

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİKLİ DEVRELERDE GÜÇ
KOMPANZASYONU

93779

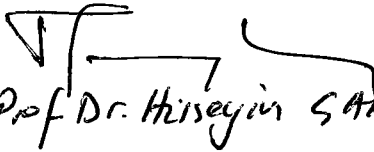
Elek. Müh. Arif KARAKAŞ

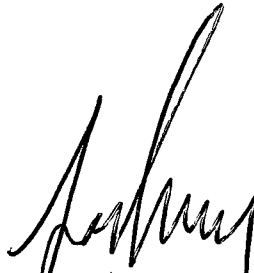
F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı

: Doç. Dr. Celal KOCATEPE


Prof. Dr. Hisseyin ŞAKIR


Prof. Dr. Fahriette ARSLAN

İSTANBUL, 2000

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
1. GİRİŞ	1
2. NONSİNÜZOİDAL BÜYÜKLÜKLERİN İNCELENMESİ	4
2.1. Tanımı Harmonik	4
2.2. Harmoniklerin Analizi	5
2.3. Harmoniklerin Ölçülmesi	8
2.4. Harmonik Standartları.....	8
3. NONSİNÜZOİDAL BÜYÜKLÜKLERİN ELEKTRİK DEVRELERİNDEKİ TANIMLARI.....	10
4. HARMONİK KAYNAKLAR ve HARMONİKLERİN GÜÇ SİSTEMLERİNE ETKİLERİ	14
4.1. HARMONİK KAYNAKLAR	14
4.1.1. Generatörler	14
4.1.2. Transformatörler	15
4.1.3. Ark fırınları	16
4.1.4. Gaz deşarjı ile aydınlatma	17
4.1.5. Çeviriciler (Konverterler)	17
4.2. HARMONİKLERİN ETKİLERİ	19
4.2.1. Harmoniklerin Temel Büyüklüklere Etkileri	19
4.2.1.1. Harmoniklerin Akım Dalgası Üzerine Etkisi	20
4.2.1.2. Harmoniklerin Gerilim Dalgası Üzerine Etkisi	21
4.2.1.3. Harmoniklerin Görünür, Aktif ve Reaktif Güç Üzerine Etkisi	21
4.2.2. Harmoniklerin Temel Devre Elemanları Üzerine Etkileri	22
4.2.2.1. Harmoniklerin Dirence Etkisi	22
4.2.2.2. Harmoniklerin Bobine Etkisi	22
4.2.2.3. Harmoniklerin Kondansatöre Etkisi	24
4.2.3. Harmoniklerin Sistem Üzerine Etkileri	24
4.2.3.1. Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları	24
4.2.3.2. Kondansatörler Üzerindeki Etkiler	27
4.2.3.3. Güç Sistemi Devre Kesicileri ve Sigortalar Üzerindeki Etkiler	28
4.2.3.4. İletkenler Üzerindeki Etkiler	28
4.2.3.5. Döner Makinalar Üzerindeki Etkiler	29
4.2.3.6. Transformatörler Üzerindeki Etkiler	29
4.2.3.7. Ölçme Aletleri Üzerindeki Etkiler	30
4.2.3.8. Röleler Üzerindeki Etkiler	30
4.2.3.9. İletim Sistemi Üzerinde Etkiler	31
4.2.3.10. Aydınlatma Donanımı üzerindeki Etkiler	31

4.2.3.11.	İletişim Hatları Üzerindeki Etkiler	31
4.2.3.12.	Güç Faktörüne Etkileri	31
5.	HARMONİKLİ GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTİLMESİ	33
5.1.	W: Shepherd ve P. Zand'ın Nonlinear Devrelerde Güç Faktörünün Düzeltmesi	33
5.1.1	Sinüzoidal Kaynak ve Nonlinear Yüke Sahip Devrelerde Güç Faktör Düzeltimi	33
5.1.2.	Nonsinüzoidal Kaynak ve Lineer Yüke Sahip Devrelerde Güç Faktör Düzeltim	35
5.1.3.	Nonsinüzoidal Kaynak ve Nonlinear Yüke Sahip Devrelerde Güç Faktör Düzeltimi	37
5.2.	A. E. Emanuel ve M. Yang'ın Harmonik Kompanzasyon Yaklaşımı	39
5.3.	Sharon'un Güç Faktörü Yaklaşımı	46
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	49
	KAYNAKLAR	51
	ÖZGEÇMİŞ	54

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum bu çalışmada nonlinear sistemlerde güç faktörünün düzeltilmesi ile ilgili bilgiler sunmaya çalıştım. Tez çalışması sırasında yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Celal KOCATEPE'ye, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı Başkanı sayın hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR'a, beni yetiştiren fedakar anne ve babama, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Arif KARAKAŞ
İSTANBUL, 2000



ÖZET

Güç sistemine bağlanan elemanlar lineer veya nonlinear olarak 2 gruba ayrılabilir. Lineer elemanların akım ve gerilimleri arasındaki ilişki doğrusaldır ve sistemde sinüzoidal akım ve gerilim dalgaları bulunur. Nonlinear elemanların akım ve gerilimleri arasındaki ilişki ise doğrusal değildir ve sistemde nonsinüzoidal akım ve gerilim dalgaları bulunur.

Nonsinüzoidal akım ve gerilim harmonik bileşenler ile ifade edilirler. Harmonik bileşenler ise Fourier analizi sonucunda tespit edilir.

Harmonikler güç sisteminde bazı teknik ve ekonomik etkiler meydana getirirler. Bu etkiler gerilim düşümündeki artış, rezonans olaylarının meydana gelişi, dielektrik malzemelerde zorlanma, güç faktöründe değişme, ek kayıplar, yanlış ölçmeler vb. olarak özetlenebilir.

Güç faktörünün düzeltilmesi sinüzoidal dalgaların bulunduğu sistemde daha basit iken nonsinüzoidal dalga formlarının bulunduğu sistemlerde harmonik bileşenlerin ve toplam harmonik distorsiyonunun belirlenmesi, güç faktörünün değişme aralığı mutlaka incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada güç sisteminde harmoniklerin bulunması halinde güç faktörünün düzeltilmesi ile ilgili yaklaşımlar ve değerlendirilmeler incelenip sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Harmonikler, Nonlinear yükler, Güç Faktör Düzeltimi.



ABSTRACT

Elements connected to power system can be divided into two groups. Relation between the current and the voltage of linear elements is linear and in this case the system consists of sinusoidal current and voltage waveform. Relation between the current and the voltage of nonlinear elements are nonlinear and the system consists of nonsinusoidal current and voltage waveform.

Nonsinusoidal current and voltage is expressed in terms harmonic components. Harmonic components are determined via fourier analyse.

Harmonics creat some technical and economical effects in power systems. These effects are summerized as increase in voltage drop, resonance, stress in dielectric materials, variation in power factor, additional losses, faulty measurements etc.

While power factor correction is more simple in systems which have sinusoidal waveform, determination of harmonic components and total harmonic distortion as well as power factor variation interval is necessary in nonsinusoidal systems. In this study, the evaluations and approaches associated with the power factor correction in power systems existing harmonics are presented.

Keywords: Harmonics, Nonlinear loads, Power Factor Correction.



1. GİRİŞ

Bir elektrik güç sistemi, elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve tüketimine ilişkin tesislerden oluşmaktadır. Bu tesisler elektrik enerjisinin akım ve gerilim değerlerini, dalga şekillerini ve frekanslarını değiştirerek istenen çalışma koşullarına uygun hale getirmektedir. Generatör, transformatör, iletim hattı, kondansatör, motor, doğrultucu, ark fırını, statik Var sistemleri, anahtarlama güç kaynağı, floresan lambalar, elektronik aletler gibi cihazlar ve tesisler güç sisteminin birer bileşeni olarak sistemin değişik bölgelerinde farklı işlevler yüklenmişlerdir. Bu devrelerin akım-gerilim karakteristikleri doğrusal değilse, bu tür devreler nonlineer devreler adı verilmektedir. Şebeke akım ve geriliminin dalga şeklini sinüzoidal formdan bozan bu devreler harmoniklerin meydana gelmesine neden olurlar.

Alternatif akım güç sisteminde ideal koşullar altında elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması belirli gerilim seviyesinde, tek ve sabit frekansta yapıldığı için böyle bir sistemde gerilim ve akım dalga şekli saf sinüs şeklindedir. Pratikte bu tür enerjinin sağlanmasında birtakım zorluklarla karşılaşılabilir. Güç sistemine bağlanan bazı elemanlar ve bunların yol açtığı olaylar sebebiyle saf sinüzoidal dalga şeklinde sapmalar olabilmektedir. Saf sinüzoidalden sapma, genellikle harmonik bileşenlerin ortaya çıkması ile ifade edilir ve manyetik ve elektrik devrelerindeki nonlineer durumlar bunun en önemli etkenleridir. Bu nonlineer olaylara sebep, ark fırınlarında normal çalışma gereği ark oluşturulması ile demir çekirdekleri bulunan bobin, transformatör, generatör ve benzeri elemanların doymaya giderek manyetik bakımdan lineer olmayan bir olayın meydana gelmesi ve yarı iletken elemanların kullanılarak sinüzoidal dalganın bazı kısımlarının kırılmasıdır.

Alternatif akımın ortaya çıktığı günden beri harmonikler varolmuştur. Önceleri nonlineer yükler olarak sadece doğrultucular bilinmekteydi. Transformatörler de normal çalışma değerlerinin dışına çıktığında nonlineer şebeke elemanı olarak davranır. Harmonik üreten elemanların güç sistemine bağlanmasıyla nonlineerlik etkisi ve nonlineer eleman sayısı hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu artmanın temel sebebi yüksek güçlü yarı iletken anahtarların gelişimi ve onların doğrultucu, evirici ve çeşitli elektronik devrelerde uygulanması, gaz deşarjı aydınlatmasının yaygınlaşması, akü ve fotovoltaik sistemlerin ve elektrikli vasıtaların kullanımının artmasıdır. Bu tip yüklerin gelecek için daha da etkili olacağı düşünülmektedir (IEEE Working Group on Power System Harmonics, 1983).

Alçak gerilim tesislerindeki harmonikleri de üç ana başlık altında toplayabiliriz. Bunlar, endüstride kullanılan donanımlardan üretilen harmonikler, ofislerde kullanılan donanımlardan üretilen harmonikler ve evlerde kullanılan donanımlardan üretilen harmoniklerdir. Yarı iletken elemanları içeren tüm elektrikli ev aletleri birer harmonik kaynağı durumundadır. Ofislerde kullanılan bilgisayarlar, güç kaynakları ve bazı büro makineleri de harmonik bileşenlere yol açmaktadır.

Harmoniklerin meydana çıkması enerji sistemleri için istenmeyen bir durumdur, fakat çoğu işletmelerde harmoniklerin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Harmoniklerin ortaya çıkması işletme araçlarını ve tesislerini yükleyerek ek kayıplara ve aşırı ısınmaya ve işletme ömürlerinin kısalmasına neden olmaktadır. Ayrıca rezonans olaylarına da sebep olarak işletme için çok zararlı bir durum meydana getirmektedir.

1900'lü yıllarda transformatörlerin nonlineerliği ile, üretilen harmonikler ve Y/ Δ bağlamadaki 3. harmoniklerin oluşumu araştırılmıştır. (Clinker, 1914; Curtis, 1914). Bunun hemen arkasından yine transformatörlere ilişkin dalga şekilleri Steinmetz tarafından verilmiş ve harmonik distorsiyonun azaltılması için 'filtrelerin' kullanılması önerilmiştir. Sonraki yıllarda civa buharlı konverterlerle ilgili distorsiyonu konu alan yayınlara rastlanmaktadır.(Rissik, 1935)

2. Dünya savaşı sonrası doğrultucuların kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Günümüzde güç sistem mühendisleri ve tasarımcılar tarafından geniş bir şekilde kullanılmakta olan statik konverterlerin harmonik üretimi üzerinde durulmuştur (Read, 1945). Doğru akımla iletim sistemlerin detaylı incelenmesi ve bu sistemlerde kullanılan hat komütasyonlu dönüştürücülerin her iki çalışma (evirici ve doğrultucu) için karakteristiği ilk kez Kimbark tarafından verilmiştir (Kimbark, 1971). Doğru akımla enerji iletiminde, akü ve fotovoltaik sistemlerde sık sık kullanılan hat komütasyonlu dönüştürücüler bugün güç sistemlerinde harmoniklerin ana kaynağı olmaktadır. Reaktif gücü ayarlayarak bara gerilimini kontrol eden statik VAR generatörler de nonlineer bir elemandırlar. Harmonik ürettiklerinden bunların çalışması ve uygulaması da bu çerçevede verilebilir. Nonlineer aydınlatma elemanları olarak gaz deşarj aydınlatması yapan elemanlarla ilgili çalışmalar flüoresan lambaların modellenmesi (Waymouth, 1971), civa ve yüksek basınçlı sodyum lambalarının modellenmesi (Herrick, 1980), civa ark lambanın elektrikli çalışma karakteristiğinin modellenmesi (Laskowski and Donoghue, 1981) şeklinde özetlenebilir. Transformatörlerdeki üç ve üçün katı harmoniklerin geniş araştırması ve üç fazlı transformatörlerle ilişkisi de ortaya konulmuş (Pender and Del Mar, 1967) ve

transformatörlerin nominal değerleri dışında çalışması halinde nüveyi daha çok doymaya ve harmonik akımlarının hızlı bir şekilde artmasına sebep olduğu ifade edilmiş ve bu durum deneysel olarak ispatlanmıştır.

Teknolojinin ilerlemesiyle harmonik kaynaklarının sayısı da gittikçe artacaktır. Bundan dolayı çeşitli ülkelerdeki standart kuruluşları harmoniklere karşı bazı sınırlamalar getirmeyi uygun bulmuştur. Bu konuda dikkate alınan en önemli ölçüt "Toplam Harmonik Distorsiyonu"dur. Başka bir ifade ile bozulma faktörüdür. Bu tür standartlarla harmoniklerin sınırlandırılması yoluna gidilmektedir.

Bu çalışmada harmonikli devrelerde güç faktörünü düzeltmek için yapılan yaklaşımlar incelenmiştir. Bu konuda yapılan araştırmaların bazıları minimum kapasiteli kondansatör kullanarak güç faktörünün en büyük değerini elde edilmesi üzerine, bazıları da hat kayıplarını minimum yapan bir kondansatör akımının belirlenmesi üzerine yapılmıştır. Ayrıca enerji sistemindeki güç transfer kalitesini gözönüne alınarak yeni bir güç kalite faktörü tanımı verilmiştir.

Tezin birinci bölümünde, nonlineer eleman tanımı verilmiş, harmoniğe sebep olan elemanlar ve bu elemanların etkileri ile harmonikler üzerinde yapılan çalışmalara ait literatüre özeti verilmiştir. İkinci bölümde, harmonik tanımı yapıp, fourier serilerinin yardımı ile harmoniklerin matematiksel olarak analizi verilmiştir. Ayrıca ölçme yöntemi ile standartlardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, harmonikler ile ilgili genel tanımlar yer verilmiştir. Dördüncü bölümde, enerji sistemlerinde harmonik üreten elemanlar ve bunların temel büyüklüklere, devre elemanları ile sisteme vermiş oldukları etkiler üzerinde durulmuştur. Beşinci bölümde güç faktörü düzeltimi ile ilgili çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konan yaklaşımlar detaylı olarak incelenmiştir.

2. NONSİNÜZOIDAL BÜYÜKLÜKLERİN İNCELENMESİ

2.1. Harmonik Tanımı

Elektrik devrelerinde kullanılan nonlinear devre elemanları, bir işletmede harmoniklerin oluşmasının başlıca nedenidir. Bu devre elemanlarının gerilimleri ile akımları arasında lineer bir bağıntı olmayışı harmonikleri oluşturmaktadır. Magnetik devrelerin aşırı doyması, güç elektroniği devrelerindeki sinüzoidal gerilimin anahtarlanması ve elektrik arkları lineer olmayan olaylara örnek olarak verilebilir. Lineer olmayan bu yükler temel frekanslı aktif ve reaktif güç ile birlikte harmonik frekanslı akımlar üreten tüketiciler olarak kabul edilir. Bu tüketicilerin ürettiği harmonik akımlar harmonik frekanslı gerilimler meydana getirirler.

Harmonik akımlar nedeniyle sistemlerde gerilim düşümü artması, generatör, transformatör ve motorlardaki kayıpların artması ve rezonans olayının meydana gelme olasılığının yükselmesi gibi birçok olumsuz etki oluşabilir. Uygulamada en çok 5., 7., 11. ve 13. harmoniklerle karşılaşılır. Genellikle, 11. ve 13. harmoniklerin genliklerinin temel dalgaya göre çok küçük olması nedeniyle özel durumlar dışında dikkate alınmazlar. Daha çok 5. ve 7. harmoniklere ilişkin önlemler alınmaya çalışılır.

Harmonik akımlarının akış yönü harmonik kaynağından sistem kaynağına doğrudur. Harmonik akım kaynağı tarafından görülen empedans, sistem kaynak empedansı ile sisteme paralel bağlı diğer yüklerin empedanslarının toplamıdır. Sistem kaynak empedansının, paralel bağlı yük empedanslarının toplamının tipik olarak %5'i olmasından dolayı harmonik akımlarının %90-95'i sisteme doğru akmaktadır.

Güç sisteminde gerilim harmonik bileşenler içerdiğinde bundan tüm yükler etkilenmektedir. Gerilimdeki harmoniklerin nedeni güç sistemi empedansından akan harmonikli bir akım olacaktır. Bu nedenle harmonikli bir gerilimi önlemenin yolu harmonik akımlarının akışını kontrol etmek ve bu akımları gerilim harmoniklerine neden olacak yerlerden uzak tutmaktır.

2.2. Harmoniklerin Analizi

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

Periyodik dalga şeklinin temel bileşeni ve daha yüksek dereceli harmoniklerinin genlik ve faz açılarının hesaplanması işlemi harmonik analiz olarak adlandırılmaktadır (Arrillaga vd., 1985). Bozulmuş (nonsinüzoidal) bir periyodik dalga şeklinin harmonik bileşenleri, fourier analiz teorisine göre bir fourier serisi ile ifade edilebilir. Bu analiz tekniği uygulanarak nonsinüzoidal bir dalga şekli 50 Hz temel bileşen frekansının tam katları olan frekanslara sahip sinüs formunda dalga şekillerinin bir serisine açılabilir.

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

$$y = A_0 + (A_1 \sin x + B_1 \cos x) + (A_2 \sin 2x + B_2 \cos 2x) + \dots + (A_n \sin nx + B_n \cos nx) \quad (2.1)$$

Bu denklemde;

n =pozitif tamsayı olarak harmonik derecesi,

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

A_0 =DC Bileşen (Sabit terim) olup literatürde A_0 yerine $A_0/2$ de kullanılmaktadır (Dalgada DC bileşen yok ise A_0 sifira eşit olacaktır).

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

Herhangi periyodik bir dalganın Fourier serisine açılabilmesi için Dirichlet tarafından verilen bazı koşulları sağlaması gerekmektedir. Dirichlet koşulları olarak bilinen bu koşullar, bir periyot içinde sonlu sayıda süreksizlik bulunması, sonlu sayıda maksimum ve minimumların bulunması ve ortalamasının sonlu değer olmasıdır. Elektrik enerji sistemlerindeki dalga şekilleri

her zaman bu koşulları sağladığından Fourier bileşenlerinin elde edilmesi mümkün olacaktır. Sinüzoidal olmayan periyodik bir işaretin Fourier analizi sonrasında zaman domeni denklemini aşağıdakilerden herhangi biri ile gösterilebilir,

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin nt + B_n \cos nt) \quad (2.2)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nt + \phi_n) \quad (2.3)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(nt + \phi_n) \quad (2.4)$$

Uygulamalarda serinin genellikle ilk üç ya da dört terimi ele alınır. Elde edilecek efektif değerler ile ideale çok az hata ile yaklaşmış olur ve hesaplar kolaylaşır. Diğer taraftan, Fourier açılımını yukarıdaki gibi trigonometrik biçimde verilebileceği gibi, üstel biçimde de ifade edilebilir. Bu gösterim, şu şekilde verilebilir:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (D_n e^{jnt} + D_{-n} e^{-jnt})$$

$$D_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) e^{-jnt} dt \quad (2.5)$$

$$D_n = D_{-n}^*$$

Trigonometrik biçimden üstel biçime geçmek için

$$D_{-n} + D_n = B_n \quad (2.6)$$

$$j(D_n - D_{-n}) = A_n$$

eşitlikleri kullanılır.

Bir dalganın 'frekans spektrumu', bu dalganın Fourier serisinde her bir frekansa karşılık düşen genlikler işaretlenerek elde edilebilir. Yatay ekseninde frekans seçilip buna dik paralel çizgilerle her bir frekansa karşılık düşen genlikler ordinat üzerinde işaretlenir. Fourier katsayılarının bulunmasında yukarıdaki yöntemin haricinde kullanılan yöntemler vardır.

Analitik yöntem ile fourier katsayıları bulunmak istenirse, söz konusu terimler

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \sin nt \cdot dt \quad (2.7)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \cos nt \cdot dt$$

eşitlikleri kullanılarak elde edilebilirler. Periyodik fonksiyonun fourier bileşenleri, fonksiyonun dalga şekline bağlıdır. Yapılan dalga analizi sonunda bazı bileşenler bulunabileceği gibi bazıları da bulunmayabilir. Verilen fonksiyon çift fonksiyon ($f(t) = f(-t)$) ise, eğride düşey eksene göre bir simetri var demektir. Bu tür fonksiyonlarda $A_n = 0$ olur ve sadece kosinüslü terimler bulunur. Göz önüne alınan fonksiyon tek fonksiyon ($f(t) = -f(-t)$) ise fourier serisinde $B_n = 0$ olur ve seri sadece sinüslü terimlerden oluşur.

Dalga denkleminin yazılmadığı durumlarda grafik yöntemden yararlanılabilir. Osiloskoptan alınan veya deney sonucu elde edilen ya da bilgisayar yardımı ile yapılan bir simülasyon sonucu elde edilen dalga şekli m adet eşit parçaya bölünür ve aşağıdaki ifadelerden katsayılar hesaplanabilir.

$$A_n = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m f(k) \cdot \cos k \cdot \frac{2\pi \cdot \pi}{m}$$

$$B_n = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m f(k) \cdot \text{sinc} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \pi}{m} \quad (2.8)$$

$$A_0 = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m f(k)$$

Aralık sayısı m ne kadar büyük seçilirse hata oranı da o oranda azalacaktır. Bu ifadelerde $f(k)$, her k noktasına karşılık düşen fonksiyon değerleridir.

2.3. Harmoniklerin Ölçülmesi

Harmoniklerin frekanslarının ve genliklerinin ölçülmesi için hızlı Fourier dönüşümünü (FFT) kullanan harmonik analizörü veya dalga analizörü adı verilen cihazlar kullanılabilir. Sürekli bir harmonik analizi yapılarak sonuçları dalga şeklinde ya da temel bileşenin yüzdesi cinsinden spektrum şeklinde gösteren sistemler mevcuttur (Miller vd., 1992). Ölçülen harmoniklerin dört tip karakteristik özellik gösterdiği görülmüştür; yavaş değişen harmonikler, değişen harmonikler, hızlı değişen harmonikler, ara harmonikler. İlk üç kategori arasında kesin ayırım yapmak zordur. İlk durum sürekli analizin gerekli olmadığı durumlarda yapılan uygulamalardır. İkinci durum sürekli gerçek-zaman analizlerinin gerekli olduğu uygulamalardır. Üçüncü durum çok kısa süreli harmonik sıçramalarının ölçülmesidir. Bu uygulama özellikle şebekelerde uzaktan kumanda uygulamalarında önemlidir.

Harmonik ölçüm sonuçları genlik ölçümüne yani harmonik akımların efektif değerlerinin ölçümüne dayanır. Harmonik kaynaklar ve sistemin toplam empedansı ile yükleri içeren doğru bir eşdeğer devre oluşturmak için genlikler ile birlikte faz açılarının da ölçülmesi gerekir. Böylece sistemde harmonik mertebelerinde meydana gelebilecek değişiklikler önceden değerlendirilebilir, harmonik yük akışı tam olarak tahmin edilebilir ve sistemin farklı düğümleri için yapılan ölçmeler karşılaştırılabilir.

2.4. Harmonik Standartları

Bir çok ülke için harmoniklerin sınırlandırılması için toplam harmonik distorsiyonu (THD) kriterine göre çeşitli standartlar mevcuttur. Müsaade edilen maksimum gerilim ve akım distorsiyonu IEEE (standart 519-1992)'de belirtilmiştir. Buna göre birçok endüstriyel tesis için

maksimum müsaade edilen gerilim THD'si %5, herhangi bir harmonik bileşen içinse %3'tür (Bosela R.T.). IEEE(519-1992)'nin dağıtım sistemleri için akım distorsiyonu limitleri ise Çizelge 3.1'de verilmiştir. Ülkemizde güç sistemimiz için belirlenmiş standart değerler ve bu konuda bir çalışma yoktur. Sadece küçük ev aletleri için yayınlanmış bir standart mevcuttur.

Çizelge 2.1 Dağıtım sistemleri için akım distorsiyonu limitleri

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

Bu çizelgede,

I_K : Kısa devre akımını

I_1 : Temel bileşen akımını

h : Harmonik derecesini göstermektedir.

Çizelge 1.2 IEEE 519'a göre maksimum gerilim distorsiyon oranları

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

3. NONSİNÜZOİDAL BÜYÜKLÜKLERİN ELEKTRİK DEVRELERİNDEKİ TANIMLARI

Teknolojik gelişmelere paralel olarak, harmoniklerin elektrik enerji sistemlerindeki etkilerinin her geçen gün artması nedeniyle bu etkilerin tarifi, sınırlandırılmaları ve yok edilmeleri için bazı büyüklükler tanımlanmıştır (Shuter vd., 1989; Emanuel, 1990; Heydt vd., 1991). Hem gerilim ve hem de akım için tanımlanan Toplam Harmonik Distorsiyonu en yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu konudaki standartlarda sınırlamalar yüzde THD olarak gösterilmektedir. Harmonik analizi sırasında ve sonrasında bazı kolaylıklar sağlamak için maksimum harmonik mertebesi M olan ve

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^M I_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (3.1)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^M V_n \sin(n\omega t + \delta_n) \quad (3.2)$$

şeklinde verilen akım ve gerilim dalga şekillerini gözönüne alalım. Bu taktirde efektif akım ve efektif gerilim sırasıyla şu değerleri alacaktır:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = (I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2)^{1/2} \quad (3.3)$$

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = (V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2)^{1/2} \quad (3.4)$$

Dalğanın temel bileşen dışındaki tüm harmonik bileşenlerinin genliklerinin, dalğanın temel bileşeninin genliği cinsinden ifade edilmesi toplam harmonik distorsiyon (THD) olarak tanımlanır. Fourier analizi veya ölçme ile bulunan dalğanın temel bileşen dışındaki tüm harmoniklerin genliklerinin, dalğanın efektif değeri cinsinden ifade edilmesi de distorsiyon faktörü (DF) olarak tanımlanmaktadır.

Nonsinüzoidal bir akım için toplam harmonik distorsiyonu (THD_i) ve distorsiyon faktörü (DF_i) sırasıyla,

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.5)$$

$$\text{DF}_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} \quad (3.6)$$

Nonsinüzoidal bir gerilim için toplam harmonik distorsiyonu (THD_v) ve distorsiyon faktörü (DF_v) sırasıyla,

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.7)$$

$$\text{DF}_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V} \quad (3.8)$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki ifadelerde “1” indisi ile temel bileşen değeri ifade edilir iken “2...n” indisleri ile de harmonik bileşenlerin değerleri gösterilmektedir.

Aktif Güç,

$$P = V_o I_o + \sum_{n=1}^M V_n I_n \cos(\delta_n - \alpha_n) \quad (3.9)$$

olarak ifade edildiğinde; V_o, I_o gerilim ve akımın dc bileşenleri, V_n ve δ_n gerilimin genliği ile açısı, I_n ve α_n akımın genliği ile açısıdır.

Reaktif Güç,

$$Q = \sum_{n=1}^M V_n I_n \sin(\delta_n - \alpha_n) \quad (3.10)$$

Görünen Güç,

$$S = VI = \left(\sum_{n=0}^M V_n^2 \right)^{1/2} \cdot \left(\sum_{n=0}^M I_n^2 \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

Distorsiyon gücü,

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (3.12)$$

Güç Faktörü,

$$PF = \frac{P}{S} \quad (3.13)$$

Akım ve gerilimdeki n. bileşen için tariflenen tek harmonik distorsiyonu (HD),

$$HD_i = \frac{I_n}{I} \quad (3.14)$$

$$HD_v = \frac{V_n}{V} \quad (3.15)$$

Periyodik olarak değişen herhangi bir dalga şekli için tepe.faktörü veya crest faktörü (CF),

$$CF = \frac{\text{Tepe değer}}{\text{Efektif Temel bileşen değeri}} \quad (3.16)$$

Kompleks dalgaların form faktörü (k_f),

$$k_f = \frac{\text{Efektif değer}}{\text{Ortalama değer}} \quad (3.17)$$

Toplam Talep Distorsiyonu (TDD),

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (3.18)$$

Harmonik Oranı (HO), n. mertebeden harmoniğın genliğinin, temel bileşenin genliğine oranı olarak ifade edilir. Harmoniklerin etkinliğinin derecesini görmek ve “spektrumu” çizmek aşamasında kullanılır.

Nonsinüzoidal bir akım için harmonik oranı,

$$(\text{HO}_I)_n = \frac{I_n}{I_1} \quad (3.19)$$

Nonsinüzoidal bir gerilim için harmonik oranı,

$$(\text{HO}_V)_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (3.20)$$

olarak tanımlanabilir.

4. HARMONİK KAYNAKLAR ve HARMONİKLERİN GÜÇ SİSTEMLERİNE ETKİLERİ

4.1. HARMONİK KAYNAKLAR

Harmonikler arızasız bir işletmede de çeşitli nedenlerle oluşmaktadır. Magnetik ve elektrik devrelerindeki lineersizlik bu nedenlerin başında gelir. Normal çalışma şartlarının dışında da yüksek gerilim hatlarındaki korona olayları, arklı kısa devreler ve iki fazlı kısa devreler harmoniklerin oluşmasına neden olur (Bayram, 1985). Nonlineer yüklerin meydana getirmiş olduğu harmonikler, alternatif akım güç sistemlerinde en çok karşımıza çıkan harmonikler olmaktadır. Bu kaynakların önemli olanlarını sırasıyla inceleyelim.

4.1.1. Generatörler

Generatörler en doğal harmonik üreticileridir. Döner makinalarda, makina hızına ve endüvi oluk sayısına bağlı olarak akım harmonikleri üretilir (Arrillaga et al., 1985). Yuvarlak kutuplu makinalarda alan eğrisi trapez şeklinde olup, çıkık kutuplu senkron makinalarda yaklaşık dikdörtgen şeklindedir. Endüklenen elektromotor kuvveti bu alan eğrilerinin içerdiği harmoniklere uygun olarak 1., 3., 5., 7., 9. vb gibi tek bileşenlere sahip aynı harmonikleri içerir. Harmonik mertebesi (h) arttıkça genlikleri azalır, harmonik frekansı ise $h \cdot f_1$ formülüne göre artar, h. harmonik geriliminin değeri için kullanılan formül,

$$U_h = 4.44 \times h \times f_1 \times N_s \times k_h \times \phi_h \quad (4.1)$$

olup denklemden;

f_1 : temel harmoniğin Hertz cinsinden frekansını,

N_s : Bir faz sargısının sarım sayısını,

k_h : h'inci harmoniğin sargı faktörünü,

ϕ_h : h'inci harmoniğin akısını.

göstermektedir.

Statorun sargısı yıldız bağlanmışsa, 3 ve 3'ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunup fazlar arası gerilimlerinde bulunmaz.

Eğer yıldız bağlı generatöre üç fazlı simetrik bir tüketici bağlanmışsa ve yükün yıldız noktası generatörün yıldız noktasına bağlanmamış ise, 3 ve 3'ün katı harmonikli akımlar geçmez. Yıldız noktası nötre bağlı bir yükte faz iletkenlerinden 3 ve 3'ün katı frekanslı I_0 akımı, nötr üzerinden de faz iletkenlerinden geçen akımların toplamı olan $3 \cdot I_0$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde 3 ve 3'ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getirirler.

Generatör sargılarının üçgen bağlı olması durumunda ise, bu sargılarda 3'ün katı olan frekanslarda bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım, yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olur (Arrillaga et al., 1985).

4.1.2. Transformatörler

Güç sistemlerindeki en önemli elemanlardan biri olan transformatörler de harmoniklere sebep olurlar; çünkü güç sistemlerinde demir çekirdeği bulunan bobinler harmoniklere yol açmaktadır (Dommel et al., 1986). Demir çekirdeğinin mıknatıslanma karakteristiği nonlineer olduğundan, transformatör doyuma gitmekte ve harmonikleri üretmektedir. Eğer transformatör çekirdeği için mıknatıslanma karakteristiği lineer olsa idi, uygulanan sinüzoidal uyarma akımı neticesi sinüzoidal akı ve gerilim oluşacaktı. Yani; Şebeke geriliminin $V(t)=V_m \cdot \sin \omega t$ şeklinde sinüzoidal olması durumunda uyarma akısı da $\phi = \phi_m \cdot \cos \omega t$ şeklinde sinüzoidal bir akı üretecekti.

Transformatörler sinüzoidal gerilimle çalışma altında lineer mıknatıslanma karakteristiği bölgesinde sinüzoidal çıkış büyüklüğü verecek şekilde tasarlanmaktadır. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması çekirdekte daha çok doymaya ve harmonik akımları seviyesinde hızla artmaya sebep olabilir (Szabados and Lee, 1981). Günün erken saatlerinde sistem yükü az olduğundan, gerilimdeki yükselme sonucu aşırı uyarma meydana gelir, aşırı uyarımla oluşan akım harmoniklerinde 3.,5.ve 7. harmonikler etkili olur (Arrillaga et al., 1985), böylece mıknatıslanma akımı harmonikleri en yüksek seviyeye ulaşır. Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik 3. harmoniktir. 3 ve 3'ün katı harmoniklerinin hepsi aynı fazdadır çünkü aralarında 360 derecenin tam katları kadar faz farkı olmaktadır.

Harmonik akımları transformatörün primer reaktansı, hattın reaktansı ve generatörün kaçak reaktansı üzerinden geçerek harmonikli gerilim düşümü meydana getirir. Generatörde sinüs şeklinde emk üretildiği halde çıkış uçlarındaki gerilim şekli bozulabilir. Mıknatıslanma akımlarının şebekeye geçip geçmemesi transformatörün bağlantı grubu, primerin yıldız bağlı olması halinde yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması, transformatördeki magnetik devrenin geometrik yapısı gibi koşullara bağlıdır.

Transformatör yıldız/yıldız bağlanmışsa ve primer yıldız noktası nötre bağlıysa, her faz sargısında geçen 3 ve 3'ün katı harmonik akımları nötrde toplanarak 3 katı akımın geçmesine sebep olur. 5., 7., 11., vb mertebeli harmonikler yıldız noktasında sıfıra eşit olur. Eğer primer yıldız noktası nötre bağlı değilse, mıknatıslanma akımının 3 ve 3'ün katları olan harmonikleri yıldız noktasından dışarı çıkamazlar ve mıknatıslanma akımı 3. mertebeden harmoniksiz bir akı oluşturur.

Transformatör yıldız/üçgen bağlanmışsa ve primer yıldız noktası nötre bağlı ise fazlardan geçen 3 ve 3'ün katı harmonik akımları nötrden 3 katı akımın geçmesine neden olur. Eğer yıldız noktası nötre bağlanmamış ise, 3 ve 3'ün katı akı harmonikleri üçgen sargıda 3 ve 3'ün katı frekanslı sirkülasyon akımların geçmesine sebep olur ve bu akımlar kendilerini endükleyen akıya zıt olarak etkiyerek bunları söndürür.

Primeri üçgen bağlı transformatörlerde faz sargılarında mıknatıslanma akımında 3., 9., 15. gibi 3 ve 3'ün katları harmonikler meydana geldiğinden, şebekeden çekilen mıknatıslanma akımında 1., 5., 7., 11. vb gibi harmonikler bulunur. Bu yüzden magnetik akı 3 ve 3'ün katları harmonikleri içermez.

Transformatörlerin bağlantı şekilleri nasıl olursa olsun, primer yıldız noktası nötre bağlı olsun ya da olmasın veya çekirdek tipi farklı olsun, tüm bu durumlarda şebekeden 1., 5., 7., 11., 13. gibi harmonikli mıknatıslanma akımları daima çekilir.

4.1.3. Ark fırınları

Ark gerilim ile akım arasında nonlinear bir bağıntıya sahip olan fiziksel bir olaydır. Ark devreleri deşarj prensibi ile çalışmaktadır ve şebekeden sinüzoidal olmayan akım çekmektedir. Kaliteli çelik üretiminde kullanılan ark fırınları, yüzlerce MVA kapasitesinde tesis

edilebilmektedir. Ark fırınında ergitme ve tasfiye olmak üzere iki aşama vardır. Arkın boyuna bağlı olarak frekansın oldukça geniş bir aralıkta değişmesi harmoniklerin oluşmasının en büyük sebebidir. Ark fırınları, geniş spektrumlu harmoniklerin önemli bir örneğidir. Bu işletmelerde harmonik oluşumların nedeni ark fırınlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve ark akım-gerilim karakteristikleridir. Ark akımında, değeri zamana bağlı olarak sabit kalmayan her mertebeden harmonik bulunmaktadır. Ark olayında akım ile gerilim, ark ocağının gücüne ve çalışma safhalarına bağlı olarak da değişmektedir.

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, 1976)

4.1.4. Gaz Deşarjı İle Aydınlatma

Floresan, civa ark, neon vb gaz deşarjı aydınlatması ve yüksek basınçlı sodyum lambalar, özellikle büyük yerleşim birimlerinde çok daha fazla hissedilebilen harmonikler meydana getirirler. Bu tip lambalar, nonlinear elektriksel karakteristiğe sahip olup iletim esnasında da negatif direnç karakteristiği göstermektedir. 1., 3., 5., gibi tek harmoniklerin seviyesi floresan aydınlatmada önemli oranda devreyi etkiler. Üç fazlı dört telli montajda 3. harmonik akımı nötr iletkeninden geçmektedir (Arrillaga et al. 1985 ; Grady and Heydt, 1985).

4.1.5. Çeviriciler (Konverterler)

Hat komütasyonlu konverterler de günümüzdeki ana harmonik kaynaklarından birisidir. DC iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenmektedirler.

p darbe sayısına sahip bir konverterin meydana getireceği akım harmoniklerinin mertebesi

$h=k.p \pm 1$ olup buradaki k değeri

$$k=1,2,3,\dots \quad (4.2)$$

olmaktadır. (Konverterlerde darbe sayısı $p = 6, 12, 18$ veya 36 'dır).

$\dot{u}_h = 1$ ' den küçük bir katsayı olmak üzere harmonik akımı $I_h = I_1 \cdot (\dot{u}_h/h)$ ' dir ve çeşitli harmonik mertebelerinde konverterlerin kumandasına bağlı olarak farklı değerler almaktadır. \dot{u}_h komütasyon süresinin ihmal edilmesi durumunda 1 alınabilir. \dot{u}_h 'ın 1 olması durumunda $I_h = I_1/h$ elde edilecektir. Eşitlikten de görüldüğü gibi harmonik akımın efektif değeri harmonik mertebesi ile ters orantılıdır. Harmonik akımının efektif değerini azaltmak için p darbe sayısı ile harmonik akımın mertebesi artırılır.

Yukarıda verilen başlıca harmonik kaynaklarına ilave olarak aşağıda kısaca maddeler halinde verebileceğimiz diğer harmonik kaynaklarını da şu şekilde sıralayabiliriz:

- Rüzgar ve güneş enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarında ac/dc dönüştürücülerde kullanılan yarı iletken teknolojisi
- Elektrikli taşıtlardaki akü-şarj devresi
- Senkron makinelerin uyarılması için kullanılan diyod ve tristörlü dönüştürücüler
- Kaynak makineleri
- Kesintisiz güç kaynakları
- Elektrokimya teknolojisinde plakalara şekil verme ve elektrokaplama işlemlerinde kullanılan statik dönüştürücüler
- Yarı iletken kontrollü cihazlar
- Anahtarlama güç kaynakları
- Kompakt floresanlar ve beraberindeki elektronik balastlar ile ışık ayarlı halojen lambalar
- Bilgisayarlar ve bunların kullanıldığı otomasyon tesisleri
- Deşarj lambaları
- Doğru akımla enerji iletimi kontrolü ve dönüştürücü istasyonlar
- Statik VAR kompanzatörler
- Fuzzy kontrollü bulaşık ve çamaşır makineleri, çok ekranlı televizyonlar, mikrodalga fırınlar ve klimalar
- Güç üretim tesislerinde ateşleyici, fan ve pompayı sürmede kullanılan kontrol düzenleri

4.2. HARMONİKLERİN ETKİLERİ

Lineer olmayan yükler tarafından üretilen harmonikler, gerilim ve akımın dalga şeklini bozarak güç sistemlerindeki elemanlar üzerinde olumsuz etkilerde bulunurlar. Bazı durumlarda elemanların zarar görmelerine ve sistem dışı kalmalarına neden olurlarken yüksek harmoniklerin bulunduğu sistemlerde toprak kısa devresi akımlarının da daha büyük efektif değerlere yükselmesi gibi farklı sonuçlar doğurmaları da mümkündür (Wagner vd., 1993). 50 Hz şebeke frekansının katları olan harmonik akımı frekanslarından dolayı generatör, transformatör ve hat reaktansları üzerinde bu akımların meydana getirdiği gerilim düşümleri artar. Bu gerilim düşümlerinin frekansları şebeke geriliminin frekansından farklı olduğu için sinüzoidal gerilim şeklini bozarlar. Harmonik akımlardan dolayı generatör, motor ve transformatörlerdeki kayıplar artacaktır. Sistemde çeşitli frekansların mevcut olması da rezonansın meydana gelmesi olasılığını arttıracaktır. Olası bir rezonans sonucu oluşabilecek büyük akım ve gerilim değerleri sistemdeki elemanlara zarar verecektir. Harmoniklerin diğer etkilerini genel olarak maddeler halinde şu şekilde sıralayabiliriz:

- Aşırı gerilimlerden dolayı izolasyon malzemesinin delinmesi
- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler
- Elektrik cihazlarının ömrünün azalması
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü vb. yerlerde çalışma bozuklukları
- Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hatalarının oluşması
- Kompanzasyon tesislerinin zarar görmesi
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımları ve aşırı ısınma oluşumu
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma
- Mikrobilgişlemciler ve bilgisayarlar üzerinde hatalı çalışma

4.2.1. Harmoniklerin Temel Büyüklüklere Etkileri

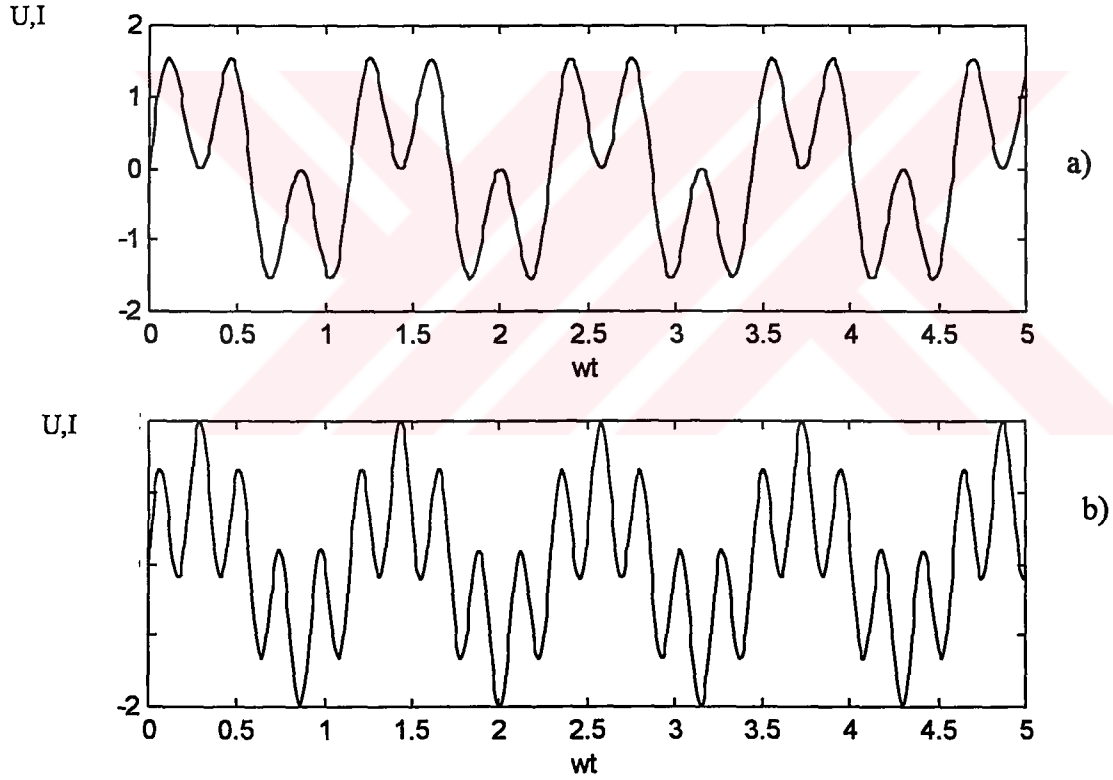
Harmonik bileşenlerin bulunduğu sistemlerde, akım, gerilim ve diğer devre büyüklüklerinin hesaplanmasında fourier analizinden elde edilen değerler kullanılmaktadır.

4.2.1.1. Harmoniklerin Akım Dalgası Üzerine Etkisi

Harmoniklerin bulunduğu bir devrede akım ifadesi

$$I_n = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (4.3)$$

şeklinde. Akımın bu ifadesinden de görüldüğü gibi harmonik içeriği ne kadar büyükse akımın etkin değeri de o kadar artacaktır ($I_n > I_1$). Ayrıca bazı harmonikler sinüs eğrisinin tepesini sivrileştirirken bazıları da basıklaştırmaktadır (Şekil 4.1). Eğrilerdeki bu tür bozulmalar da dalgaın tepe değerine göre kumanda edilen ölçü, kontrol ve koruma tesislerine zarar verebilmektedir.



Şekil 4.1 Harmoniklerden dolayı sinüzoidal şekli bozulan akım veya gerilim eğrileri

- (a) Tepesi basıklaşan dalga şekli
- (b) Tepesi sivrileşen dalga şekli

4.2.1.2. Harmoniklerin Gerilim Dalgası Üzerinde Etkisi

Nonsinüzoidal bir gerilim ifadesi

$$U_n = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}$$

(4.4)

şeklinde. Gerilim eğrisi içinde ne kadar fazla harmonik bulunuyorsa gerilimin efektif değeri de o kadar büyük olacaktır. Harmoniklerden dolayı akım eğrilerinde karşılaşılan sorunlar gerilim eğrilerinde de aynı şekilde bulunmaktadır (Şekil 3.1).

4.2.1.3. Harmoniklerin Görünür, Aktif ve Reaktif Güç Üzerine Etkisi

Harmoniklerden dolayı akım ve gerilimin efektif değerlerinin artması güç değerlerinde de bir artış meydana getirmektedir. Aşağıdaki güç ifadelerinde de harmoniklerden dolayı meydana gelen bu artışlar görülmektedir.

Görünür güç,

$$S_n = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n = U_1 \cdot I_1 + U_3 \cdot I_3 + U_5 \cdot I_5 + \dots + U_n \cdot I_n \quad (4.5)$$

Aktif güç,

$$P_n = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + U_3 \cdot I_3 \cdot \cos \varphi_3 + U_5 \cdot I_5 \cdot \cos \varphi_5 + \dots + U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \quad (4.6)$$

Reaktif Güç,

$$Q_n = \sqrt{S_n^2 - P_n^2} \quad (4.7)$$

Harmoniklerin meydana getirdiği güç değerlerindeki bu artış, nonlineer yüklerle sahip tüketicilerin şebekelere ek bir yükleme getirdiğini de göstermektedir.

4.2.2. Harmoniklerin Temel Devre Elemanları Üzerine Etkileri

Harmonik bileşenler direnç, endüktans, kapasite gibi temel devre elemanlarının değerinde değişmelere neden olurlar. Bu değişimler direnç ve endüktansta artış, kapasite de ise azalma şeklinde ortaya çıkmaktadır.

4.2.2.1. Harmoniklerin Dirence Etkisi

Harmoniklerin bulunmadığı bir sistemde, direnç üzerinden sadece sinüzoidal bir dalga şekline sahip akımın temel bileşeni geçer. Bu akım, direnç üzerinde ısı enerjisi olarak kendini gösterir.

$$P = R \cdot I^2 \quad (4.8)$$

Farklı frekanslardaki harmonik akımları deri olayının etkisinden dolayı direnç değerlerini arttıracaktır. Bu da direnç üzerinde ek bir ısı enerjisi oluşturacaktır, n. harmonik bileşeni ve bu bileşende görülen omik direnç değeri kullanılarak bulunan toplam joule kaybı

$$P = \sum I_n^2 \cdot R_n = I_1^2 R_1 + I_3^2 R_3 + I_5^2 R_5 + \dots + I_n^2 R_n \quad (4.9)$$

Harmonikli sistemlerde dirençler şebekeden daha fazla güç çekerler. Bu da ek bir kayıp güç meydana getirir.

4.2.2.2. Harmoniklerin Bobine Etkisi

Harmoniksiz bir sistemde bobinin endüktif reaktansı, empedansı, güç katsayısı ve reaktif gücü sırasıyla aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir.

$$X_{L1} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L \quad (4.10)$$

$$Z_{L1} = \sqrt{R_L^2 + X_{L1}^2} \quad (4.11)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_L}{\sqrt{R_L^2 + X_{L1}^2}} \quad (4.12)$$

$$Q_{L1} = \frac{U_L^2}{X_{L1}} = I_{L1}^2 \cdot X_{L1} \quad (4.13)$$

yukarıdaki denklemlerde f_1 temel bileşen frekansını, X_{L1} bobinin temel frekansa ait endüktif reaktansını, R_L bobinin iç direncini göstermektedir. Harmoniklerin mevcut olduğu bir sistemde ise bu büyüklükler aşağıdaki gibi gösterilebilir.

n. harmonik için endüktif reaktans,

$$X_{Ln} = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L = n \cdot X_{L1} \quad (4.14)$$

n. harmonik için empedans,

$$Z_{Ln} = \sqrt{R_L^2 + n^2 \cdot X_{L1}^2} \quad (4.15)$$

n. harmonik için güç faktörü,

$$\cos \varphi_n = \frac{R_L}{\sqrt{R_L^2 + n^2 \cdot X_{L1}^2}} \quad (4.16)$$

n. harmonik için reaktif güç,

$$Q_{Ln} = \frac{U_{Ln}^2}{X_{Ln}} = \frac{U_{Ln}^2}{n \cdot X_{L1}} = n \cdot I_{Ln}^2 \cdot X_{L1} \quad (4.17)$$

Bobinin omik direnci çok küçük olduğundan, harmonik frekansların neden olduğu dirençler ihmal edilip harmoniksiz durumdaki direnç değeri gözönüne alınmıştır. Denklemlerden görüldüğü gibi, harmonikli durumdaki endüktif reaktans değeri, harmoniksiz durumdaki

endüktif reaktans değerinin n katı kadar büyüktür. Empedans değeri de arttığından devreden çekilen akım miktarı azalır ve dolayısıyla gerilim düşümü artar.

4.2.2.3. Harmoniklerin Kondansatörlere Etkisi

Harmoniksiz sistemde kondansatörün kapasitif reaktansı aşağıdaki şekildedir

$$X_{C1} = \frac{1}{2.\pi.f_1.C} \quad (4.18)$$

Harmoniklerin bulunduğu sistemde ise kapasitif reaktans aşağıdaki ifadeye sahip olacaktır.

$$X_{Cn} = \frac{1}{n.2.\pi.f_1.C} = \frac{X_{C1}}{n} \quad (4.19)$$

Görüldüğü gibi kondansatörün kapasitif reaktansı harmonik mertebesinin oranına göre azalmaktadır. Bu da empedans değerinin düşürecek ve kondansatörün devreden daha fazla akım çekmesine neden olacaktır.

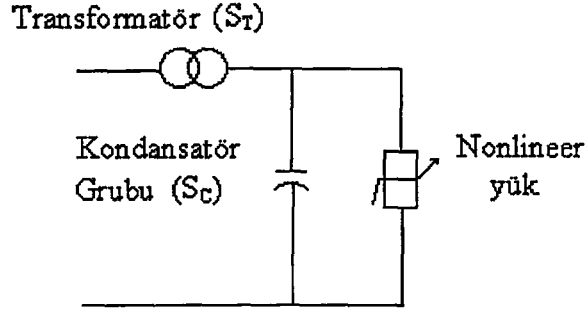
4.2.3. Harmoniklerin Sistem Üzerine Etkileri

Harmonik bileşenlerin güç sistemi üzerine bir çok olumsuz etkileri vardır. Bunları sırasıyla şu şekilde inceleyebiliriz.

4.2.3.1. Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları

Güç sistemlerinde, kapasitif reaktans değeri frekans ile ters orantılı olarak azalırken endüktif reaktans değeri frekans ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Kapasitif reaktansın endüktif reaktansa eşit olduğu frekansa rezonans frekansı adı verilmektedir. Sistemde oluşabilecek bir rezonans frekansı, mevcut harmonik frekanslardan birine yakın bir değerde ise, aşırı büyüklüklerde harmonik akım ve gerilimleri meydana çıkacaktır. Rezonans durumu harmonik seviyelerini etkileyen en önemli etkenlerden birisidir. Paralel rezonans harmonik akım akışına yüksek empedans değerleri gösterirken seri rezonans düşük bir empedans değeri göstermektedir. Herhangi bir rezonans durumu mevcut değilse sistemde önemli seviyelerdeki

harmonik akımları taşınabilir. Bu yüzden sistemin cevap karakteristikleri incelenerek sistemin rezonans problemlerinin ortadan kaldırılması çok önemlidir (Shipp, 1979). Rezonans durumlarını seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki guruba ayırmak mümkündür. Şekilde bir paralel rezonans devresi görülmektedir.



Şekil 4.2 Paralel rezonans durumu

Paralel rezonans durumu en çok karşılaşılan problemlerden birisidir. Sistem endüktansı ile kondansatör grupları arasında, sistemde bulunan nonlineer yüklerin ürettiği harmonik frekanslarından birinin yakınında, paralel rezonans oluşabilir. Böyle bir sakıncalı durumun oluşması kondansatör uçlarındaki gerilimin aşırı değerlere yükselmesine sebep olacaktır ve bu da kondansatöre zarar verebilecektir.

Şebeke empedansının tamamen endüktif olduğu kabul edilerek rezonans frekansı aşağıdaki gibi formüle edilebilir,

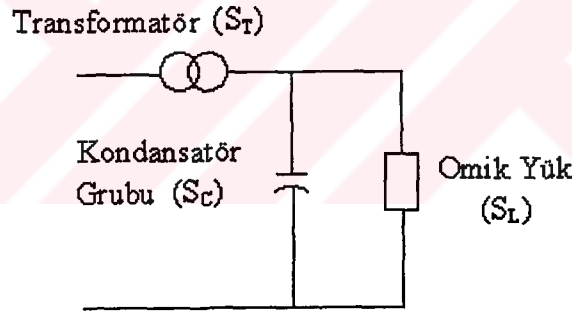
$$f_p = f \cdot \sqrt{\frac{S_k}{S_c}} \quad (4.20)$$

burada f sistemin temel frekansı, f_p paralel rezonans frekansı, S_k şebekenin kısa devre gücü ve S_c kapasitenin anma gücü olarak gösterilmiştir. Rezonans koşulunu sistemin endüktansı (L_s), kapasitesi (C_s) ve yükün kapasitesi (C_L) belirleyecektir. Baradaki harmonik gerilim ile birlikte, baraya bağlı her tüketici yük ve kaynakların harmonik akımları⁴ ölçülerek rezonans koşulunun hangi durumda oluşabileceği belirlenebilir. Baradan enerji sistemine akan akım değerinin küçük, harmonik gerilim değerinin yüksek olduğu durumda, rezonansın enerji sistemi tarafında oluşacağı söylenebilir. Baraya bağlı yükler eğer harmonik akımları çekiyorsa ve barada

harmonik gerilimler meydana getiriyorsa rezonans sistemin endüktansı ile yük kondansatörü arasında oluşacaktır (Arrillaga, 1985).

Harmoniklerin etkisini gidermek için güç sisteminde yapılan filtre tasarımında ve güç faktörü düzeltiminde kullanılacak olan kondansatörlerden dolayı, paralel rezonans meydana gelebilmektedir. Bu rezonans durumu kondansatör grubunun kapasitif reaktansının sistemin endüktif reaktansına eşit olduğu frekansta meydana gelecektir. Bu rezonans frekansı yük tarafında üretilen harmonik frekanslarının yakınında meydana gelirse, harmonik gerilim ve akımında yükselmeler olacağı kesindir. Eğer paralel rezonans frekansı biraz değiştirilirse veya yükün en düşük dereceli harmonik teriminden daha düşük bir değerde meydana getirilirse, harmonik yük akımlarının yükselmesi minimize edilebilir veya elimine edilebilir. Paralel rezonans frekansının biraz değiştirilmesi sisteme kondansatör grubuyla seri bir endüktansın yerleştirilmesiyle yapılabilir. Bu gruba filtre denilmektedir. Bu harmonik filtre grubunda yıldız bağlı veya üçgen bağlı kondansatörler kullanılır.

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



Şekil 4.3 Seri Rezonans Devresi

Seri rezonans koşulu aşağıdaki formül ile verilebilir,

$$f_s = f \cdot \sqrt{\frac{S_t}{S_c \cdot Z_t} - \frac{S_L^2}{S_c^2}} \quad (4.21)$$

burada f_s seri rezonans frekansını, S_t transformatörün nominal gücünü, Z_t transformatörün p.u olarak empedansını ve S_L omik yükün gücünü göstermektedir. Seri rezonans, rezonans frekansıyla uyuşan harmonik akımlarına düşük bir empedans yolu sağladığı için harmonik

akımlarda bir büyüme meydana gelmez ama harmonik akımlar şebekenin istenmeyen kısımlarına akabilirler. Böyle bir istenmeyen durum iki tür problemle karşılaşılmasına yol açabilir: (i) rezonans devresi ile hat boyunca seri bağlantılı devreler varsa, önemli ölçüde parazitler oluşabilir (Gonzales. 1987), (b) rezonans kolundaki harmonik akımlar nedeniyle kondansatör grubunda aşırı gerilim harmonikleri oluşabilir ve bobin sargılarının izolasyonu zorlanır. Kondansatör uçlarındaki gerilim şebeke geriliminin X_c/R katına çıkar (Van,1993).

Görüldüğü gibi rezonans durumu sistemlerde arızalar ve ekipmanlarda hasarlar meydana getirebilir. Sistem yükünün az olduğu zamanlarda, örneğin gecenin geç saatleri ve tatil günlerinde harmonik rezonansın etkisi daha fazladır. Yük seviyesi arttıkça akımın akabileceği daha küçük empedans yollarından dolayı rezonans nedeniyle oluşan harmonik artışı zayıflar. Bir çok endüstriyel tesiste olduğu gibi, devreler daha az yüklendiklerinde ve yüklerin tümü motor olduğunda, rezonans nedeniyle oluşan harmoniklere karşı daha duyarlı olurlar (Arrillaga, 1985)

4.2.3.2. Kondansatörler Üzerindeki Etkiler

Kondansatörlerin kendileri harmonik üretmezler, ancak sistemde rezonans koşulları için uygun çevrimleri oluştururlar. Güç faktörünün düzeltilmesi için kullanılan kondansatörlerin de sistemdeki harmonik seviyesi üzerinde önemli etkileri vardır. Belli bir frekansta kondansatörler, sistemi rezonansa getirebilir. Bununla beraber söz konusu rezonans frekansı yük akımının veya sistem geriliminin harmoniklerin frekanslarından birine yaklaşır veya eşit olursa, büyük akımlar ve gerilimler meydana gelecektir. Bir alçak gerilim güç sisteminin rezonans frekansı aşağıdaki formülden hesaplanabilir,

$$n = \sqrt{Q_S / Q_C} \quad (4.22)$$

burada n, rezonansın meydana gelebileceği harmoniğin mertebesini; Q_S , sistemin, kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücünü, Q_C ise kondansatörlerin gücünü göstermektedir. Kapasitif empedans, frekans ile ters orantılı olduğundan frekans arttıkça azalır. Bunun sonucunda da, herhangi bir harmonik mertebesi, akımdaki oranının gerilimdeki oranından büyük olacaktır böylece kondansatör akımı artacak ve ilave ısınmalara yol açacaktır. Gerilimin sinüzoidalden ayrılması da bu elemanlar üzerinde ek kayıplara yol açar. Ayrıca harmonik bileşenler, kondansatörler üzerinde ek ve daha yüksek dielektrik zorlanmalara neden olurlar.

Genelde bir çok harmonik problemi şönt kondansatör gruplarında ya sigortanın artması ya da kondansatör ünitesinin bozulması gibi nedenler sonucu ortaya çıkar. Kondansatörün rezonans çevriminin bir parçası olması bunun sonucunda da akım ve gerilim büyüklüklerinin yüksek değerler alması, kondansatördeki problemlerin nedenidir.

4.2.3.3. Güç Sistemi Devre Kesicileri ve Sigortalar Üzerindeki Etkiler

Güç sistem devre kesicilerin işletiminde meydana gelebilecek bir aksaklık, harmoniklerin varlığında elektromanyetik endüksiyon bobininin doğru çalışmamasından kaynaklanmaktadır. Nonlineer yükler tarafından üretilen harmoniklerden dolayı akımdaki harmonik bozulma, devre kesicilerin akımı kesme yeteneğini de etkilemektedir. Bu bozulma, akımın sıfır geçişinde, temel frekanstaki normal sinüs dalgasına göre daha yüksek bir değişim hızına yol açabilmektedir bu da sonuç olarak kesmeyi zorlaştırmaktadır. Arkı, söndürüldüğü yer olan ark hücrelerine süren manyetik alanı oluşturmak için bobin kullanıldığından, bunun çalışmasındaki anormallikler arkın tekrar yeniden tutuşmasına ve kesicinin yeniden kapanmasına yol açmaktadır. Literatürde bu olaya 'reigniton' denmektedir. Harmonik akımlar ek ısınmalara neden olduklarından, sigortaların çalışma karakteristiklerinin değişmesine ve akımı zamansız kesmelerine yol açar.

4.2.3.4. İletkenler Üzerindeki Etkiler

İletkenlerde, harmonik akımların ısınmaya neden oldukları iki durum söz konusudur. Birinci durum 'skin effect' ve 'proximity effect' olarak adlandırılan akımın iletken içinde yeniden dağılımına neden olan etkilerdir. Akım iletkenin dışına doğru yoğunlaştığında, iletkenin etkin direnci büyür. 'Skin effect' veya 'Deri etkisi' olarak bilinen bu etki frekansla birlikte artar. 'Proximity effect' ise komşu iletkenlerde akan akımın oluşturduğu manyetik alanlar tarafından, iletkenin içindeki akım dağılımının etkilenmesi olayıdır. İkinci durum, tek fazlı yükleri besleyen 3-fazlı 4-telli sistemlerin nötr iletkenlerinde anormal ölçülerde büyük akımlara sebep olur. Temel frekanstaki dengeli 3 fazlı akımlar nötr iletkeninde akım oluşturmazlar. Fakat, 3 fazlı sistemlerde 3. harmonikler nötr iletkeninde birbirlerini zayıflatmaz tam tersine güçlendirir. Hatta, nötr akımı faz akımının 1.7 katına kadar çıkabilir. Nötr iletkenlerinin faz iletkenleriyle aynı boyutlarda olması durumunda da nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Bu soruna en çok 3 fazlı dağıtım sisteminin tek fazlı büyük yükleri beslediği ticari tüketicilerde rastlanmaktadır. Söz

konusu soruna karşı alınan en yaygın önlem nötr iletkeninin, faz iletkenlerinin iki katı büyüklüğünde boyutlandırılmasıdır.

4.2.3.5. Döner Makinalar Üzerindeki Etkiler

Döner makinalar üzerinde hem akım hem de gerilim harmoniklerinin olumsuz etkileri vardır. Elektrik makinalarına uygulanan sinüs biçimli olmayan gerilimler aşırı ısınmaya, motor momentinin salınım yapmasına, gürültüye neden olabilir. Harmoniklerin mevcudiyeti stator sargılarında, rotor devresinde ek kayıplara yol açar ve makina kayıplarını yaklaşık olarak %10-12,5 artırır (Murphy ve Turnbull, 1988). Elektrik makinalarındaki kayıplar uygulanan gerilimin frekans içeriğine bağlıdır. Harmonik momentler de harmoniklerin yol açtığı bir diğer olaydır. Nonsinüzoidal bir gerilim uygulandığı zaman motor veriminde ve momentinde bir düşüş olur, motor verimi yaklaşık olarak %2 düşer (Murphy ve Turnbull, 1988). Rotorun aşırı ısınması gerilim bozulmasının yol açtığı başlıca sorundur. Motor sıcaklığındaki artış motorun ömrünü kısaltmaktadır. Bundan en fazla tek fazlı motorlar etkilenmektedir. Nonsinüzoidal bir beslemeye sahip üç fazlı bir endüksiyon motorundaki harmonik akımların oluşturduğu akı yoğunluğu arasındaki etkileşim gürültüye neden olabilir (Belmans vd., 1987;Wallace, 1990).

Standartlar, motor için kesin bir gerilim veya akım sınırlaması vermemesine karşın, endüksiyon motorları için %5'lik bir gerilim harmoniği sınırlaması verilebilir (Arrillaga, 1985).

4.2.3.6. Transformatörler Üzerindeki Etkiler

Transformatörlere harmoniklerin iki türlü etkisi olmaktadır. Birincisi akım harmoniklerinin bakır sargı kayıplarında ve kaçak akı kayıplarında artışa neden olmaları, ikincisi gerilim harmoniklerinin histerezis akımlarından dolayı demir kayıplarında artışa ve yalıtımın zorlanmasına neden olmalarıdır (Arrillaga, 1985). Her iki etkide de transformatörler üzerinde ilave ısınmalar oluşur. Bu da donanımın ömrünü kısaltmaktadır. Transformatör endüktansı ile transformatörlere bağlı bir tüketicinin kapasitesi arasında rezonansın meydana gelmesi de gözardı edilmeyecek diğer bir sorundur.

Harmoniklerin akım ve gerilimlerinin oluşturduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Frekans arttıkça transformatör kayıpları artar. Bu yüzden transformatörün ısınmasında yüksek frekanslı harmonik bileşenler düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemlidir. Ayrıca

demir çekirdeğin titreşimlerinden ve transformatör sıcaklığının değişimlerinden kaynaklanan mekanik zorlanmalarda söz konusudur.

Standartlar, transformatör aşırı gerilim değerlerini belirlemiştir. Bu değerlere göre nominal yükte maksimum aşırı gerilim %5, yüksüz durumda ise %10 olarak belirlenmiştir. Bu sınırlamalar harmonik dalga şeklinin bozulması durumunu da içine almaktadır (Wagner vd., 1993).

4.2.3.7. Ölçme Aletleri Üzerindeki Etkiler

Ölçü aletleri tam sinüzoidal işaretlere göre ayar edilmektedir. Sistemde bulunan akım ve gerilim harmonikleri de dalga şeklinin saf sinüzoidal halini bozduklarından hatalı ölçüm sonuçları elde edilmesine neden olmaktadır. Son yıllarda üretilen modern cihazlar, dalga şeklinin bozulmasından daha az etkilenmektedir. Modern voltmetreler ve ampermetreler, sinüzoidal olmayan işaretlerden % 0,2' den daha az hata vermektedirler. Modern wattmetrelerin ölçüm hataları ise % 0,1'den daha azdır. Bu değerlerden da akım ve gerilimin elektronik olarak çarpıldığı modern wattmetrelerin mükemmel bir performans gösterdiği görülmektedir. En yaygın kullanılan aletlerden olan elektrik sayaçları, frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlarından ötürü hatalar oluşturur. Akım ve gerilimin her ikisinin de değişmiş olduğu bir testte, bu sayaçlar, % 20'lere kadar varan hatalar yapmıştır. Nonsinüzoidal biçimli akım ve gerilimlerin yoğun olarak bulunduğu ortamlarda endüksiyon diskli elektronik sayaçlarının kullanımından kaçınmak gerekir. Çünkü, hatalı ölçümler yapmak dışında 400-1000 Hz aralığındaki rezonanstan kaynaklanan arızalarda olasıdır (Wagner vd., 1993).

4.2.3.8. Röleler Üzerindeki Etkiler

Röleler genellikle temel gerilim ve akımlara göre tasarlandıklarından harmonik distorsiyonlardan çeşitli şekillerde etkilenirler. Dalga şeklinin bozulması, koruma rölenin performansını etkilediği gibi arıza koşullarında çalışmamasına veya sistemin olağan çalışma koşullarında gereksiz yere çalışmasına neden olabilir. Rölelerin çalışmasını etkileyen harmonik mertebeleri, diğer elemanlar için kabul edilebilir maksimum harmonik mertebelerinden daha yüksektir. Harmonik distorsiyon özellikle sayısal mesafe rölelerinde büyük ölçme ve değerlendirme hatalarına yol açabilmektedir. Her röle harmoniklerin varlığı karşısında farklı davranmaktadır. Bir rölenin performansını onu test etmeden tahmin etmek güçtür.

4.2.3.9. İletim Sistemi Üzerinde Etkiler

Hava hattı veya yeraltı kablosu olarak modellenen iletim sistemi üzerindeki etkiler iki guruba ayrılabilir. Bunlardan birincisi harmonik akım bileşenlerinin oluşturduğu ek hat kayıplarıdır. İkincisi, harmoniklerin iletim sisteminde bulunan çeşitli devre elemanları üzerinde oluşturduğu gerilim düşümleridir. Harmonik gerilimler kablolu iletim durumunda tepe gerilim değerleriyle dielektrik zorlanmayı arttırlar. Bunun bir sonucu da kablunun ömrünün kısalması, buna bağlı olarak da arıza sayısının artması ve aynı şekilde onarım, bakım masraflarının artmasıdır.

4.2.3.10. Aydınlatma Donanımı üzerindeki Etkiler

Nonsinüzoidal besleme geriliminde çalıştırıldıklarında akkor lambaların işletme ömrü kısalmaktadır. Bu durum, lambanın içindeki flamanın aşırı ısınmasından kaynaklanmaktadır. Normal gerilimin %5 üstündeki bir gerilimde kullanıldıklarında, akkor lambanın ömrünün %47 oranında azaldığı görülmüştür. Harmonik kaynaklı gerilim bozulmasının flüoresan lambalar üzerinde ise işitilir bir gürültüye yol açmak dışında bilinen bir etkisi yoktur.

4.2.3.11. İletişim Hatları Üzerindeki Etkiler

Telefon ile iletim hatlarının yan yana bulunması, telefon haberleşmesinde parazit oluşturur. Parazitlerin miktarı akım ve gerilimin genliğine ve frekansına bağlıdır. Haberleşme devrelerindeki gürültü iletim kalitesini azaltmaktadır ve iletilen bilgide kayba neden olabilmektedir. Harmoniklerin oluşturduğu paraziti belirlemek için iki değişken göz önüne alınır. İlk değişken frekans, genlik ve frekans için ağırlaştırma faktörünü birleştiren telefon etki faktörüdür (TEF). Diğer değişken ise telefon etki faktörü ile akımın çarpımı olan çarpandır.

4.2.3.12. Güç Faktörüne Etkileri

Güç faktörü, $\cos\phi$, çalışan sistemden enerji çalarak sistemi sürekli büyümeye zorlamaktadır. Harmonik akımlara ihtiyaç gösteren yeni cihazlar devreye alındığında güç faktörü 0,88'lerden 0.70'lere düşmektedir. Bu kötü durum distorsiyon gücü adı verilen büyüklükle izah edilebilir. Bu distorsiyonlar nonlineer yüklerin yüksek frekans ihtiyaçlarından meydana gelmektedirler ve distorsiyon faktörü olarak ifade edilirler. Distorsiyon ve güç faktörünün sisteme etkisi ne kadar

büyükse belli bir yükü enerjilendirmek için o kadar güçlü bir sisteme ihtiyaç duyulacaktır. Nonlineer yükleri içeren tesislerde kapasite değeri ne kadar büyük olursa olsun güç faktörü belli bir değere kadar yükselmekte daha sonra düşüş göstermektedir. Bu da bize uygulamada güç faktörünü düzeltmek için gereksiz yere ne kadar çok kapasite kullanıldığını göstermektedir. Bu yüzden güç faktörünü istenen değere çıkartmak için harmonikler mutlaka filtre edilmelidir (İnan ve Attar, 1997).



5. HARMONİKLİ GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTİLMESİ

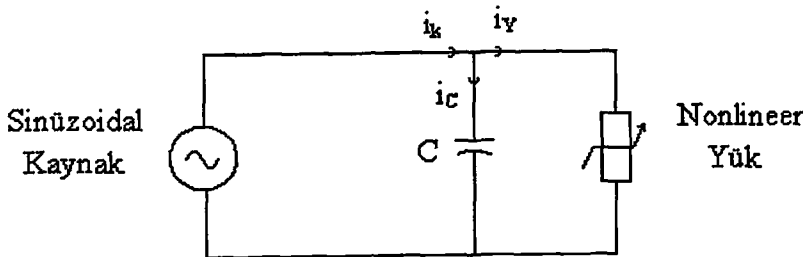
Lineer elemanlardan ve sinüzoidal besleme kaynağından oluşan devrelerin güç faktörü düzeltimi bilindiği gibi reaktif gücün sıfır veya sıfıra yakın bir değere getirilmesi ile mümkündür. Bunun için genellikle endüktif yüklü devreler için kapasite elemanının kullanımı gerekmektedir. Temel bileşenin bulunduğu bu tür devrelerde işlemin çok basit olmasına rağmen temel bileşen dışında bileşenlerin (3. harmonik, 5. harmonik, ... , n. harmonik) bulunması halinde güç faktörü düzeltimi biraz daha zorlaşmaktadır. Bunun ile ilgili çeşitli görüşler ve düşünceler vardır. Her bir çalışma farklı bir yönü değerlendirebilmektedir. Örneğin, bir çalışmada güç faktörünün değeri ön plana çıkartılırken diğer bir çalışmada distorsiyon değerinin göz önüne alınması gerektiği belirtilmektedir. Konuyla ilgili çeşitli araştırmacıların yaklaşımlarını şöyle sıralayabiliriz.

5.1. W. Shepherd ve P. Zand'ın Nonlinear Devrelerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi Yaklaşımı

En büyük güç faktörü için minimum optimal C değerini bulmayı amaçlayan bu yaklaşım, nonsinüzoidal büyüklüklerin oluşmasına neden olan üç durum için gerçekleştirilmektedir. Bu durumlar sinüzoidal kaynaktan beslemeli nonlinear yük, nonsinüzoidal kaynaktan beslemeli lineer yük ve nonsinüzoidal kaynaktan beslemeli nonlinear yük olarak sıralanabilir. Her durum için reaktif güç kompanzasyonu şu şekilde yapılır.

5.1.1. Sinüzoidal Kaynak ve Nonlinear Yüke Sahip Devrelerde Güç Faktör Düzeltimi

Sinüzoidal besleme kaynağına sahip bir devrede nonlinear karakteristiğe sahip bir yük elemanı bulunması durumunda (Şekil 5.1) güç faktör düzeltimi aşağıdaki gibidir. Şekilden de görüldüğü gibi endüktif karaktere sahip olduğunu kabul edeceğimiz yükün kompanzasyonunu sağlamak için bir C kondansatörü nonlinear yükün uçlarına paralel olarak bağlanmıştır.



Şekil 5.1 Sinüzoidal kaynak ve nonlinear yüke sahip devrenin şönt kompanzasyonu

Kaynak geriliminin ani değeri

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

ve kondansatörün ani akım değeri

$$i_C = \frac{V_m}{X_C} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (5.2)$$

ile ifade edilir. Güç faktörü ise

$$\cos \psi = \frac{P_k}{S_k} \quad (5.3)$$

dir. Burada P_k , S_k sırasıyla kaynağın aktif ve görünür gücüdür. Buna göre

$$\cos \psi = \frac{I_{Y1} \cdot \cos \psi_{Y1}}{\sqrt{V^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2 + I_{Y1}^2 - 2 \cdot V \cdot I_{Y1} \cdot \omega \cdot C \cdot \sin \psi_{Y1} + \sum_n I_{Yn}^2}} \quad (5.4)$$

burada I_{Y1} yük akımının temel bileşenidir. $\cos \psi$ ifadesinin maksimum olması için kompanzasyonda kullanılacak C değeri şu şekilde hesaplanır.

$$\frac{d(\cos \psi)}{dC} = 0 \quad (5.5)$$

bu ifade çözüldüğünde güç faktörünü en büyük yapacak şönt kapasite değeri

$$C_k = \frac{I_{Y1} \cdot \sin \psi_{Y1}}{\omega \cdot V} \quad (5.6)$$

dir. Elde edilen bu değer, eşitlik (5.4)'te yerine konursa güç faktörünün en büyük değeri

$$\cos\psi_{\max} = \frac{I_{Y1} \cdot \cos\psi_{Y1}}{\sqrt{I_{Y1}^2 \cdot \cos^2\psi_{Y1} + \sum_2^n I_{Yn}^2}} \quad (5.7)$$

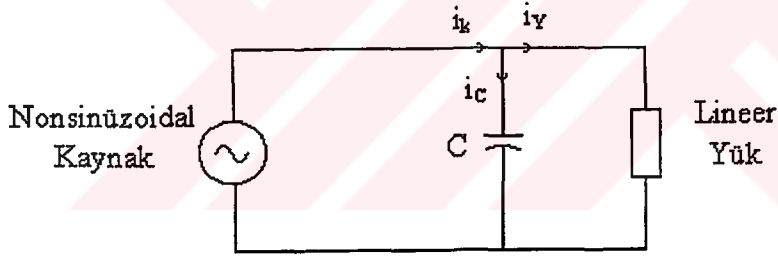
veya

$$\cos\psi_{\max} = \frac{P_k}{\sqrt{P_k^2 + D_k^2}} \quad (5.8)$$

olarak bulunmuş olur.

5.1.2. Nonsinüzoidal Kaynak ve Lineer Yüke Sahip Devrelerde Güç Faktör Düzeltimi

Herhangi bir devrede besleme kaynağının nonsinüzoidal olması ve bu kaynaktan beslenen endüktif yükün lineer karakteristiğe sahip olması durumunda (Şekil 5.2) güç faktör düzeltimi aşağıdaki şekilde yapılır.



Şekil 5.2 Nonsinüzoidal kaynak ve lineer yüke sahip devrenin şönt kompanzasyonu

Şekil 5.2’de bir C kapasitesi periyodik nonsinüzoidal besleme kaynağına paralel bağlanmıştır ve yükün de direnç ve endüktansdan oluştuğu kabul edilmiştir.

Bu devredeki nonsinüzoidal kaynak gerilimin ani değerinin ifadesi

$$v = \sqrt{2} \sum_1^n V_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \alpha_n) \quad (5.9)$$

şeklindedir. Bu gerilimin oluşturacağı yük akımı gerilimde bulunan bütün harmonikleri içerecektir. Yük akımının ifadesi de aşağıdaki gibidir.

$$i_Y = \sqrt{2} \cdot \sum_1^n I_{Yn} \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \alpha_n - \psi_{Yn}) \quad (5.10)$$

reaktif kompanzasyon için bağlanan kondansatörün ani akımı ise

$$i_C = \sqrt{2} \cdot \sum_1^n V_n \cdot n \cdot \omega \cdot C \cdot \sin\left(n \cdot \omega \cdot t + \alpha_n + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5.11)$$

şeklinde tanımlanabilir. Kaynağın görünür gücü

$$S_k^2 = V^2 \cdot I_k^2 = \left(\sum_1^n V_n^2\right) \cdot \left(\sum_1^n I_{kn}^2\right) \quad (5.12)$$

dir. Burada I_k kaynak akımıdır. Buna göre güç faktörü de

$$\cos\psi = \frac{P}{S} = \frac{\sum_1^n V_n \cdot I_{Yn} \cdot \cos\psi_{Yn}}{\sqrt{\left(\sum_1^n V_n^2\right) \cdot \left(\sum_1^n I_{kn}^2\right)}} \quad (5.13)$$

şeklinde bulunabilir. (5.13) eşitliğinin maksimum olabilmesi için

$$\frac{d(\cos\psi)}{dC} = 0 \quad (5.14)$$

ifadesi çözülmelidir. Bu işlem yapıldığında elde edilecek olan kapasite değeri

$$C = \frac{\sum_1^n V_n \cdot I_{Yn} \cdot n \cdot \sin\psi_{Yn}}{\omega \cdot \sum_1^n V_n^2 \cdot n^2} \quad (5.15)$$

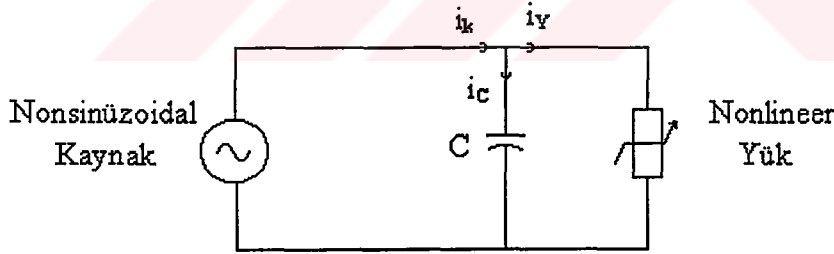
olarak bulunur. Bulunan bu değer kullanılarak maksimum güç faktörü aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\cos\psi_{\max} = \frac{P}{S_{\min}}$$

$$= \frac{\sum_1^n V_n \cdot I_{Yn} \cdot \cos\psi_{Yn}}{\sqrt{\left(\sum_1^n V_n^2\right) \cdot \left[\sum_1^n \left[\left(\frac{V_n \cdot n \cdot \sum_1^n V_n \cdot I_{Yn} \cdot n \cdot \sin\psi_{Yn}}{\sum_1^n V_n^2 \cdot n^2} - I_{Yn} \cdot \sin\psi_{Yn}\right)^2 + I_{Yn}^2 \cdot \cos^2\psi_{Yn}\right]\right]}} \quad (5.15)$$

5.1.3. Nonsinüzoidal Kaynak ve Nonlinear Yüke Sahip Devrelerde Güç Faktör Düzeltimi

Besleme kaynağı nonsinüzoidal olan devrede nonlinear karakteristiğe sahip bir endüktif yük elemanı bulunması durumunda (Şekil 5.3) aşağıdaki gibidir. Endüktif karaktere sahip yükün kompanzasyonunu sağlamak için bir C kondansatörü nonsinüzoidal gerilim kaynağına paralel olarak bağlanmıştır.



Şekil 5.3 Nonsinüzoidal kaynak ve nonlinear yüke sahip devrenin şönt kompanzasyonu

Devredeki nonsinüzoidal kaynak geriliminin ani değeri

$$v = \sqrt{2} \cdot \left[\sum_1^{n1} V_{n1} \cdot \sin(n_1 \cdot \omega \cdot t + \alpha_{n1}) + \sum_1^{n2} V_{n2} \cdot \sin(n_2 \cdot \omega \cdot t + \alpha_{n2}) \right] \quad (5.16)$$

Kondansatör akımının ani değeri

$$i_C = \sqrt{2} \left[\sum_1^{n1} V_{n1} \cdot n_1 \cdot w \cdot C \cdot \sin(n_1 \cdot w \cdot t + \alpha_{n1} + \frac{\pi}{2}) + \sum_1^{n2} V_{n2} \cdot n_2 \cdot w \cdot C \cdot \sin(n_2 \cdot w \cdot t + \alpha_{n2} + \frac{\pi}{2}) \right] \quad (5.17)$$

Yük akımının ani değeri

$$i_Y = \sqrt{2} \left[\sum_1^{n1} I_{Yn1} \cdot \sin(n_1 \cdot w \cdot t + \alpha_{n1} - \psi_{Yn1}) + \sum_1^{n3} I_{Yn3} \cdot \sin(n_3 \cdot w \cdot t + \alpha_{n3} - \psi_{Yn3}) \right] \quad (5.18)$$

olarak ifade edilebilir. Kaynağın görünür güç ifadesi

$$S_k^2 = V^2 \cdot I_k^2 \quad (5.19)$$

$$= \left(\sum_1^{n1} V_{n1}^2 + \sum_1^{n2} V_{n2}^2 \right) \cdot \left(\sum_1^{n1} (V_{n1}^2 \cdot n_1 \cdot w^2 \cdot C^2 + I_{Yn1}^2 - 2 \cdot V_{n1} \cdot n_1 \cdot w \cdot C \cdot \sin \psi_{Yn1}) + \sum_1^{n2} (V_{n2} \cdot n_2 \cdot w \cdot C) + \sum_1^{n3} I_{Yn3}^2 \right)$$

olarak elde edilir. Buna göre güç faktörü ifadesini yazarsak

$$\cos \psi = \frac{P_k}{S_k} \quad (5.20)$$

bu ifadenin maksimum olması için

$$\frac{d(\cos \psi)}{dC} = \frac{d(S_k)}{dC} = \frac{d(I_k)}{dC} = 0 \quad (5.21)$$

ifadesi çözümlenmelidir. Bu denklemin çözümüyle elde edilen C değeri

$$C = \frac{\sum_1^{n1} V_{n1} \cdot I_{Yn1} \cdot n_1 \cdot \sin \psi_{Yn1}}{w \cdot \sum_1^{n1} V_{n1}^2 \cdot n_1^2 \cdot \sum_1^{n2} V_{n2}^2 \cdot n_2^2} \quad (5.22)$$

şeklinde En büyük güç faktörü değerini elde etmek için bulduğumuz bu C değerini kullanırsak

$$\cos\psi_{\max} = \frac{\sum_{n1}^{n1} V_{n1} I_{n1} \cdot \cos\psi_{Yn1}}{S_{k\min}} = \frac{\sum_{n1}^{n1} V_{n1} I_{n1} \cdot \cos\psi_{Yn1}}{\sqrt{\left(\sum_{n1}^{n1} V_{n1}^2 + \sum_{n2}^{n2} V_{n2}^2\right) I_{k\min}^2}} \quad (5.23)$$

olarak bulunur.

5.2. A. E. Emanuel ve M. Yang'ın Harmonik Kompanzasyon Yaklaşımı

Nonlinear yükün güç kompanzasyonu ile ilgili analitik ifadeleri ve bu konudaki çeşitli durumlar için araştırmacıların görüşleri şöyledir.

Nonlinear yükler içeren büyük bir tüketici A, B barasından beslenmektedir (Şekil 5.4). Bir C kompanzatorü aynı baraya bağlıdır. Bara gerilimini dalga şekli bozulmuştur ve şu ifadeye sahiptir.

$$v = \sum \sqrt{2} V_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (5.24)$$

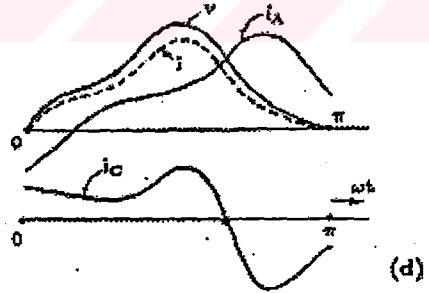
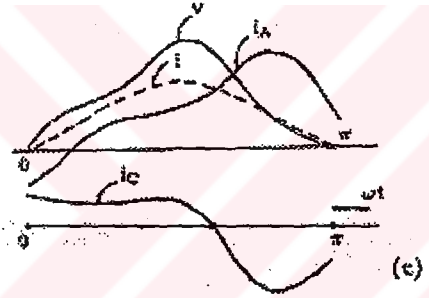
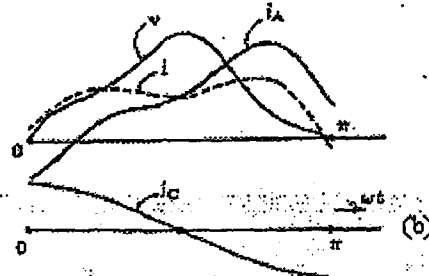
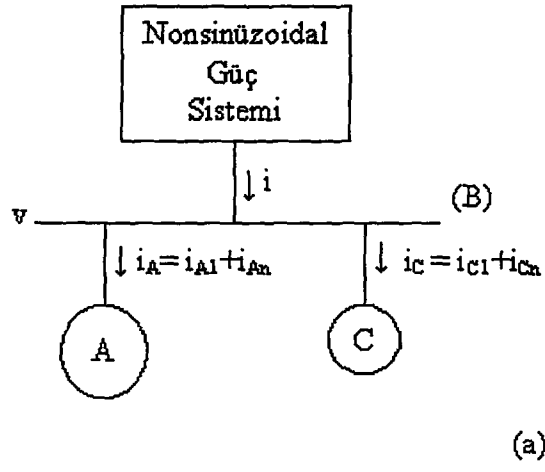
A yüküne gelen akım 60 Hz'lik bir temel bileşeni

$$i_{A1} = \sqrt{2} I_{A1} \sin(\omega t + \beta_1) \quad (5.25)$$

ve harmonikleri

$$i_{An} = \sqrt{2} I_{An} \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (5.26)$$

ile nonsinüzoidaldir. Kompanzator akımının ic dalga şekli ve büyüklüğü aşağıdaki stratejilere göre ayarlanabilir.



Şekil 5.4 Kompanzasyonun Basit Metodu

- a) Prensip
- b) Sadece 60 Hz. Reaktif güç kompanzasyonu
- c) Fazdaki sinüzoidal hat akımı ile temel gerilim
- d) Birim güç faktörü

a) 60 Hz. Reaktif güç kompanzasyonu (Şekil 5.4b). Bu durumda kompanzasyon akımı sinüzoidaldir

$$i_C = \left(\sqrt{2} I_{A1} \sin \theta_1 \right) \sin(\omega t + \alpha_1 + \pi / 2) \quad (5.27)$$

burada $\theta_1 = \alpha_1 - \beta_1$ ' dir.

Bununla beraber hat akımı i nonsinüzoidal kalacaktır. Bu metot, kompanzatörün TCR'ler gibi ek harmonikler üretmeyeceği ve şönt kapasitansların bazen yaptığı gibi rezonanslara neden olmayacağı için avantaja sahiptir.

b) Aynı fazda bir temel gerilimle sinüzoidal bir hat akımı sağlamak (Şekil 5.4c). Bu nedenle,

$$i_C = \left(\sqrt{2} I_{A1} \sin \theta_1 \right) \sin(\omega t + \alpha_1 + \pi / 2) - i_{An} \quad (5.28)$$

Güç şebekelerinde yeterli sayıda n t nonlineer yükler bu tür kompanzatörler ile donatılacaksa, harmonik güç akışı önemsiz seviyelere azaltılabilir.

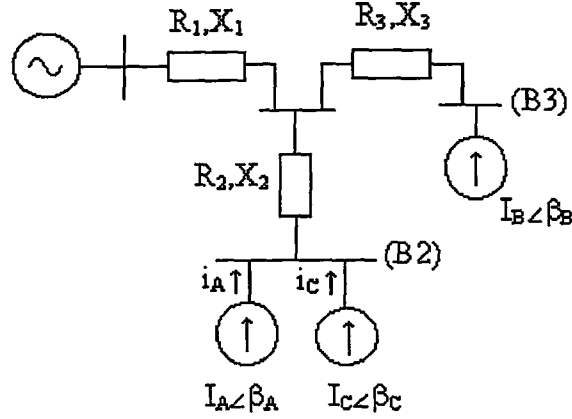
c) B barasında birim güç faktörü üretmek. Bu koşul, hat akımı i 'nin ve bara gerilimi v 'nin benzer dalga şekillerine sahip olmalarını gerektirir (Şekil 5.4d). Bunun anlamı ani akım i 'nin gerilim v ile orantısal olmasıdır.

$$i = Kv = K \sum_{n=1} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (5.29)$$

ve oran sabiti

$$K = \frac{P_A + P_C}{\sum_{n=1} V_n^2} \quad (5.30)$$

burada P_A ve P_C sırasıyla A yükü ve C kompanzatorünün aktif yükleridir. C kompanzatorü, $P_C=0$ olarak tasarlanabilen bir nonlinear yük olabilir veya bir generatör ya da yük olarak enerji dönüşüm işlemine dahil edilebilir.



Şekil 5.5 Temel Güç Şebekesi

d) Güç şebekesindeki güç kaybının minimizasyonu. Bu durum Şekil 5.5'in yardımı ile izah edilebilir. İki nonlinear yük B_2 ve B_3 baralarında yerleştirilmiştir. Harmonik akım kaynakları $I_A \angle \beta_A$, $I_B \angle \beta_B$ ile sistem dirençleri R_1 , R_2 ve R_3 değerleri bilinmektedir. Problem minimum sistem kayıplarını veren kompanzasyon harmonik akımı $I_C \angle \beta_C$ 'yi kararlaştırmaktır. Bu örnek belli bir harmonik mertebesi için verilmiştir, diğer bütün harmonik mertebeleri için aynıdır.

Verilen bir harmonik mertebesinde sistemin güç kaybı,

$$\Delta P = R_1 |\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C|^2 + R_2 |\bar{I}_A + \bar{I}_C|^2 + R_3 |\bar{I}_B|^2 \quad (5.31)$$

şekindedir. Bu fonksiyon incelendiğinde optimum kompanzasyon akım fazörünün genel olarak elde edilişi şu şekildedir. N baralı güç sisteminde harmonik gerilimleri şu eşitlikle tanzim edilir.

$$V_{\text{bara}} = Z_{\text{bara}} \cdot I_{\text{bara}}$$

Veya daha açık bir ifade ile,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_k \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & \dots & Z_{2N} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{k1} & \dots & Z_{kN} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{N1} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_k + I_C \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

burada V_{bara} , I_{bara} , Z_{bara} sırasıyla baranın gerilim vektörü, akım vektörü ve empedans matrisidir. Eşitlik (5.32), verilen bir harmonik veya h-derecesi için gerilim ve akım ilişkisi için kullanılır. Harmonik akım kaynakları, I_1, I_3, \dots, I_n nonlineer yükler tarafından üretilir. Kompanzator K barasına bağlıdır ve $I_C = I_C(\cos\beta_C + j.\sin\beta_C)$ akımını çeker.

n. dereceden harmonikten dolayı güç kaybı,

$$\Delta P = \frac{1}{2} \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq r}} \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq p}} r_{pr} |V_p - V_r|^2 / Z_{pr}^2 \quad (5.33)$$

burada V_p, V_r sırasıyla p ve r baralarındaki harmonik gerilim fazörleridir. p ve r arasındaki gerçek empedans $z_{pr} = r_{pr} + j x_{pr}$.

(5.32)'den şu sonuç çıkar,

$$V_p = Z_{pK} I_C + \sum_i Z_{pi} I_i \quad (5.34)$$

$Z_{pr} = R_{pr} + j X_{pr}$ ve $I_u = I_u(\cos\beta_u + j.\sin\beta_u)$ notasyonları kullanılarak,

$|V_p - V_r|^2$ ifadesi aşağıdaki yol ile uygun bir şekilde hesaplanabilir.

$$|V_p - V_r|^2 = (R_e V_p - R_e V_r)^2 + (I_p V_p - I_p V_r)^2 \quad (5.35)$$

burada

$$\begin{aligned}
R_e V_p &= \Gamma_{pC} I_C + \sigma_{pi} \\
I_p V_p &= F_{pC} I_C + \gamma_{pi} \\
\Gamma_{pC} &= R_{pK} \cos \beta_C - X_{pK} \sin \beta_C \\
F_{pC} &= R_{pK} \sin \beta_C + X_{pK} \cos \beta_C \\
\sigma_{pi} &= \sum_i (R_{pi} \cos \beta_i - X_{pi} \sin \beta_i) I_i \\
\gamma_{pi} &= \sum_i (R_{pi} \sin \beta_i + X_{pi} \cos \beta_i) I_i
\end{aligned} \tag{5.36}$$

Bu ifadeler (5.33)'de yerlerine konursa şu sonuç elde edilir,

$$\Delta P = \frac{1}{2} \sum_p \sum_r \left\{ \left[\sigma_{pi} - \sigma_{ri} + (\Gamma_{pC} - \Gamma_{rC}) I_C \right]^2 + \left[\gamma_{pi} - \gamma_{ri} + (F_{pC} - F_{rC}) I_C \right]^2 \right\} \frac{I_{pr}}{Z^2}$$

Minimum ΔP 'yi veren I_C optimum harmonik akımı $\frac{\partial \Delta P}{\partial \beta_C} = \frac{\partial \Delta P}{\partial I_C} = 0$

eşitliğinden bulunabilir.

Bu türevler alındığında ve basitleştirmeler yapıldığında,

$$I_C = (A^2 + B^2)^{1/2} / Z^2 \tag{5.37}$$

elde edilir.

Şekil 5.5'de gösterilen temel güç şebekesinde verilen bir harmonik için güç kaybı şu şekildedir.

$$\begin{aligned}
\Delta P &= R_1 (I_A \cos \beta_A + I_B \cos \beta_B + I_C \cos \beta_C)^2 + R_2 (I_A \sin \beta_A + I_B \sin \beta_B + I_C \sin \beta_C)^2 + R_1 (I_A \cos \beta_A + I_C \cos \beta_C)^2 \\
&+ R_2 (I_A \sin \beta_A + I_C \sin \beta_C)^2 + R_3 I_B^2
\end{aligned}$$

Minimum kayıp eşitliklerini yazarsak,

$$\partial \Delta P / \partial I_C = 0 = I_C (R_1 + R_2) + I_A (R_1 + R_2) \cos(\beta_C - \beta_A) - I_B R_1 \cos(\beta_C - \beta_A)$$

$$\partial \Delta P / \partial \beta_C = 0 = -[(R_1 + R_2) I_A \cos \beta_A + R_1 I_B \cos \beta_B] \tan \beta_C + (R_1 + R_2) I_A \sin \beta_A + R_1 I_B \sin \beta_B$$

Bu denklemlerden I_C ve β_C çekilirse,

$$I_C = - \left[I_A \cos(\beta_C - \beta_A) - \frac{R_1 I_B}{R_1 + R_2} \cos(\beta_C - \beta_B) \right] \quad (5.38)$$

$$\beta_C = \tan^{-1} \frac{(R_1 + R_2) I_A \sin \beta_A + R_1 I_B \sin \beta_B}{(R_1 + R_2) I_A \cos \beta_A + R_1 I_B \cos \beta_B} \quad (5.39)$$

Temel durum için $\beta_A = \beta_B$ iken $\beta_C = \beta_A$ ve optimum kompanzatör harmonik akımı, durum b'de gösterildiği gibi henüz $i_{Cn} = -i_{An}$ değildir fakat ideal olarak

$$I_{Cn} = -I_{An} - I_{Bn} R_1 / (R_1 + R_2)$$

dir. Böylece C kompanzatörü bir filtre gibi davranır; i_{An} harmonik akımının şebekede akışını durdurur ve R_1 direncinde güç kaybını azaltmak için i_{Bn} harmonik akımlarının bir kısmını azaltır.

e) Son tüketicide veya geniş bir tüketici barasında gerilim distorsiyonunun minimizasyonu Şekil 5.5'de gösterilen şebekenin analizi eğer harmonik fazör aşağıdaki efektif değer ve faz açısına sahip C kompanzatörü tarafından enjekte edilmişse, B_2 barasında bir sıfır harmonik gerilimi verir.

$$I_C = -\sigma_{2i} / (R_{12} \cos \beta_C - X_{12} \sin \beta_C) \quad (5.40)$$

$$\beta_C = \tan^{-1} \frac{R_{12} - X_{12} \delta_{2i}}{X_{12} + R_{12} \delta_{2i}} \quad (5.41)$$

burada

$$\sigma_{2i} = I_A (R_{12} \cos \beta_A - X_{12} \sin \beta_A) + I_B (R_1 \cos \beta_B - X_1 \sin \beta_B)$$

$$\delta_{2i} = \sigma_{2i} / [I_A(R_{12} \sin\beta_A - X_{12} \cos\beta_A) + I_B(R_1 \sin\beta_B - X_1 \cos\beta_B)]$$

$$\text{ve } R_{12} = R_1 + R_2 \quad ; \quad X_{12} = X_1 + X_2$$

Eğer şebeke empedansı $R_1/X_1 = R_2/X_2$ oranına sahip ise ve biz temel durum $\beta_A = \beta_B$ 'yi tekrar ifade edersek, sonuçlar $\beta_C = \beta_A$ ve

$$I_C = -I_A + I_B R_1 / (R_1 + R_2) \quad (5.42)$$

şeklinde olur. Bu, d durumunda verilen sonuçla kesinlikle aynıdır ve en çok destekleyici hadisedir ve bir şebekede geniş bir tüketici barasında minimum gerilim distorsiyonunun, sistemde minimum harmonik güç kaybını verebileceğini de gösterir.

5.3. Sharon'un Güç Faktörü Yaklaşımı

Yüksek kaliteli güç transferi, kaynağın güç kapasitesinden faydalanmanın derecesinin yüksekliği ile akım ve gerilim harmoniklerinin mertebelerinin düşük olması gibi koşullara bağlıdır. Nonsinüzoidal durumlardaki güç faktörünün mevcut tanımı, kötü kaliteli güç transfer durumu için güvenilir faktörleri belirlemede başarısız olduğundan yetersizdir. Ayrı ölçülebilir bileşenleri içeren yeni bir kalite faktörü alternatif olarak tavsiye edilebilir. Bu bileşenler temel güç faktörü, gerilim ve akım harmoniklerinin fonksiyonlarını içerir (D. Sharon, 1996).

Güç faktörü oranı, dünyanın her yerinde kaynağın güç kapasitesinden yararlanma derecesinin bir ölçümü olarak kabul edilmiştir. Düşük bir güç faktörü bu nedenle üretim ve dağıtım donanımından düşük bir faydalanmanın yanında hat kayıplarının da arttığına işaret edecektir. Bununla birlikte, nonsinüzoidal durumlarda, bu tür bir yorum özellikle konvansiyonel kapasitif güç faktörü kompanzasyonu kullanıldığında yanıltıcı olacaktır. Nonsinüzoidal durumda endüktif bir yükün güç faktörünü kompanze etmek için şönt kapasitörlerin bağlanması, görünür güç S'in yüksek değerleri ile sonuçlanan anormal yüksek kaynak akım ve gerilim seviyeleri gerektirir. Diğer taraftan, bu tür bir örnekteki harmonik akımlarının harmonik gerilimlerine göre çoğunlukla faz farkı olmasından dolayı, ortalama aktif güç P daha az tesir etmektedir.

Bir sonuç olarak, güç faktörü kompanzasyondan önceki değerinden daha düşük bir sayısal değere kolayca sahip olabilir. Normal olarak, kompanzasyondan önce kaynağın kapasitesi (VA olarak) ve yükün görünür gücü hemen hemen eşittir ve yukarıda ifade edilen anormal durum bir sistem başarısızlığı ile sonuçlanır. Bunu kaynaktan düşük bir yararlanma olarak yorumlamak yanıltıcı olacaktır. Esas problem akım ve gerilim harmoniklerinin anormal yüksek seviyelerinin üretimidir. Güç faktörünün ek bir dezavantajı da akım ve gerilim harmoniklerinin seviyesiyle ilişkili olmamasıdır.

Yukarıda anlatılan durumlardan dolayı nonsinüzoidal durumlarda, verilen kaynak kapasitesinden yararlanma derecesini tam olarak yansıtmadığından güç faktörü tanımının yetersiz olduğu söylenebilir. Daha fazla bir güvenilirlik için KF ile gösterilen bir güç transfer kalite faktörü önerilmiştir.

$$KF = k_1 \cdot \cos\phi_f + k_2 \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{2}}}{V_1} \right) + k_3 \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{2}}}{I_1} \right) \quad (5.43)$$

burada ϕ_f temel gerilimle akım arasındaki açıdır. V_1 , I_1 sırasıyla temel gerilim ve akımın efektif değerlerini göstermektedir. k_1 , k_2 , k_3 katsayıları toplamları bir olan ağırlık faktörleridir. Kalite faktörünün olası bir diğer tanımı da şu şekildedir.

$$KF = k_1 \cdot \cos\phi_f + k_2 \left(1 - \frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n}{V_1} \right) + k_3 \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{2}}}{I_1} \right) \quad (5.44)$$

k_1 ağırlık faktörü çıkarıldığında (5.43) ve (5.44) denklemlerindeki birinci terim sinüzoidal bir durumdaki güç faktörü olarak tanımlanır ve bu ifade temel güç faktörü TGF olarak gösterilir. İkinci ve üçüncü terimlerin değerleri, nonsinüzoidal gerilim ve akımdaki harmonik içerik arttıkça azalmaktadır.

$$\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}, \quad \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}, \quad \frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n}{V_1}$$

oranları sırasıyla gerilim distorsiyon faktörü, akım distorsiyon faktörü ve büyüklük faktörü olarak tanımlanır (T. H. Ortmeier, vd., 1985).

Eğer $\cos\phi_f$ şönt kapasitörleri veya herhangi bir var kompanzatörü vasıtası ile kompanze edilmişse ve harmonikler ideal olarak ortadan kaldırılmışsa (5.43) ve (5.44) kalite faktör ifadeleri birin maksimum değerine ulaşır. Ağırlık faktörleri k_1, k_2, k_3 kalite faktörünün tavsiye edilen değeri ile birlikte, farklı yönlerden güç kalitesinin ekonomik ve teknik önemini yansıtmak için optimal olarak seçilir. Uygulamada herhangi bir özel tavsiye, uygun bir ekonomik çalışma ile desteklenmelidir. Bu tür bir çalışmada esas önemli noktalar, bir taraftan reaktif güç kompanzatörlerinin ve harmonik yok etme tekniklerinin izafi maliyeti ve elde edilebilirliği, diğer taraftan kaynak kapasitesinden yararlanmanın derecesinin yüksekliği, sistem bileşenlerinin ömrünü uzatmak, bakımın azaltılması ve sistem kesintisinin minimum olması gibi yüksek kaliteli güç transferinden elde edilen ekonomik kazançlardır.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

İdeal bir güç sisteminde akım ve gerilimin dalga şeklinin tam sinüs şeklinde olması istenmektedir. Güç sistemine bağlanan nonlinear elemanlar sebebiyle sinüsoidal dalga şeklinde distorsiyonlar meydana gelmekte ve güç sisteminde harmonik bileşenlerin dolaşmasında neden olmaktadır. Harmoniklerin meydana çıkması çeşitli olumsuzluklarından dolayı istenen bir durum değildir. Nonlinear yüklerin ürettiği harmonikler işletme araçlarını ve tesisleri aşırı yükleyerek ek kayıplar ve aşırı ısınmalar meydana getirmekte ve elemanların işletme ömrünü kısaltmaktadır. Ayrıca olası rezonans olaylarına da sebep olarak işletme için zararlı bir durum meydana getirmektedir.

Sinüzoidal besleme ve lineer elemanlardan oluşan güç sistemlerinde güç faktör düzeltimi basit bir ölçme ile yapılır iken nonsinüzoidal kaynaktan beslenen veya nonlinear elemanlara sahip bir devrede güç kompanzasyonunda farklılıklar meydana gelmektedir. Nonsinüzoidal büyüklükleri içeren bir sistemde güç faktörü düzeltimi yapmak için harmonik bileşenlerin de hesaba katılması gerekmektedir.

Harmoniklerin mevcut olduğu bir sistemde devreye ilave edilen kapasite değerinin artırılması ile her zaman güç faktörünü arttırmak mümkün değildir. Yapılan incelemelerden ve analizden nonlinear devrelerde elde edilen sonuçlar şu şekilde verilebilir:

- Nonsinüzoidal beslemeli lineer devrelerde güç faktörü tam olarak 1 değerine çıkarılamamaktadır. Bunun nedeni besleme gerilimindeki harmoniklerin mertebeleridir. Eğer harmonik bileşenler, temel bileşene yakın değerler alıyorsa güç faktörünün değişim aralığı sınırlı olmaktadır.
- Sinüzoidal beslemeli nonlinear devrelerde güç faktörünün tam olarak 1 değerine çıkarmak sadece kompanzasyonun yapılması ile mümkün olmamaktadır. Bunun nedeni akım harmoniklerinin meydana getirdiği distorsiyon gücünün değerinin büyük olmasıdır. Böyle bir durumda filtre kullanmak yararlı olacaktır.
- Nonsinüzoidal beslemeli nonlinear yükler içeren devreler, nonlinear sistemlerin en genel durumudur. Böyle bir devrede gerilimdeki harmonikler ve akımdaki harmonikler

yüzünden sadece kapasite bağlamak sureti ile güç faktörünü 1 değerine çıkarılması zordur, mümkün olmadığı da söylenebilir.

- Yapılacak güç kompanzasyonu için mutlaka optimum kapasite değeri belirlenmelidir. Çünkü belli bir kapasite değerinden sonra güç faktörü artmayacaktır. Bu yüzden gereksiz yere kapasite kullanılacaktır bu da ekonomik değildir.
- Güç faktörü düzeltiminde sistemdeki aktif güç kaybının, reaktif güç kaybının minimize edilmesi mutlaka düşünülmesi gereken hususlardandır.
- Güç faktörü için istenen değerlerin üzerine çıkılmadığında filtre devreleri kullanılmalıdır.
- Güç faktörünün düzeltiminde mümkün olabilecek en büyük değeri elde ederken toplam harmonik distorsiyonundaki değişimlerin de gözönüne alınması gerekmektedir. Harmonik bileşenlerin analizi yapılarak belirlenecek toplam harmonik distorsiyonu değerinin mutlaka incelenmesi ve güç faktörü ile distorsiyon değeri arasında optimum çalışma şartlarının bulunması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Ametani, A., (1972), "Generalized Method of Harmonic Reduction in a.c-d.c Converter by Harmonic Current Injection", Proc. IEE, 116:1730-1734.

Arrillaga, J., Bradley, D.A. ve Bodger, P.S., (1985), Power System Harmonics, John Wiley&Sons New York.

Bayram, Mustafa, 1985. Elektroteknik M.

Bird, B.M., Marsh, J.F. ve Mc Lellan, P.R., (1969), "Harmonic Reduction in Multiplex Convertors by Triple-frequency Current Injection", Proc. IEE, 116:1730-1734

Bosela, T. R., Introduction to Electrical Power System Technology, Youngstown State University.

Clinker, C. R., (1914), "Harmonic Voltage and Currents in Y and Delta Connected Transformers, Trans, AIEE, Vol. 33: 723-334.

Dommel, H.V., Yan, A. ve Wei, S., (1986), "Harmonics from Transformer Saturation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRD-1, No.2: 209-215.

Duran, R.C. ve Ko, C.D., (1984) "Analyzing and Controlling Harmonic Distortion Distribution Feeders", International Conference on Harmonics in Power Systems, Worcester Polytechnic Institute, October 1984., 22-23

Emanuel, A. E. ve Yang M. (1993) "On The Harmonic Compensation In Nonsinusoidal Systems", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol 8. No.1, January, 1993

IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1993), "Effects of Harmonics on Equipment", Report of the IEEE Task Force on the Equipment, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No 1 April 1993

Gonzalez, D.A. ve 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: 504-511.

Grady, W.M ve Heydt, G.T., (1985), "Prediction of Power System Harmonics due to Gaseous Discharge Lighting", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104: 554-561

Herrick, P.R., (1980), "Mathematical Models for High Intensity Discharge Lamps", IEEE, Trans. on Industry Applications, Vol. IA-16: 648-654

Heydt, R.C., Grady, W.M., (1984), "Distributed Rectifier Loads in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS 103, No. 9: 2452-2459.

IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1983), "Power Systems: An overview", IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No 8: 2455-2460

Kimbark, E.W., (1971), "Direct Current Transmission", Vol. 1, Wiley-Interscience

Kocatepe, Celal, 1995. Sinüzoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu

Laskowski, E.L. ve Donoghue., (1981), "A Model of a Mercury Arc Lamp's Terminal Behavior", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-17: 419-426

Ludbrook, A., (1986), "Harmonic Filters for Notch Reduction", IEEE Transactions on Power Systems, 1043-1047.

Mc Call, J.C., (1985), "Harmonic Simulation of Cycloconverter Operation in a Mine Power System.", IAS Annual Meeting, 6-11 October 1985, Toronto.

Mc Granahan, M.F., (1981), "Digital Simulation of Distribution System Frequency-Response Characteristics", IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-100, No 3: 1362-1369

Mc Granahan, M.F., (1984), "Distribution Feeder Harmonic Study Methodology", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-103, No 12: 3663-3671.

Reid, W.E. ve Petrus, K.J., (1985), "Harmonics and Capacitors in The Power System", Pacific Coast Electrical Association Engineering & Operating Conference , CA, 19-20 March 1985.

Rissik, H.,(1935), "The Mercury Arc Current Converter", Pitman, London.

Sharon, D. (1996), "Power Factor Definitions and Power Transfer Quality in Nonsinusoidal Situations", IEEE Trans. On Ins. And Measurement, Vol45, No.3, June 1996.

Shepherd, W. ve Zand, P. "Energy Flow and Power Factor in Non sinusoidal Circuits", Cambridge University Press, 1979

Shipp, D.D., (1979), "Harmonics Analysis and Suppression for Electrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads", IEEE Trans on industrial Application, Vol. IA-15, No 5:453-458.

Sundberg, Y., (1980), "The Arc Furnace as a Load on the Network", ASEA Journal, Vol.49: 75-87

Szabados, B. ve Lee, J., (1981), "Harmonic Impedance Measurements on Transformers", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100:5020-5026.

Van, W.J., (1993), Power Quality, Power Electronics and Control, The European Power Electronics Association.

Vilcheck, W.S. ve Gonzalaz, D.A., (1985), "Guidelines for Applying Capacitors on Industrial Power Systems", Industrial Commercial Power Systems Conference, Denver, CO, May 1985.

Waymouth, J.F., (1971), "Electric Discharge Lamps", M.I.T. Press.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi : 14.07.1976

Doğum yeri : İstanbul

Lise : 1990-1993 Eyüp Lisesi

Lisans : 1993-1998 İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans : 1998-2000 Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Müh. Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurum 1999- Araştırma Görevlisi
YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Mühendisliği Bölümü
Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı

