek güç değeri, sistemde harmonikler mevcut olmadığı hallerde doğru, aksi durumda hatalı sonuçlar verebilir [8,9,10].

5.4 Koruma Röleleri

Çalışma prensipleri tepe gerilimlerine ve akımlarına veya gerilim sınırlarına bağlı röleler, dalgalı harmonik bozulmadan açıkça etkilenmektedir. Üreticiye bağlı olan aşırı gerilim ve akım röleleri çalışma karakteristiklerinde farklı değişimler gösterirler. Harmonik içeriğine bağlı olan rölelerin çalışma momentleri ters olabilmektedir. Çalışma zamanları ölçülen miktarda frekansın fonksiyonu şeklinde yaygın olarak değişebilir.

Genelde rölelerin kötü çalışmasına neden olan gerekli harmonik seviyeler, diğer ekipmanlar için düşütülen kabul edilebilir maksimum sınırlardan daha büyüktür. Alışılmamış durumlar dışında, harmonik seviyelerin rölelerin çalışması ile ilgili problemlere neden olmaması için gerekli harmonik seviyeleri % 10-20 olarak verilmiştir.

5.5 Güç Dönüştürücüler ve Elektronik Yükler

Konvertördeki bozulmalar, harmoniklerden dolayı oluşan kontrol sistemi hataları nedeniyle kayan ateşleme açılarından, aşırı ısınma etkileri veya yüksek di/dt , dv/dt yüzünden SCR veya transistörün başarısız çalışmasından dolayı olmaktadır. Yükün bozulması, konvertör yük kısmı filtresine giren harmoniğin iletilmesiyle oluşmaktadır. Birçok konvertör giren gerilimin dalga şekline duyarlıdır. Kontrollü bir doğrultucunun lojik kontrolü, bozulmuş gerilim ile çalışma hatalarına öncülük eder. Özellikle sıfır geçişine duyarlı konvertörlerin her fazının elemanlarının ateşlemesinin gecikmesi bozulmayı artırdığı görülmektedir.

Elektronik yükler ise gerilim dalga şekline etkilenmektedir. Gerilim sapma faktörü, elektronik yüklerle uygulanan bozulmayı tanımlamak için kullanılmaktadır. Gerilim sapma etkisi, harmonik genliği ve harmonik faz açısının her ikisi tarafından etkilenen sapma kadar karmaşıktır. Genlik faktörü faz açısından bağımsız bir üst sınır sağlamak için kullanılmaktadır. Bununla birlikte gerçek sapmanın genlik faktöründen önemli bir miktarda daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.

6. SONUÇ

Harmoniklerin tanınabilmesi için öncelikle etkilerinin bilinmesi ve bunlara göre önlemler alınması gereklidir. Bu çalışmada, güç sistem donanım ve yüklerindeki harmoniklerin etkilerinin analizi verilmektedir. Genel olarak etkiler ısınma, yalıtım ve bozulma şeklindedir. Harmoniklerin etkilerini kontrol etmek ve sistemin sağlıklı çalışmasını sağlamak için,

sistemdeki her bir donanıma ait birtakım standartlar mevcuttur.

Harmonik gerilim ve akımlar, transformatörlerde kayıpları arttırmakta, kapasitörlerde tahribatlar oluşturmakta, elektrik makinelerinde aşırı ısınmalara ve mekanik salınımlara, kablolarda yalıtımın bozulmasına, ateşleme anları sıfır geçişlerine göre ayarlanmış devrelerde kararsız çalışmalara, kontrol devrelerinde bozulmalara, haberleşme devrelerinde parazitlere, ölçme devrelerinde hatalara, röle ve kesicilerde arızalara sebebiyet vermektedir. Çalışmada çeşitli donanımlar için ölçümler alınmıştır. Bu ölçümler göstermiştir ki, harmonik bozulmalar sistemde önemli bir problemdir. Bu nedenle etkilerin bilinmesi ve üretici firmalar tarafından gereken önlemlerin alınması gereklidir. Ayrıca sistemdeki her bir donanımın için harmonik seviyelerinde bir sınırlama getirilmelidir.

7. KAYNAKLAR

- [1] BONNER, A., et al, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks", IEEE Trans. on Power Delivery, 1996.
- [2] ORTMAYER, T.H., et al, "The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-104, No.9, 1985.
- [3] ARSENEAU, R. and QUELLETTE, M., "The Effects of Supply Harmonics on the Performance of Compact Fluorescent Lamps", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.8, No.2, 1983.
- [4] DWYER, R., et al, "Evaluation of Harmonic Impacts from Compact Fluorescent Lights on Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10, No.4, 1995.
- [5] RICE, D.E., "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics- Their Effect on Power Systems Components", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.IA-22, No.1, 1986.
- [6] YÖRÜKEREN, N., "Güç Sistem Harmonikleri ve Bu Harmoniklerin Elektrikli Ulaşım Sistemlerinde Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi", YTÜ Doktora Tezi, İSTANBUL, 1994.
- [7] WAGNER, W.E., et al, "Effects of Harmonics on Equipment. IEEE Trans. on Power Delivery". Vol.8, No.2, 1993.
- [8] MAHMOUD, A.A., et al, "Power System Harmonics: An Overview", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.8, 1983.
- [9] SUBJACK, S. J., JR. and MCQUILLIN J. S., "Harmonics - Causes, Effects, Measurements, and Analysis: An Update". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, no. 6, November&December 1990.
- [10] PURKAYASTA, I. and SAVOIE, P. J., "Effect of Harmonics on Power Measurement", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-22, no.1, p.161-177.