

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

139672

**NONLİNEER YÜKLERİN TRANSFORMATÖRLER
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

139672

Elektrik Müh. Oktay ARIKAN

F.B.E Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Celal KOCATEPE

Celal Kocatepe

Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR

Hüseyin Çakır

Yord. Doç. Dr. Deniz YILDIRIM

D. Yıldırım

İSTANBUL, 2003

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Harmonik Büyüklüklerin Temel tanım ve Kavramları.....	1
1.1.1 Güç Sistem Harmoniklerinin Tanımı.....	1
1.1.2 Nonsinüsoidal Durumda Devre Büyüklükleri.....	3
1.1.3 Harmoniklerin Faz Dizisi (Sequence) Bileşenleri.....	5
1.1.4 Toplam Harmonik Distorsiyonu.....	6
1.1.5 Toplam Talep Distorsiyonu.....	7
1.1.6 Transformatör K-faktörü.....	8
1.1.7 Harmonik Kayıp Faktörü.....	8
1.1.8 Distorsiyon Güç Faktörü.....	9
1.2 Fourier Serilerinin Analizi.....	10
1.2.1 Fourier Serisi.....	10
1.2.2 Fourier Analizi.....	12
1.2.3 Fourier Dönüşümü.....	12
1.2.4 Ayrık Fourier Dönüşümü.....	13
2. HARMONİKLERİN KAYNAKLARI VE ETKİLERİ.....	14
2.1 Harmoniklerin Oluşumuna Neden Olan Elemanlar.....	14
2.1.1 Transformatörler.....	15
2.1.2 Konverterler.....	15
2.1.3 Generatörler.....	16
2.1.4 Gaz Deşarjı ile Aydınlatma.....	16
2.1.5 Ark Fırınları.....	16
2.2 Harmoniklerin Enerji Sistemlerinde Meydana Getirdiği Etkiler.....	17
2.2.1 Harmoniklerin Rezonans Olayları Üzerindeki Etkileri.....	17
2.2.1.1 Paralel Rezonans.....	18
2.2.1.2 Seri Rezonans.....	19
2.2.2 Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri.....	20
2.2.3 Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri.....	20
2.2.4 Harmoniklerin Anahtarlama Elemanları Üzerindeki Etkileri.....	21
2.2.5 Harmoniklerin Röleler Üzerindeki Etkileri.....	21
2.2.6 Harmoniklerin Ölçü Aletleri Üzerindeki Etkileri.....	21

2.2.7	Harmoniklerin Döner Makinalar Üzerindeki Etkileri	21
2.2.8	Harmoniklerin Direnç Üzerindeki Etkileri.....	22
2.2.9	Harmoniklerin Reaktans Üzerindeki Etkileri.....	23
2.3	Harmoniklerin Enerji Sistemleri Üzerindeki Genel Olarak Etkileri	23
3.	NONLİNEER YÜKLERİN TRANSFORMATÖRLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....	25
3.1	Harmoniklerin Transformatördeki Kayıplara Etkileri	25
3.2	Demir Kayıpları	26
3.2.1	Transformatörde Meydana Gelen Histerizis Kayıpları	26
3.2.2	Transformatörlerde Meydana Gelen Fuko Akımı Kayıpları.....	27
4.	K-FAKTÖRLÜ TRANSFORMATÖRLER	30
4.1	Tanım	30
4.2	Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri	32
4.3	K-Faktörü	35
4.3.1	K-Faktörü'nün Hesaplanması	36
4.3.2	Hesaplama Yoluyla P_{EC-R} 'nin Belirlenmesi	38
4.3.2.1	Ulaşılabilir Onaylanmış Test Raporları Kullanarak Transformatör Kabiliyet Eşdeğerinin Hesaplanması	38
4.3.2.2	Hesaplamalar.....	39
4.3.3	Tablolar Kullanılarak P_{EC-R} 'nin Belirlenmesi	40
4.4	K-Faktörü'nü Hesaplama Yöntemleri.....	41
4.4.1	UL (Underwriter's Laboratories) Yöntemi	41
4.4.2	Normlaştırılmış Yöntem	41
4.4.3	Her İki Yöntem Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar	42
4.4.3.1	UL Yöntemi İle Yapılan Hesaplama.....	42
4.4.3.2	Normlaştırılmış Yöntem İle Yapılan Hesaplama.....	43
5.	SAYISAL UYGULAMA	44
5.1	Sayısal Uygulama 1	44
5.2	Sayısal Uygulama 2	47
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	51
	KAYNAKLAR	53
	ÖZGEÇMİŞ.....	55

SİMGE LİSTESİ

B	Magnetik endüksiyon
C	Kapasite
c_h	Fourier serisi h. bileşen katsayısı
D	Distorsiyon gücü
f	Frekans
f_1	Temel frekans
f_h	h. harmonik frekansı
f_p	Paralel rezonans frekansı
f_r	Rezonans frekansı
f_s	Seri rezonans frekansı
G_{Fe}	Demir çekirdeğin kg ağırlığı
h	Harmonik bileşen (harmonik mertebesi)
h_r	Rezonans frekansının harmonik mertebesi
HD_1	Akım için tekil harmonik distorsiyonu
HD_v	Gerilim için tekil harmonik distorsiyonu
I	Yük akının efektif değeri
I (pu)	Yük akının efektif değerinin pu değeri
I_h	Harmonik bileşen yük akımı
I_h (pu)	Harmonik bileşen yük akımının pu değeri
I_{rms}	Akımın efektif değeri
I_{1-R}	Anma koşullarında ve yüklü durumdaki sinüs dalgalı hat akımının H.V. rms değeri
I_{2-R}	Anma koşullarında ve yüklü durumdaki sinüs dalgalı hat akımının L.V. rms değeri
L	Endüktans
P	Aktif güç
P_{EC}	Sargı fuko akımı kayıpları
P_{EC-R}	Transformatör sargılarında anma koşulları altındaki fuko akımı kaybı
P_{EC-R} (pu)	Anma koşulları altındaki sargılardaki fuko akımı kaybının pu değeri
P_F	Fuko akımı kayıpları
P_{Fe}	Demir kayıpları
P_H	Histerizis kayıpları
P_{LL}	Toplam yük kaybı
P_{LL} (pu)	Toplam yük kaybının pu değeri (Yük kaybı yoğunluğunun pu değeri)
P_{OSL}	Bağlantı noktaları, çekirdek ve yapısal elemanlardaki diğer kaçak kayıplar
P_{OSL-R} (pu)	Anma koşulları altındaki diğer kaçak kayıpların pu değeri
p	Konverterin darbe sayısı
Q	Reaktif güç
R	Direnç
R_1	İki H.V. terminali arasında ölçülen DC direnç (ohm)
R_2	İki L.V. terminali arasında ölçülen DC direnç (ohm)
S	Kompleks güç
S_c	Kapasitenin nominal gücü
S_k	Şebekenin kısa devre gücü
S_1	Omik yükün gücü
T	Periyot
THD_1	Akım için toplam harmonik distorsiyonu
THD_v	Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu

X	Reaktans
X_C	Kapasitif reaktans
X_L	Endüktif reaktans
V	Gerilim genliği
V_{rms}	Gerilimin efektif değeri
Z_t	Transformatörün pu empedansı
δ_h	h. harmonik akım bileşeninin faz açısı
η	Demir cinsine bağlı sabit
θ_h	h. harmonik gerilim bileşeninin faz açısı
σ_F	Demir cinsine bağlı malzeme sabiti
σ_H	Demir cinsine bağlı malzeme sabiti
ω	Açısal frekans
ω_0	Doğal frekans veya açısal frekans (temel frekans)



KISALTMALAR

DC	Direct Current
DFT	Discrete Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
HD	Harmonic Distortion
H.V.	High Voltage
HVDC	High Voltage Direct Current
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
L.V.	Low Voltage
pf	Power Factor
rms	Efektif değer
Std	Standart
TDD	Total Demand Distortion
THD	Total Harmonic Distortion
UL	United Laboratories (Underwriter's Laboratories)



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Temel bileşen ve üçüncü harmonik bileşenin değişimi	2
Şekil 3.1	1.,3.,5. ve 7. harmonik bileşenlere ait harmonik spektrumu	28
Şekil 4.1	K-faktörü ve transformatör anma değerinin hesaplanmasına ait akış diyagramı	37
Şekil 4.2	Fluoresan aydınlatma yükü için akım dalga şekli ve harmonik spektrumu....	37
Şekil 5.1	K-Faktörü hesaplanan örnek sistem	44



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1	Dengeli üç fazlı güç sisteminde harmonik faz sequence bileşenleri	6
Çizelge 4.1	K-Faktörünün hesabına ilişkin çizelge.....	40
Çizelge 4.2	Transformatör anma değeri düşümü hesapları için kullanılan P_{EC-R} için tipik değerler.....	41
Çizelge 4.3	UL yöntemi ile K-faktörü hesabını gösteren çizelge	42
Çizelge 4.4	Normlaştırılmış yöntem ile K-faktörü hesabını gösteren çizelge	43
Çizelge 4.5	Kuru-tip transformatörler için ulaşılabilir K-faktörlü transformatörler	43
Çizelge 5.1	Örnek sistem için K-faktörünün hesabı.....	45
Çizelge 5.2	Lineer ve nonlinear yüklü durum için transformatör değerleri.....	46
Çizelge 5.3	Yük akımına ait harmonik bileşenler	47
Çizelge 5.4	$P_{LL}(pu)$ 'nın hesaplanması.....	48
Çizelge 5.5	Lineer ve nonlinear durumda $I_{max}(pu)$ ve transformatör değerleri	50

ÖNSÖZ

Kalitenin ve verimliliğin önem kazandığı günümüzde, elektrik enerjisinin kalitesinin belirlenmesinde nonsinüsoidal büyüklükler etkin bir rol almaktadır. Nonsinüsoidal büyüklüklerin güç sistemine ve elemanlarına olumsuz etkilerinin bilinmesi ve bu etkilerin giderilmesi için yapılan çalışmalar her geçen gün daha büyük bir önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, harmoniklerin transformatörler üzerindeki olumsuz etkileri incelenerek, bu etkilere karşı çözüm olarak sunulan K-faktör'lü transformatörlerin özellikleri ve buna ait hesap yöntemleri irdelenmiştir.

Konuyla ilgili olarak yapılan sayısal uygulamalar ile K-faktörü değerinin nasıl hesaplanacağı ve bu değere göre hangi tip transformatör seçileceği ortaya konmuştur.

Çalışmalarım sırasında yakın ilgi ve desteklerini gördüğüm, çalışmalarımı yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Celal KOCATEPE'ye, beni yetiştiren ve destekleyen fedakar aileme teşekkürü borç bilirim.



ÖZET

Genel olarak harmonikler, sistemdeki cihazların ve yüklerin nonlinear işletme karakteristiklerinden dolayı ortaya çıkarlar.

Harmoniklerin elektrik enerji sistemleri üzerinde birçok olumsuz etkileri vardır. Bu etkiler, ek kayıplar, rezonans olayları, yalıtım zayıflaması, bara gerilimlerindeki harmonik distorsiyonu, kapasitörlerdeki arızalar, elektrik makinalarındaki aşırı ısınmalar ve ölçme hataları olarak dile getirilebilir.

Bu tez çalışmasında, nonlinear yüklerin transformatörler üzerindeki etkileri incelenmiş ve son yıllarda bu etkilere karşı çözüm olarak sunulan K-faktör'lü transformatörler ile K-faktörü değeri hakkında geniş bilgi verilmiştir. K-faktörlü transformatörlerin ve K-faktörünün harmoniklerin olumsuz etkilerine karşı ne şekilde çözüm olduğu açıklanmıştır. K-faktörünün hesaplanması ve K-faktör'lü transformatör seçimiyle ilgili sayısal uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Harmonikler, K-faktörü, transformatörler.

ABSTRACT

Harmonics are in general produced by nonlinear characteristics of loads and system components.

Harmonics have a number of negative impacts on electric power networks. These are additional losses, resonant events, insulation stresses, voltage distortion at bus bars, capacitor faults, excessive temperature increase in electric machines and measuring errors.

In this dissertation, the effects of nonlinear loads are studied. As one of the latest solution techniques to aforementioned harmonic problems, K-rated transformers and calculation of K-factor are given in detail. Furthermore, it is explained how K-factor and K-rated transformers are used against harmonic problems. Finally, numerical examples related to calculation of K-factor and selection of K-rated transformers carried out.

Keywords: Harmonics, K-factor, transformers.



BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Klasik analizlerde güç sistemi, sabit genlik ve frekansa sahip sinüsoidal gerilim kaynakları tarafından beslenen ve pasif elemanlardan meydana gelen lineer bir sistem olarak modellenmektedir. Ancak sistemde nonlineer elemanların bulunması bu modellemeyi değiştirecektir. Örneğin, günümüzde güç elektroniği elemanlarının yaygın bir biçimde kullanımıyla, harmonik akımları önemli seviyede güç sistemlerine enjekte edilmektedir. Sistemde dolaşan harmonik akımlar, sadece yüklerin dalga şekillerinde bozucu etkiler oluşturmayıp aynı zamanda güç sistem elemanları üzerinde de olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Bunun sonucu olarak her geçen gün harmonik çalışmalarına olan ilgi artış göstermektedir.

Harmoniklerin seviyesini ve değerlerini belirlemeye yönelik matematiksel analiz “Fourier Analizi” olarak tanımlanmaktadır. Böylece harmonik bileşenler bu analiz sonucu belirlenen Fourier serisi elemanları olarak ifade edilirler.

Harmonikler, enerji sisteminde akım ve/veya gerilim dalga şekillerinin sinüsoidalden uzaklaşması olarak bilinir. Bu durumda yapılacak incelemelerde harmonik büyüklükler de göz önüne alınmalıdır. Elektrik devrelerindeki harmonik büyüklüklerle ilgili teori, temel frekans için tanımlanan büyüklüklerden farklı olarak tanımlanması gerekir.

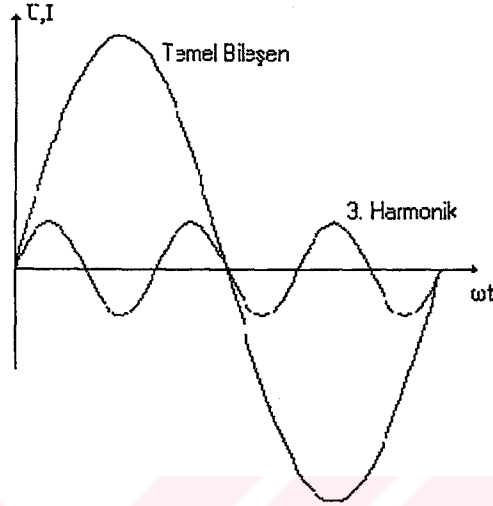
1.1 Harmonik Büyüklüklerin Temel Tanım ve Kavramları

Genellikle, güç sistem çalışmaları için tanımlanan elektrik devre büyüklükleri, sinüsoidal sürekli hal işletim sistemleri için tanımlanmıştır. Ancak, nonlineer eleman ve nonsinüsoidal kaynak nedeniyle harmonik bileşenler söz konusu olduğu zaman, devredeki elektrik büyüklüklerinin yeniden tanımlanması gerekir.

1.1.1 Güç Sistem Harmoniklerinin Tanımı

Bilindiği gibi güç sistemlerindeki sinüsoidal bir dalga temel frekansa sahip (temel bileşeni) olan bir dalgadır. Bir frekansa sahip nonsinüsoidal periyodik bir dalga'nın sinüsoidal

bileşenleri, temel frekansın tam katıdır. Bu yüzden, f_1 temel frekanslı büyüklüğün, h . harmonik mertebesinin frekansı $h.f_1$ 'dir. Harmonikli (nonsinüsoidal) büyüklükler farklı genlikli ve frekanslı gerilimler ve akımların toplamından oluşmuş bozuk bir sinüs dalgası olarak tanımlanır.



Şekil 1.1: Temel bileşen ve üçüncü harmonik bileşenin değişimi

Herhangi bir genliğe ve frekansa sahip sinüsoidal dalgaların toplamı ile bozulmuş bir periyodik dalga şekli oluşur. Yine, herhangi bozulmuş periyodik dalga şekli bir temel dalga ve harmoniklerin bir kümesi olarak da ayrıştırılabilir. Bu ayrıştırma işlemi “Fourier analizi” olarak adlandırılır. Böylece, güç sistemlerinde nonlinear elemanların etkileri sistematik bir biçimde analiz edilebilir.

Bir güç sistemindeki elemanların ve yüklerin çoğu, hem pozitif hem de negatif yarı dalgasında aynı şekilde cevap verir. Bu nedenle devre elemanlarının üzerindeki gerilimler ve akımlar yarı dalga simetrisine sahip olurlar. Gerilim ve akımlarına ait çift mertebeli harmonik bileşenler bu simetri nedeniyle karakterize edilemezler. Aynı zamanda üç ve üçün katı olan harmonikler, dengeli üç fazlı sistemlerde yıldız noktası topraksız veya üçgen transformatör bağlantısıyla bloke edilebilirler. Bu nedenle, harmonik analizlerinde çift harmonik bileşenleri, üç ve üçün katları olan harmonik bileşenleri ihmal edilirler. Genellikle, harmonik analizi için, temel frekansın 50. katına kadar frekanslarla ilgilenilmektedir.

Güç sistemlerindeki harmoniklerin ana kaynaklarından biri statik güç konverterleridir. İdeal işletim şartları altında, p-darbeleri hat komutasyonlu bir konvertere ait h . harmonik akım harmonikleri, $I_h = I_1/h$ genliğine sahip olup harmonik bileşenleri $h = pn \pm 1$ olacaktır. ($n = 1$,

2, ...), (p, 6'nın tam katlarıdır) olacaktır. Konvertere uygulanan giriş gerilimleri dengesizse veya fazlar arasındaki komutasyon reaktansları eşit değil veya konverterin ateşleme darbeleri eşit değilse sistemde karakterize edilen harmoniklere ilave olarak karakterize edilemeyen harmonikler eklenecektir. Eklenen bu harmonik bileşenlerin frekansları ise temel güç frekansının tam katları olmayacaktır.

Temel güç frekansının tam katı olmayan frekansa sahip harmonikler “ara harmonikler” olarak adlandırılır, ara harmoniklerin ana kaynakları güç elektroniği elemanları içeren elemanlardır. Ara harmoniklerin özel bir alt kümesi de “alt-harmonikler” olarak adlandırılır. Bazı nonlinear yükler bu alt harmoniklerini içerirler.

1.1.2 Nonsinüsoidal Durumda Devre Büyüklükleri

Enerji sisteminde nonsinüsoidal dalgaların olması halinde bir başka deyişle sistemde harmonik bileşenler varolduğunda ani gerilim ve akım büyüklükleri,

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \quad (1.1)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_0 t + \delta_h) \quad (1.2)$$

olarak Fourier Serileri ile gösterilebilir. Burada DC terimler basitleştirme amacıyla ihmal edilmiştir. V_h ve I_h sırasıyla, h. harmonik bileşen için gerilim ve akımın efektif değerleridir.

Ani güç

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (1.3)$$

olarak ifade edilir.

$p(t)$ 'nin T periyodunca integrali,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (1.4)$$

olarak ortalama (aktif) gücü verecektir. Eğer (1.1) ve (1.2) eşitlikleri (1.3)'te yerine yazılırsa ve ortogonal özellikten faydalanılırsa,

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad (1.5)$$

elde edilir. Burada P_h , h. harmoniğe ait aktif gücü, θ_h , h. harmonik gerilim bileşeninin faz açısını, δ_h ise h. harmonik akım bileşeninin faz açısını göstermektedir. Denklemden de görüldüğü üzere farklı frekanslardaki akım ve gerilimlerin çarpımlarına ait bir terim olmaması nedeniyle farklı frekanslı akım ve gerilimlerin ortalama güce herhangi bir katkısı yoktur. Harmonikler tarafından üretilen ortalama güç genellikle, temel ortalama güce oranla daha küçüktür. Gerilim ve akımın efektif değerleri ise,

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (1.6)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (1.7)$$

olarak bulunur. Kompleks güç

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (1.8)$$

olur. Kompleks gücün yaygın bir şekilde kabul edilen tanımı şu biçimdedir

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (1.9)$$

burada D, distorsiyon gücüdür. Reaktif güç (Q) tanımı

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \delta_h) \quad (1.10)$$

olarak verilir. (1.1) ve (1.2) eşitliklerindeki farklı frekans bileşenlerinin gerilimlerinin ve akımlarının çarpımına karşılık gelen voltamper (VA) distorsiyonu olarak tanımlanır.

Harmonikler olmadığı zaman kompleks güç (1.8 nolu eşitlik), temel frekanstaki alışılagelmiş kompleks güç ifadesi olan $V_1 I_1$ 'e eşittir. Sinüsoidal şartlar altında, ortalama (aktif güç) ve reaktif güç ile kompleks güç arasında bilinen

$$(V_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (1.11)$$

eşitliği geçerlidir ve burada $Q_1 = V_1 I_1 \sin(\theta_1 - \delta_1)$ dir. Bu eşitlik, $h = 1$ için tanımlanan temel reaktif güçtür.

Araştırmacılar ve bilim adamları arasında distorsiyon gücü ve reaktif gücün fiziksel anlamlarında ve tanımlamalarında günümüze kadar bir ortak ifade tanımlanması mümkün olmamıştır (Emanuel, 1990; Emanuel, 1993).

Güç faktörü kavramı, AC güç sisteminden çekilen akımın ne kadar verimlilikle bir yük tarafından kullanıldığını ölçmede önemli olan bir kavramdır. Sinüsoidal veya sinüsoidal olmayan tüm durumlarda güç faktörü

$$pf = \frac{P}{S} \quad (1.12)$$

olarak tanımlanır. Burada aktif güç (P), eşitlik (1.5)'te gösterildiği gibi temel frekans bileşeni ve diğer harmonik bileşenlerinin toplanmasıyla elde edilir.

1.1.3 Harmoniklerin Faz Dizisi (Sequence) Bileşenleri

Nonsinüsoidal durumlarda üç fazlı dengeli bir sistem için, her bir fazın (a,b,c) harmonik geriliminin h. bileşeni

$$v_{ah}(t) = \sqrt{2}V_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \quad (1.13)$$

$$v_{bh}(t) = \sqrt{2}V_h \sin(h\omega_0 t - \frac{2h\pi}{3} + \theta_h) \quad (1.14)$$

$$v_{ch}(t) = \sqrt{2}V_h \sin(h\omega_0 t + \frac{2h\pi}{3} + \theta_h) \quad (1.15)$$

olarak ifade edilir. Buna bağlı olarak, dengeli üç fazlı güç sisteminde harmonik faz sırası modeli Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : Dengeli üç fazlı güç sisteminde harmonik faz dizisi (sequence) bileşenleri

Harmonik Derecesi	Faz Dizisi (Sequence) Bileşeni
1	+
2	-
3	0
4	+
5	-
6	0

Çizelge 1.1’den de görüleceği gibi üç ve üçün katları olan harmonik dereceleri tamamıyla sıfır sequence bileşenidir. Yukarıdaki basit faz sequence bileşen modeli dengesiz sistemler için ele alınamaz, çünkü her bir harmonik mertebesi üç farklı sequence bileşenini de içerecektir.

(1.1) - (1.7) eşitliklerindeki tanımlamalar, üç fazlı dengeli sistemler için uygundur. Dengesiz durumlarda uygulanacak güç ifadelerinden bazıları, “IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations”a ait makalede 1996 yılında verilmiştir.

1.1.4 Toplam Harmonik Distorsiyonu

Harmoniklerin seviyesinin belirlenmesinde yaygın bir ölçüt olarak kullanılan toplam harmonik distorsiyonu

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (1.16)$$

$$\%THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (1.17)$$

ifadeleri ile gerilim ve akım için tanımlanmaktadır. Burada THD, harmonik bileşenlerin efektif değerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır. Bu değer, tam bir sinüs dalga şeklinden, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin uzaklaşmasını belirlemek için kullanılır. Sinüsoidal bir dalga şekli için toplam harmonik distorsiyonu sıfırdır. Benzer şekilde, h. harmonik mertebesindeki gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonları sırasıyla,

$$HD_v = \frac{V_h}{V_1} \quad (1.18)$$

$$HD_I = \frac{I_h}{I_1} \quad (1.19)$$

olarak tanımlanır.

1.1.5 Toplam Talep Distorsiyonu

Bu kavram IEEE ‘Standart 519’ da yer almaktadır. Bu standartta toplam talep distorsiyonu (TDD),

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (1.20)$$

olarak tanımlanır. Eşitlikteki I_L , önceki 12 ay için maksimum taleplerin ortalama akımı olarak temel frekans için maksimum yük akımıdır (15 veya 30 dakika boyunca).

1.1.6 Transformatör K-faktörü

Transformatörlerin lineer olmayan yükleri beslemesi sonucunda transformatör üzerinden akan yük akımında, harmonik bileşenler bulunacaktır. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda kuru tip transformatörlerin nonsinüoidal akımlar çeken yükleri besleyebilme kapasitesinin bir ölçütü olarak kabul edilen “K-Faktörü” tanımlanmıştır (Kerszenbaum vd., 1991; Linden, 1996). K-Faktörü anma gerilimi veya anma gücü gibi transformatörler için imalatçısı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüğüdür. K-faktörü anma gücü 500 kVA’nın altındaki kuru tip transformatörler için tanımlanmıştır.

Transformatör K-faktörü, harmonik akımlar mevcut olduğu zaman standart transformatörlerin yüklenme kapasitesindeki azalma miktarlarını hesaplamak için kullanılan bir kavramdır (Kennedy, 1998). Bu standartta K-faktörü

$$K = \frac{\sum (I_h \cdot h)^2}{\sum (I_h)^2} \quad (1.21)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada h, harmonik mertebesi ve I_h bileşen yük akımına karşılık gelir.

K-oranlı transformatör, standart transformatörlerden daha çok gerilim distorsiyonuna dayanacak biçimde yapılır. K-faktörü gerçekte, transformatörler tarafından meydana getirilen aşırı ısınmayla ilgili olup, nonlineer yükler için tasarım ve yapım aşamasında göz önünde bulundurulur. (Yeni veya yenilenen güç kaynak cihazları için bir şartname olarak kullanılmaktadır).

1.1.7 Harmonik Kayıp Faktörü

Literatürde verilmiş olan K faktöründen farklı olarak transformatörlerin kayıp oranını belirtmek amacıyla tanımlanmış diğer bir faktör olan “Harmonik Kayıp Faktörü” de verilmektedir. Harmonik kayıp faktörü (F_{HL}) IEEE C57.110/D.7 – February 1998’de daha önce K faktörü ile aynı ifade ile tanımlanmıştır. Bu standartta K faktörü

$$K - \text{faktör} = \left[\frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2}{I_R^2} \right] F_{HL} \quad (1.22)$$

ifadesi ile de tanımlanmaktadır (Yıldırım, 1999). Çalışmamızda, literatürde geniş kabul bulan 1.21 eşitliği kullanılmak suretiyle analizler gerçekleştirilmiştir.

1.1.8 Distorsiyon Güç Faktörü

Harmonikli gerilim ve akımın efektif değeri

$$V_{rms} = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100} \right)^2} \quad (1.23)$$

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2} \quad (1.24)$$

eşitlikleri ile verilebilir (Grady ve Gilleskie, 1993). Bu eşitlikler, (1.6) ve (1.7) eşitliklerinin (1.16) ve (1.17) eşitliklerinde yerine yazılması sonucu elde edilmektedir. Aynı şekilde (1.12) eşitliğindeki toplam güç faktörü

$$pf_{\text{toplam}} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2}} \quad (1.25)$$

olarak belirlenir. Gerilime ait toplam harmonik distorsiyonunun genelde %10'dan küçük olması nedeniyle eşitliğin son hali

$$pf_{\text{toplam}} = \frac{P_1}{V_1 I_1} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2}} = \cos(\theta_1 - \delta_1) \cdot pf_{\text{dist}} \quad (1.26)$$

olarak ifade edilebilir. (1.26) eşitliğinde ilk terim, $\cos(\theta_1 - \delta_1)$, kayma güç faktörü ve ikinci terim, pf_{dist} , distorsiyon güç faktörü olarak bilinir. Kayma güç faktörü, hiçbir zaman 1'den büyük değildir (Chang, 1998). Bunun sonucunda da

$$pf_{\text{toplam}} \leq pf_{\text{dist}} \quad (1.27)$$

olacaktır. Görüldüğü gibi, yüksek akım distorsiyonlu tek faz nonlineer yükleri için, toplam güç faktörü daha da düşmektedir

1.2 Fourier Serileri ve Analizi

Fourier serilerinin teorisi ilk olarak, Fransız fizikçi ve matematikçisi Joseph Fourier tarafından 1882'de yayımlanan 'Analytic Theory of Heat' isimli makalesinde tanıtılmıştır. Teori, trigonometrik serilerin belirli tiplerinde rastgele fonksiyonların açılımlarını içermektedir. Temel frekans bileşeni ve bu temel frekansın tam katlarından oluşan harmonik bileşenlerinin toplamını, bir zaman aralığında herhangi bir periyodik fonksiyon olarak göstermek, bu teori sayesinde mümkün olmaktadır. Bu seriler, zaman ve frekans domeninde fonksiyonlar arasında ilişki kurmaktadır.

1.2.1 Fourier serisi

Günümüzde Fourier serileri, mühendisler ve bilim adamlarının yaptığı analizlerde uygulama imkanı bulan matematiksel bir ifadedir.

Periyodik bir fonksiyon

$$f(t) = f(t + T) \quad (1.28)$$

şartını gerçekleştirecek olup bütün t'ler için tanımlanabilir. Burada T fonksiyonun periyodudur. Eşitlik (1.28)'in her periyot için açılımı

$$f(t) = f(t + hT), \quad h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.29)$$

biçiminde yazılabilir. $f(t)$ 'yi T periyotlu bir fonksiyon olarak ele alırsak, bu fonksiyon trigonometrik seriler olarak da gösterilebilir:

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)\} \quad (1.30)$$

burada $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ dir. Eşitlik (1.29)'deki gibi bir seri, trigonometrik Fourier serisi olarak adlandırılır ve

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (1.31)$$

olarak yeniden yazılabilir. Burada $c_0 = \frac{a_0}{2}$, $c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$ ve $\phi_h = \tan^{-1}\left(\frac{a_h}{b_h}\right)$ dır.

(1.31) eşitliği göz önüne alındığında, bir periyodik fonksiyonun farklı frekanslı sinüsoidal bileşenlerin bir toplamı olarak gösterilebildiğini görürüz. Buradaki $h\omega_0$ 'ın bileşeni, periyodik fonksiyonun h. harmoniği olarak adlandırılır. Temel bileşen olarak $h = 1$ halindeki bileşen tanımlanır. c_h ve ϕ_h sırasıyla, h. harmonik büyüklüğü (genliği) ve faz açısı olarak bilinir.

Bir $f(t)$ fonksiyonu çift fonksiyon özelliğine sahipse

$$f(-t) = f(t) \quad (1.32)$$

eşitliğine sahip olur eğer $f(t)$ fonksiyonu tek fonksiyon özelliğine sahipse

$$f(-t) = -f(t) \quad (1.33)$$

eşitliği geçerli olur.

T periyotlu bir fonksiyon, yarı dalga simetrisine sahipse

$$f(-t) = -f(t \pm T/2) \quad (1.34)$$

şartını sağlar. Eğer $f(t)$ yarı dalga simetrisine sahip ve aynı zamanda tek veya çift fonksiyonsa, $f(t)$ fonksiyonu tek veya çift çeyrek dalga simetrisine sahiptir. Simetrilerin kullanımı Fourier analizini basitleştirmektedir.

1.2.2 Fourier Analizi

Ortogonal ilişkiler kullanılarak, eşitlik (1.30)'daki Fourier katsayıları a_0 , a_h ve b_h sırasıyla,

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (1.35)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(h\omega_0 t) dt \quad (1.36)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(h\omega_0 t) dt \quad (1.37)$$

eşitliklerinden belirlenebilir ($h = 1, 2, \dots$).

1.2.3 Fourier Dönüşümü

Bir $f(t)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü,

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.38)$$

biçiminde tanımlanır ve $f(t)$, $F(\omega)$ 'nin ters Fourier dönüşümü,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} dt \quad (1.39)$$

olarak verilir. (1.38) ve (1.39) eşitlikleri, Fourier dönüşüm çifti olarak adlandırılır. Bu eşitlikler, zaman veya frekans domeninin $(-\infty, \infty)$ aralığındaki herhangi bir fonksiyonu, ters domende sürekli bir fonksiyona dönüştürmek için kullanılır. Fourier dönüşümünün anahtar özelliği, hem zaman hem de frekans domeni perspektifinden fonksiyonu veya dalga şeklini inceleme kabiliyetidir. Verilen bir fonksiyon iki eşdeğer gösterime sahip olabilir: biri zaman domeninde olanıdır ki bu $f(t)$ olarak gösterilir ve diğeri frekans domeninde olanıdır ki bu da

$f(\omega)$ olarak gösterilir. Eşitlik (1.38) zaman fonksiyonunu, frekans spektrumuna dönüştürür ve eşitlik (1.39) frekans spektrumunu tekrar zaman fonksiyonuna dönüştürür (Chang, 1998).

1.2.4 Ayrık Fourier Dönüşümü

Frekans domeni spektrumu ve zaman domeni fonksiyonunun her ikisi de her periyotta N örnekleme ile periyodik örneklenmiş fonksiyonlar olduğu zaman, (1.38) ve (1.39) eşitlikleri Ayrık Fourier Dönüşüm (DFT - Discrete Fourier Transform) çifti olarak adlandırılıp, aşağıdaki gibi yazılabilir

$$F(k\Delta\Omega) = \sum f(n\Delta T) e^{-j2\pi kn/N} \quad (1.40)$$

$$F(n\Delta T) = \sum f(k\Delta\Omega) e^{j2\pi kn/N} \quad (1.41)$$

Burada $k, n = 0, 1, \dots, N-1$, olup $\Delta\Omega = \frac{2\pi}{\Delta T}$ ve $\Delta T = \frac{T}{N}$ 'dir. Ölçüm bilgisi bir örnekleme zaman fonksiyonu formunda daima elde edilebildiği için, DFT sık sık harmonik ölçümlerinde kullanılır. Örnekleme zaman fonksiyonu, sınırlı sürekliliğin sabit zaman aralıklarına ayrılan büyüklüklerin bir zaman serisi olarak gösterilir.

Fourier analizi, DFT'ler tarafından yapılabilir. DFT'ler, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT – Fast Fourier Transform) algoritmalarının kullanımıyla hesaplanabilir (Oppenheim ve Schafer, 1989). FFT teknikleri, çok büyük sayıda fonksiyonlar içeren (1.40) ve (1.41) eşitliklerinin DFT hesaplamalarını yapmak için çok hızlı metotlardır. Harmonik analizlerinde kullanılan pek çok sayıda FFT algoritmaları vardır.

BÖLÜM 2

2. HARMONİKLERİN KAYNAKLARI VE ETKİLERİ

2.1 Harmoniklerin Oluşumuna Neden Olan Elemanlar

Güç sistemlerinde harmoniklerin oluşumuna neden olan elemanlar genelde nonlineer yüklerdir. Sistemdeki harmonikli akım ve gerilimler, sistem içindeki elemanların nonlineerliğinden meydana gelmektedir. Yarı-iletken elemanların kullanımındaki artış, harmonik bileşenlerin artmasına neden olmuştur. Yapılan araştırmalar sonucu, harmoniklerin meydana gelmesine neden olan elemanlar aşağıdaki şekilde verilebilir (Kocatepe, 1995; Dugan vd, 1996):

- Statik VAR kompanzatörler,
- Konverterler,
- Yarı iletken elemanlar,
- Generatörler,
- Motorlar,
- Senkron makinaların uyarılması için kullanılan diyot ve tristörlü dönüştürücüler,
- Transformatörler,
- Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları,
- Fotovoltaik sistemler,
- Bilgisayarlar,
- Elektronik balastlar,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Anahtarlama güç kaynakları,
- Civa ve sodyum buharlı lambalar ile floresant lambalar,
- Kaynak makinaları,
- Kontrol devreleri,
- Frekans dönüştürücüleri,
- Ark fırınları,
- HVDC sistemleri,
- Elektrikli ulaşım sistemleri

Bu bölümde bunların bazıları detaylı olarak incelenecektir.

2.1.1 Transformatörler

Enerji sistemlerinde demir çekirdeği bulunan bobinler harmoniklere yol açar (Dommel, 1986). Enerji sisteminde işlevi olan en önemli eleman olan transformatörler harmonik kaynaklarının başında gelir. Transformatörlerin harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmayışından , yani transformatörün doymasından dolayı meydana gelir.

Günün erken saatlerinde yükün az oluşu ve gerilimin yüksek olması sonucu mıknatıslanma akımı harmonikleri yüksek seviyelere ulaşır. Çünkü transformatörde aşırı uyarma meydana gelir, aşırı uyarmayla oluşan akım harmoniklerinde 3., 5. ve 7. harmonikler etkili olur (Arrillaga, 1985). Akım şiddeti bakımından en önemli olan 3. harmoniktir. 3 ve 3'ün katı harmonikler arasında 360 derecenin tam katları kadar faz farkı olduğundan, bu harmonikler aynı fazdadırlar.

Gerilim kesildiğinde transformatör saçlarında artık akı yoğunluğu kalabilir. Gerilim tekrar uygulandığında bu artık akı yoğunluğu, transformatörün aşırı doymasına ve mıknatıslanma akımının 5-10 kat yükselerek bir darbe akımı meydana gelmesine sebep olur (Arrillaga, 1985).

Mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi, transformatör bağlantı grubuna, primerin yıldız bağlı olması halinde yıldız noktasının nötre bağlı olup olmamasına ve transformatördeki magnetik devrenin geometrik yapısına bağlıdır (Boduroğlu, 1988).

2.1.2 Konverterler

Hat komütasyonlu konverterler ana harmonik kaynaklarındandır. Fotovoltaik sistemler, aküler, elektrikli ulaşım sistemleri ve DC iletim sistemleri bu konverterler üzerinden beslenirler (Kocatepe, 1995).

p tristörlü (darbeli) bir konverterin oluşturacağı akım harmoniklerinin mertebesi,

$$h = p \cdot k \pm 1 \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.1)$$

olur. Konverterlerin darbe sayısı genelde $p = 6, 12, 18, 36$ dır.

$\dot{u}_h$, 1'den küçük bir katsayı olmak üzere, konverterlerin harmonik akımı $I_h = I_1 \cdot (\dot{u}_h/h)$ 'tır. Komütasyon süresi ihmal edilirse $\dot{u}_h = 1$ alınır ve $I_h = I_1/h$ olur. Darbe sayısı p ve harmonik akımının mertebesi artırılarak harmonik bileşen akımının efektif değeri azaltılabilir.

2.1.3 Generatörler

Dönen makinalar makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan akım harmonikleri üretir (Arrillaga, 1985). Bu makinalarda alan eğrilerinin içerdiği harmoniklere bağlı olarak endüklenen elektromotor kuvvet de aynı harmonikleri içerir.

Generatörlerde, stator sargısı yıldız bağlı ise, 3 ve 3'ün katı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunur, fazlar arası gerilimlerde bulunmazlar.

Harmoniklerin bozucu etkilerinin azaltılması için, generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilmektedir. Generatörlerin neden olduğu 3 ve 3'ün katı harmonik akımları generatör veya blok transformatörün birinde üçgen bağlama kullanılmak suretiyle bloke edilebilir. Kutuplar ve endüvi olukları uygun dizayn edilerek 5. ve 7. gerilimleri sınırlandırılabilir (Arrilaga, 1985).

2.1.4 Gaz Deşarjı ile Aydınlatma

Civa ark lambaları, neon lambalar ve yüksek basınçlı sodyum lambalar ile floresan lambalar bağlandıkları devrede harmonik bileşenler oluştururlar. Bu tip lambaların elektriksel karakteristiği nonlineer olup iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterir. Floresan aydınlatmada tek harmonik bileşenleri devreyi önemli ölçüde etkilerler. Üç fazlı dört telli montajda 3. harmonik akımı nötr iletkeninden geçer (Arrillaga, 1985 ; Grady and Heydt, 1985).

2.1.5 Ark Fırınları

Geniş spektrumlu harmonik bileşenlere sahip olan önemli bir nonlineer yüküdür. Ark fırınlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve ark akım-gerilim karakteristikleri harmonik

oluşumlarının temel nedendir (Arrillaga, 1985). Ark olayında akım ve gerilimde meydana gelen değişimler osilogramla kaydedildikten sonra yapılan analiz yardımıyla harmonik bileşenleri tespit edilir.

Ark boyundaki ani değişimin bağlandığı enerji sisteminde oluşturacağı dalgalanmalar, frekans değerinin 0.1'den 30 Hz'e kadar geniş bir aralıkta dolaşmasına neden olur (Arrillaga, 1985). Tipik bir fırınında 2,3,...,9 mertebesinde akım harmonikleri bulunur, maksimum harmonik temel bileşenin %30'u kadardır (Sundberg, 1976).

2.2 Harmoniklerin Enerji Sistemlerinde Meydana Getirdiği Etkiler

Nonlineer yükler tarafından meydana getirilen harmonikler güç sistemlerindeki tüm elemanları etkilerler. Harmoniklerin meydana getirdiği birçok sorun ortaya konmuştur, bir kısmı da halen araştırılmaktadır. Harmonikler, enerji iletim hatları, elektrik makinaları, transformatörler ve generatörlerde ilave harmonik akımlarının geçmesi dolayısıyla ek kayıplara neden olurlar. Bu durumlarda harmonikler, güç sistemi elemanlarının aşırı ısınmalarına, zarar görmelerine veya devre dışı kalmalarına neden olurlar. Harmoniklerin güç sistemlerinde meydana getirdiği etkilerin bazıları aşağıdaki şekilde verilebilir (IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1993).

2.2.1 Harmoniklerin Rezonans Olayları Üzerindeki Etkileri

Bilindiği gibi endüktif reaktans,

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.2)$$

ile ifade edilir. Endüktif reaktansın değeri frekans ile doğru orantılıdır.

Kapasitif reaktans ise

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.3)$$

şeklinde ve frekans değeri ile ters orantılıdır. Herhangi bir L-C devresinde rezonans frekansında endüktif reaktans, kapasitif reaktansa eşit olur. Bunu

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.4)$$

olarak ifade edebiliriz. Buradan rezonans frekansı

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.5)$$

olarak belirlenir. Güç sistemine kompanzasyon amaçlı kondansatörler eklendiğinde, seri veya paralel rezonans oluşabilir. Bu durumda aşırı akım ve gerilimler ortaya çıkarlar.

Sistemin rezonans frekansı, harmonik frekanslarından birine eşit (veya çok yakın bir değerde) olursa, yüksek seviyede harmonik akım ve gerilimleri ortaya çıkar. Bu durumda, rezonansın oluştuğu harmonik mertebesi,

$$h_r = \frac{1}{2\pi f_1 \sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \quad (2.6)$$

olur.

Sistemdeki rezonans durumları, harmonik seviyelerini belirleyen çok önemli etkenlerdir. Seri rezonans harmonik akım akışı için düşük bir empedans göstermesine rağmen, paralel rezonans yüksek empedans gösterir.

2.2.1.1 Paralel Rezonans

Paralel rezonans olayı en çok karşılaşılan sorunlardan biridir. Doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik frekanslarından herhangi biri için, kondansatör grupları ile sistem endüktansı arasında paralel rezonans oluşabilir. Paralel rezonans olayı sırasında kondansatör uçlarındaki gerilim aşırı yüklendiği için kondansatör zarar görebilir. Bu endüstriyel yüklerde ve sistemlerde yaygın olarak görülen bir olaydır.

Şebeke empedansı tamamen endüktif kabul edilerek rezonans frekansı,

$$f_p = f_1 \sqrt{\frac{S_K}{S_C}} \quad (2.7)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Burada ,

f_p : Paralel rezonans frekansını

f_1 : Temel frekans

S_K : Şebekenin kısa devre gücünü

S_C : Kapasitenin nominal gücünü

ifade etmektedir.

Hangi durumda rezonans koşulu oluşacağını belirleyebilmek için, baradaki harmonik gerilim ile birlikte, baraya bağlı bütün tüketicilerin harmonik akımlarını ölçmek gerekir. Genel olarak, baradan enerji sistemine akan akım küçük ancak harmonik gerilim değeri yüksek ise, rezonansın enerji sistemi tarafında oluşacağı söylenebilir. Eğer baraya bağlı yükler harmonik akımlar çekiyor ve bu durum barada harmonik gerilimlerin oluşmasına sebep oluyorsa, rezonansın sistemin endüktansı ve yük kondansatörü arasında oluşacağı söylenebilir.

2.2.1.2 Seri Rezonans

Seri rezonans, rezonans frekansı ile uyumlu olan harmonik akımlarına düşük bir empedans yolu sağlar. Bu durumda, harmonik akımlarda herhangi bir büyüme söz konusu olmaz. Ancak harmonik akımları şebekenin istenmeyen kısımlarına akabilirler. Bunun sonucunda iki tür sorun ortaya çıkabilir:

- Rezonans devresi ile hat boyunca seri bağlantılı devreler varsa, önemli ölçüde parazitler oluşabilir.
- Rezonans kolundaki harmonik akımların yoğunluğu nedeniyle kondansatör grubunda aşırı gerilim harmonikleri oluşabilir.

Seri rezonans frekansı,

$$f_s = f_1 \sqrt{\frac{S_t}{S_c Z_t} - \frac{S_1^2}{S_c^2}} \quad (2.8)$$

denklemini ile bulunur. Burada,

S_t : Transformatörün nominal gücünü

Z_t : Transformatörün p.u. empedansını

S_1 : Omik yükün gücünü

ifade etmektedir.

Rezonans oluşması sistemde arıza ve hasarlar meydana getirebilir. Harmonik rezonansının etkisi sistem yükünün az olduğu zamanlarda, örneğin gecenin geç saatleri ve tatil günlerinde, daha fazladır. Yük miktarı arttıkça, akımın akabileceği empedans yolları küçülür. Dolayısıyla rezonans nedeni ile oluşan harmonik artışı zayıflar. Birçok endüstriyel tesiste olduğu gibi, devreler daha az yüklendiğinde ve yüklerin tümü motor olduğunda, bunlar, rezonans nedeni ile oluşan harmoniklere karşı daha duyarlı olurlar.

2.2.2 Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri

Harmonikler, transformatörlerde ek ısınmalara, gürültü artışına ve ömür kısalmasına neden olurlar. Transformatörlerin üzerindeki harmoniklerin etkileri Bölüm 3'te detaylı olarak verilecektir.

2.2.3 Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri

Güç sistemlerinde kondansatörlerin kullanılması, sistemin rezonansa girmesi gibi problemleri meydana getirebilir. Bu haldeki akım ve gerilimler, rezonanssız haldekine göre oldukça yüksek olmaktadır.

Kondansatörlerin reaktansı, frekansla azalır ve bu sayede yüksek mertebeli harmonik akımlar kondansatör reaktans değerini önemli ölçüde azaltırlar. Bu da, ısınmanın ve dielektrik hataların artmasına neden olur. Transformatörler ve reaktörler gibi nonlineer elemanların sık

sık anahtarlanması kapasitör yüklerine eklenecek harmonik akımları meydana getirirler. Bunların neden olduğu aşırı gerilimin ve ısı artışının sonucu kondansatörlerin ömrü kısalmır. IEEE Std 18-1992 standartları, kondansatör grupları için akım, gerilim ve reaktif güç sınırlamaları getirmiştir. Müsaade edilebilecek maksimum harmonik seviyeleri bu sınırlamalar vasıtasıyla belirlenebilir.

2.2.4 Harmoniklerin Anahtarlama Elemanları Üzerindeki Etkileri

Anahtarlama elemanlarında harmonik akımlarından dolayı kayıplar ve ısınma artar. Bu nedenle, sürekli hal akım taşıma kapasitesi azalır ve izolasyon malzemelerinin ömrü azalır. Sigortalar harmoniklerin neden olduğu ısınmadan dolayı açabilir. Bunların dışında, anahtarlama elemanlarının akım sıfır geçişlerindeki akım kesme işlevini zorlaştırabilirler (Wagner, 1993).

2.2.5 Harmoniklerin Röleler Üzerindeki Etkileri

Akım ve gerilim sıfır geçişlerine göre çalışan röleler, harmonik distorsiyonundan etkilenebilirler. Akım ve gerilim dalga şekillerinin bozulması sinüsoidal durumdaki ayarlarından farklı değerlerde çalışmasına, koruma rölelerinin doğru çalışmamasına yol açabilir. Bununla beraber, röleler üzerinde yapılan incelemelerde, harmonik distorsiyonun %10-20 seviyelerine kadar işletme problemi oluşturmadaıkları gözlenmiştir (Ortmeyer, 1985).

2.2.6 Harmoniklerin Ölçü Aletleri Üzerindeki Etkileri

Sistemin harmonik bileşenler nedeniyle rezonansa girmesi halinde, ölçü aletleri bu durumdan olumsuz etkilenir. Sayaç gibi endüksiyon disk aletleri, normalde sadece temel akım bileşenini ölçerler. Bununla beraber, harmonik distorsiyonundan dolayı meydana gelen faz dengesizliği, sayaçların hatalı ölçüm yapmalarına yol açabilir. Genelde, harmonik distorsiyon faktörünün %20'den büyük olduğu durumlarda büyük miktarda hatalar meydana gelebilir.

2.2.7 Harmoniklerin Döner Makinalar Üzerindeki Etkileri

Harmonik gerilimlerinin ve akımlarının motorlar ve generatörler üzerindeki en önemli etkisi demir ve bakır kayıpları nedeniyle ısınmanın artmasıdır. Bu harmonik bileşenler sebebiyle

verim ve moment olumsuz etkilenebilmektedir. Harmonik bileşenlere maruz kalan motorlar sinüsoidal şartlarda çalışan motorlardan daha gürültülü çalışırlar.

Sarım kayıpları genelde demir kayıplarından daha önemlidir. Harmoniklerin toplam etkisi, makinanın ömrünü ve verimini azaltır. Motor performansı harmonik bileşenler sebebiyle %5-%10 azalmaktadır.

2.2.8 Harmoniklerin Direnç Üzerindeki Etkileri

İletkenin akım geçişine esas olarak kullanılan kesiti, harmonik bileşenlerin frekansının artması ile (deri etkisi) sonucu azalmaktadır. Kesit azalmasının bir sonucu olarak iletkenin temel bileşen omik direncine harmonikler nedeniyle ilave direnç (R_h) gelmektedir. Harmonikli akıma gösterilen toplam omik direnç $R = R_o + R_h$ olur. Frekans artışı ile direnç değerinin değişimine ait çok kullanılan ifade şöyle verilir (Arnold, 1938):

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{x^4}{48} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right] \quad (2.9)$$

$$K_2 = \left[\frac{x}{2.828} + 0,26 \right] \quad (2.10)$$

olmak üzere,

$$\begin{aligned} R &= R_o \cdot K_1, & 0 \leq x \leq 3 & \text{ için} \\ R &= R_o \cdot K_2, & x > 3 & \text{ için} \end{aligned}$$

dir.

Burada,

$$x = 1,585 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{f/R_o} \quad (2.11)$$

olarak verilmiştir.

R_o = Doğru akım direnci

R = Deri etkisi dahil toplam direnci göstermektedir.

2.2.9 Harmoniklerin Reaktans Üzerindeki Etkileri

Güç sistemlerinin modellenmesi için reaktanslardan faydalanılmaktadır. Temel bileşendeki değeri X_L olan endüktif bir reaktans, h . harmonikte,

$$X_{L_h} = h \cdot X_L \quad (2.12)$$

olarak gösterilir.

Temel bileşendeki değeri X_c olan kapasitif bir reaktans, h . harmonikte,

$$X_{c_h} = X_c / h \quad (2.13)$$

değerini alır.

2.3 Harmoniklerin Enerji Sistemleri Üzerindeki Genel Olarak Etkileri

Harmonik bileşenler dolaştıkları sistemde birçok probleme yol açarlar. Enerji sistemlerindeki bu problemleri şöyle verebiliriz (IEEE Working Group on Power System Harmonics, 1983; Kocatepe, 1995):

- Generatör ve şebeke gerilim dalga şeklinin sinüsoidalden uzaklaşması,
- Transformatörlerde ve yüklerde ek kayıpların oluşması,
- Gerilim düşümündeki artmalar,
- Dielektrik malzemesinin delinmesi,
- Bazı elemanların ömrünün kısılması,
- Mikroişlemcilerin çalışmalarında hatalar,
- Motorlar ve diğer bazı elektrik cihazlarında ek gürültülerin oluşması,
- Enerji ölçüm sayaçlarında hatalı ölçmeler,
- İletişim araçlarında parazitlerin oluşması ve anormal çalışma,

- Koruma sistemlerinin çalışmalarında hatalar,
- Rezonans olaylarının meydana gelmesi,
- Sistem üzerinde aşırı akım ve gerilim değęlerinin meydana gelmesi.

Harmoniklerin bilinen bu olumsuz etkilerinin dışında da etkileri söz konusu olup bu konuda hala araştırmalar devam etmektedir.

Bu etkilerin azaltılması için birçok çalışma yapılmış ve halen bunun üzerindeki çalışmalar devam etmektedir. Bu etkileri azaltmak için özel dizayn edilmiş transformatörler kullanılabilmektedir. Bunun dışında nonlineer yüklerin filtrelerle donatılması, konverterlerin darbe sayısının mümkün olduğu kadar büyük seçilmesiyle de harmonik bileşenlerin şebekeye geçmesi önlenabilir.



BÖLÜM 3

3. NONLINEER YÜKLERİN TRANSFORMATÖRLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

3.1 Harmoniklerin Transformatördeki Kayıplara Etkileri

Harmoniklerin en olumsuz etkilerinden biri de dolaştıkları eleman yada devrelerde ilave kayıplar meydana getirmeleridir. Aktif güç kaybı olarak ısı şeklinde açığa çıkan bu kayıpların belirlenmesi ve sınırlandırılması son derece önemlidir.

Nonlinear yükler transformatörlerde ek ısınmalara ve gürültü artışına sebep olurlar. Transformatörlerde kayıpların artışı sonucunda, transformatörde yalıtım zorlanmaları, transformatör arızalar ve transformatör ömrünün azalması gibi problemlerle karşılaşılır.

Transformatörlerde Akım harmonik bileşenleri ile gerilim harmonik bileşenlerinin etkileri temel olarak şu şekilde görülmektedir:

- Akım harmonikleri, kaçak akı kayıplarında ve bakır kayıplarında artışlara neden olmaktadır.
- Gerilim harmonikleri, demir kayıplarında artışlara neden olmaktadır.

Bu etkilerin meydana getirdiği problemler ve bunların çözümü için öne sürülen yöntemler ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 4'te verilecektir.

Harmonik gerilim ve akımlarının neden olduğu transformatör kayıpları frekans değeri ile direkt ilişkilidir. Frekansın artmasıyla kayıplar artmaktadır, yüksek mertebeli harmonik bileşenler, düşük mertebeli harmonik bileşenlerden daha etkili olmaktadır.

IEEE C57.1200-1987 ile transformatör akımındaki harmoniklere sınırlamalar önerilmiştir. Akım distorsiyon üst değeri %5 olarak sınırlanmıştır.

Transformatör kayıpları yüksüz ve yüklü kayıplar olarak tanımlanabilir. Yüklü kayıplar I^2R kayıpları ile kaçak akı kayıpları olarak ayrılabilir. Kaçak akı kayıpları, nonsinüsoidal akım dalga şekli etkisi nedeniyle ek ısınmalara sebep olurlar. I^2R kayıpları ise, deri etkisi ve ısınma

sebebiyle meydana gelmektedir. Deri etkisi sebebiyle meydana gelen direnç artışı Bölüm 2.2.8’de açıklanmıştır. Bu direnç artışından dolayı I^2R kayıpları ve buna bağlı olarak ısınma değeri artar. Harmonikler sargılardaki, nüve ve bağlantı noktalarındaki magnetik akıdan dolayı oluşan kaçak kayıpların da artmasına sebep olurlar.

3.2 Demir Kayıpları

Transformatörlerin boшта çalışırken şebekeden çektiği akım, reaktif akım bileşeni ve aktif akım bileşeni olmak üzere iki bileşenden oluşur. Boшта çalışma akımının reaktif bileşeni mıknatıslanma akımı olarak bilinir ve magnetik alanı meydana getirir. Aktif akım bileşenin bir kısmı, demirde değişken bir magnetik alan meydana getirerek demir kayıplarını karşılar. Demir kayıpları histerizis ve fuko kayıplarından meydana gelir (Çakır, 1985).

3.2.1 Transformatörde Meydana Gelen Histerizis Kayıpları

Demir çekirdeğin mıknatıslanmasının değiştirilmesini sağlayan kayıp enerjidir. Isı olarak ortaya çıkar.

Değişken olan transformatör magnetik akısı, demir çekirdekte her periyotta iki kez yön değiştirip histerizis çevrimini tamamlar. Histerizis kaybı P_H , frekans ile orantılıdır. Bundan dolayı, frekansları yüksek olan harmonikli gerilimler histerizis kayıplarının artmasına neden olurlar.

Histerizis kayıpları 1917’de Steinmetz tarafından verilmiş olan,

$$P_H = \eta \cdot f \cdot B^{1.6} \quad (3.1)$$

formülü ile bulunur. Burada B (Gauss) endüksiyon, η demir cinsine bağlı sabiti ve f frekansı ifade eder. 10000 Gauss’tan yüksek endüksiyonlarda gerçek histerizis kayıplarını vermediği için, bundan küçük endüksiyon değerleri için kullanılır (Steinmetz, 1917).

Richter’in 1951’de vermiş olduğu özgül histerizis kaybı formülü 10000 Gauss’un üstündeki endüksiyon değerleri için gerçeğe daha yakın değerler verir (Richter, 1951). Bu formül,

$$P_H = a \cdot f \cdot B + b \cdot f \cdot B^2 \quad (3.2)$$

şeklindedir.

Bu endüksiyon değerlerinde $a \cdot f \cdot B$ değeri, $b \cdot f \cdot B^2$ değerine göre ihmal edilebileceği için,

$$P_H = \sigma_H \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \quad \text{Watt/kg} \quad (3.3)$$

formülü yeterli hassasiyeti sağlayacaktır. Bu formülde σ_H malzeme sabitini ifade eder. kullanılan demir levhanın cinsine ve kalınlığına bağlı olarak değişir. Bundan yola çıkarak kullanılan malzemenin cinsinin histerizis kayıplarını hesaplamada büyük öneme sahip olduğunu söyleyebiliriz.

Kullanılan demir çekirdeğin kilogram olarak ağırlığı G_{Fe} ile ifade edilirse, formülü şu şekilde yeniden yazabiliriz;

$$P_H = G_{Fe} \cdot \sigma_H \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \quad \text{Watt} \quad (3.4)$$

3.2.2 Transformatörde Meydana Gelen Fuko Akımı Kayıpları

Demir çekirdekte, periyodik akı değişimleri sebebiyle oluşan fuko akımları, kendilerini meydana getiren magnetik akıya zıt yönde bir oluştururlar. Bunu karşılamak için de mıknatıslanma akımına gereksinim duyarlar. Fuko akımlarının demir çekirdekte meydana getirdiği omik kayıplara, fuko akımı kayıpları denir. Bu kayıpları azaltmak için silisyumlu saçlar tercih edilir ve bu saçlar birbirinden izole edilirler. Kuvvet çizgilerinin dengeli yayıldığı ortamlarda fuko akımı kayıpları,

$$P_F = \sigma_F \cdot \left(\frac{f}{100} \right)^2 \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \quad \text{Watt/kg} \quad (3.5)$$

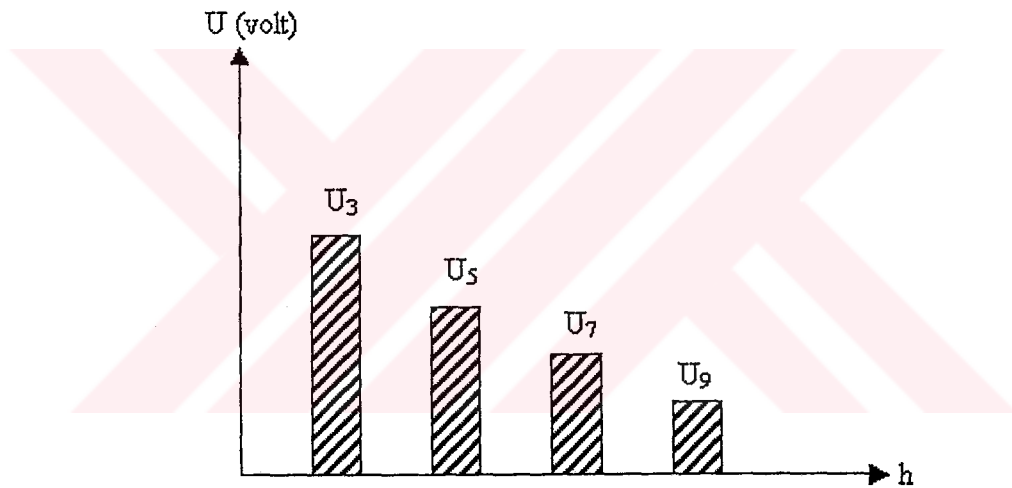
formülü ile hesaplanır. Burada σ_F malzeme sabitidir. Alaşım miktarının az yada saçın kalın olduğu durumlarda fuko kayıpları artar.

Demirde kg başına oluşacak histerezis ve fuko akımı kayıplarının toplamı,

$$P_{Fe} = \left[\sigma_H \cdot \frac{f}{100} + \sigma_F \cdot \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \quad \text{Watt/kg} \quad (3.6)$$

olarak ortaya çıkar.

Bu formül demir kayıplarının frekansın artması ile arttığını gösterir. Yüksek frekanslı harmoniklerin bulunduğu sistemlerde demir kayıpları artacak ve bunun sonucu ısınmanın artması ve yalıtım zorlanmaları meydana gelecektir.



Şekil 3.1 : 3., 5., 7. ve 9. harmonik bileşenlere sahip gerilime ait harmonik spektrumu

Güç sisteminde Şekil 3.1'deki harmonik spektruma sahip gerilim bulunması halinde, süperpozisyon teoreminden faydalanılarak her bir harmonik bileşen için demir kayıpları hesaplanabilir.

Bu durumda, h harmonik bileşenleri, U_h h . harmonik bileşene ait akımı göstermektedir. h . harmonik gerilimi için magnetik endüksiyon şu şekilde hesaplanır;

$$B_h = \frac{U_h}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f_h \cdot q_{Fe} \cdot N \cdot 10^{-8}} \quad (3.7)$$

Burada f_h ,

$$f_h = h \cdot f_i \quad (3.8)$$

olarak ifade edilir.

Bunları belirttikten sonra h. harmonik bileşene ait demir kayıpları,

$$P_{Fe} = \left[\sigma_H \cdot \frac{f_h}{100} + \sigma_F \cdot \left(\frac{f_h}{100} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{B_h}{10000} \right)^2 \quad \text{Watt/kg} \quad (3.9)$$

denklemleri ile ifade edilebilir.



BÖLÜM 4

4. K-FAKTÖRLÜ TRANSFORMATÖRLER

4.1 Tanım

K-faktörlü transformatörler, harmonik bileşenlerin olumsuz etkilerinin artması sonucu yakın geçmişte ortaya çıkmış ve transformatörlerdeki harmonik problemlerine çözüm olarak tanıtılmışlardır. Temelde, standart transformatörlerden daha verimli değildirler. Transformatörlerdeki harmonikler kayıpların artması ve bunun sonucunda transformatörün ısınmasında artışlara neden olurlar. Meydana gelen bu ısı artışı, transformatörün izolasyonunu bozarak arızalara yolaçar. Endüstride hız ayar devreleri gibi yarı-iletken elemanlar ile mikroişlemcilerin ve nonlinear cihazların kullanımının artması, güç sistemi harmoniklerini göz ardı edilemeyecek bir seviyeye getirmiştir. Harmoniklerin etkisi filtreler veya özel dizayn edilmiş K-faktörlü transformatörler kullanılarak elimine edilebilir.

K-faktör değeri, özel dizayn edilmiş K-faktörlü transformatörleri seçmede veya standart transformatörün anma değerini düşürmede kullanılır. Harmonikli durumda kullanıcılar standart transformatörün anma değerini düşürmeye veya özel tasarlanmış K-faktörlü transformatör seçmeye karar vermek durumundadırlar. Standart bir transformatör seçilirse K-faktörü transformatörün anma değerini düşürmek için kullanılır, eğer K-faktörlü transformatör seçilirse, o zaman K-faktörü seçilecek transformatörün K-faktörü oranını belirlemek için kullanılır. K-faktörlü transformatörler harmoniklerin neden olduğu toplam kayıpları ve ısıyı karşılayacak biçimde tasarlanırlar. Birleşik laboratuvarlar (UL – United Laboratories) standartları 1561, Kuru Tip Genel Maksat ve Güç Transformatörleri ve standart 1562, Transformatörler, Dağıtım, Kuru Tip 600 volt üstü için , harmonik içeriği %5'ten düşük olan yükler için standart transformatör kullanımını sınırlandırmıştır. UL K-faktörü oranları 1, 4, 9, 13, 20, 30, 40 ve 50 için standartlar verilmiştir.

K-faktörlü transformatörler harmonik akımlarının oluşturduğu ilave ısınmaları önleyen değişik özelliklere sahip olarak özel dizayn edilmiş transformatörlerdir. Harmoniklerin neden olduğu elektrostatik gürültüyü azaltmak için yüksek ve alçak gerilim sargıları arasında statik korumaya sahip olabilmektedirler. Yine deri-etkisi ve fuko akımı kayıplarını azaltmak için sırası değiştirilmiş ve teker teker yalıtılmış iletkenler kullanılabilmektedir. Üstelik üçüncü harmonik nötr akımlarını yok etmek için sekonder sargılarda daha büyük nötr iletkenlerine

sahip olabilmektedirler. Çekirdek tabakası, çekirdekteki fuko akımlarını azaltmak için teker teker yalıtılmıştır. Histerezis kayıplarını azaltmak ve transformatörde (distorsiyonlu bara geriliminin dalga şeklinin yüksek tepe değerlerinden dolayı) oluşabilecek doymaları azaltmak için özel çelikten yapılmış daha büyük çekirdeğe ihtiyaç duyulabilir, çünkü özel çelik manyetik alanlardaki değişimlere daha az direnç göstermektedir. Daha büyük kesitli çekirdek kullanılması ise çelik alanını arttırarak akı yoğunluğu ve manyetik alan değişimlerine karşı gösterilen direnci azaltmaktadır. Akı yoğunluğunu düşürmenin bir başka yolu da sarım sayısını arttırmaktır. I^2R kayıplarının büyük olması sonucu oluşan ısınmanın azaltılması, iletken direncinin azaltılması ile mümkündür bu ise daha büyük kesitli iletkenler ile sağlanır. Çoğu kez, harmoniklerin ısıtma etkilerini azaltmak için sargılara soğutma kanalları eklenir. Fuko akımı kayıpları ise iletken boyunu azaltarak ve akı yoğunluğunu düşürerek azaltılabilir (Kennedy, 1998).

K-faktörlü transformatörlerin fiyatları (maliyetleri) standart transformatörlerin hemen hemen iki katıdır ve ağırlığı standart transformatörlerden % 15 daha fazladır. Halen K-faktörü ile standart transformatörlerin anma değerinin düşürülmesi tavsiye edilmektedir. Anma değeri düşürülmüş transformatörlerin harmoniklerden dolayı aşırı ısınmaları ve transformatör ömrünün azalması gibi problemleri olabilmektedir.

Özel bir yük için K-faktörünü belirlemede tavsiye edilen pratik düşünceler şunlardır (Kennedy, 1998):

1-) K-faktörü hesaplamaları için sistem ölçümleri temel alınır. Ölçümler ulaşılabilir olmadığı zaman gerçekçi bir K faktörü belirlemek zordur.

2-) Tek fazlı harmonik kaynakları sisteme faz dışından diğer akımlarla aynı frekansta harmonik akımı enjekte eder. Bu ise o frekanstaki toplam harmonik akımların iptali ile sonuçlanır.

3-) Harmonik iptalinden dolayı, her ne kadar bir tek yükün K faktörü 30'a yaklaşırsa da, nadiren çeşitli bu tip yüklere bağlı devrelerde 30'u aşar.

4-) Akım frekansının artmasıyla transformatör kayıpları artar; bu nedenle, transformatörde ısınmaya neden olma yönünden yüksek frekanslı harmonik bileşenler düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemlidir.

Sonuç olarak, K-faktörlü transformatörler belirlenirken aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi gereklidir (Kennedy, 1998):

1-) Transformatör imalatçıları her K-faktör oranı için transformatör üretmemektedirler. İmalatçılar K-faktör oranlarının belirli değerleri için K-faktör-oranlı transformatörleri standartlaştırmışlardır.

2-) Transformatör K-faktör oranı, yükün ve transformatörün hizmet verdiği devrenin K faktörüne eşit veya büyük olmalıdır.

3-) K-faktör-oranlı transformatörlerin standart transformatörlere göre daha düşük empedansları vardır.

4-) Pratikte genellikle K-faktörlü transformatörlerin K-faktör oranı 13 veya daha düşük değerleri yeterli olmaktadır.

5-) Transformatör K-faktör oranları UL Standardı 1562'yi temel almaktadır.

4.2 Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri

Harmonikler transformatörlerdeki ısınmayı ve kayıpları arttıran önemli bir etkidir. Yüklü ve yüksüz kayıpları arttırırlar. Deri etkisi oluşturarak yük kayıplarını arttırırlar, fuko kayıplarını, joule kayıplarını (I^2R) ve kaçak kayıpları arttırırlar. Histerezis kayıplarını arttırarak da yüksüz kayıpları arttırırlar.

Yük Kayıpları : Yük kayıpları I^2R , sargı fuko kayıpları ve kaçak kayıpları içerirler. Harmoniklerin yük kayıpları üzerindeki etkileri ve yükseltilmiş yük kayıplarının nasıl toplanacağı ANSI/IEEE C57.110-1986 da tanımlanmıştır, IEEE Nonsinüsoidal Yük Akımlarıyla Beslemede Transformatör Kabiliyetini belirlemek için uygulama yapılmasını tavsiye etmektedir. Bu standart, aşağıdaki formülü vermektedir :

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL} \quad (4.1)$$

Burada,

P_{LL} : Toplam yük kaybı,

P_{EC} : Sargı fuko akımı kayıpları,

I^2R : Joule kayıplarını

P_{OSL} : Bağlantı noktaları, çekirdek ve yapısal elemanlardaki diğer kaçak kayıplarını ifade etmektedir.

Ayrıca bu eşitlik per unit olarak da yazılabilir:

$$P_{LL}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad (4.2)$$

Burada,

- $P_{LL}(pu)$: Yük kaybı yoğunluğunun pu değeri,
- $P_{EC-R}(pu)$: Anma koşulları altındaki sargılarda fuko akımı kaybının pu değeri,
- $P_{OSL-R}(pu)$: Anma koşulları altındaki diğer kaçak kayıpların pu değerini belirtmektedir.

Per Unit Kayıplar : Harmonikli yük altında en büyük problem sargılardaki aşırı ısınma olduğundan, sargılardaki kayıp yoğunluğunu per unit cinsinden dikkate almak uygun olur. Böylece anma yükü koşullarında uygulanan eşitlik 1 per unit cinsinden yukarıdaki şekilde yazılabilir. Anma yükündeki I^2R kaybı bir per unit'tir, ama bu değer nonsinüoidal yük akımları için eğer nonsinüoidal yük akımının rms (efektif) değeri bir per unit'ten farklı ise değişebilir.

Toplam kayıp formülündeki tüm bileşenlerin incelenmesi harmoniklerin toplam yük kayıplarını nasıl etkilediğini açıklamaya yardımcı olur.

Harmonikler, I^2R kayıplarını toplam yük akımını (I) arttırmak suretiyle artırırlar. Bunun nedeni temel bileşen akımına harmonik bileşen akımlarının eklenmesidir. Yük akımının (efektif) değeri aşağıdaki formülle belirlenir:

$$I = \left[\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h)^2 \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

Burada,

- I : Yük akımının efektif değeri
- h : Harmonik bileşeni (1,2,3,...)
- I_h : Harmonik bileşen yük akımını göstermektedir.

Bu eşitlik per unit cinsinden de yazılabilir:

$$I(\text{pu}) = \left[\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h(\text{pu}))^2 \right]^{1/2} \quad (4.4)$$

Harmonikler fuko akımı kayıplarını arttıırırlar. Fuko akımı kayıpları yük akımının ve harmonik frekansının karesi ile orantılıdır. Eğer büyük harmonikli yük akımları oluşursa bu kayıplar aşırı sargı kayıplarına ve ısınmaya neden olabilir. Fuko akımı kayıplarına transformatör çekirdeği dışındaki kaçak manyetik akı tarafından meydana getirilen fuko akımları neden olmaktadır. Fuko akımları yük akımlarına dikey olarak akarlar. Harmoniklerin neden olduğu yükseltilmiş akı yoğunluğu daha fazla manyetik akı ve fuko akımı kayıplarına neden olmaktadır. Aşağıdaki formül fuko akımı kayıpları ve harmonikler arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır:

$$P_{EC}(\text{pu}) = P_{EC-R}(\text{pu}) \left[\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h(\text{pu}) \cdot h)^2 \right] \quad (4.5)$$

P_{EC} : Harmonikli yük akımlarında sargılarda meydana gelen fuko akımı kayıpları

P_{EC-R} : Transformatör sargıları anma koşulları altındaki fuko akımı kayıplarını belirtmektedir.

Harmonikler aynı zamanda, çekirdek, kenetleme noktaları ve yapısal bölümlerdeki diğer sargı kayıplarını da (P_{OSL}) etkilemektedir.

Eğer sargı kayıpları (diğer kaçak kayıplar) ihmal edilirse, harmonikli akım koşullarındaki per-unit toplam yük kaybı P_{LL} aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$P_{LL}(\text{pu}) = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(\text{pu})^2 + P_{EC-R}(\text{pu}) \left[\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h(\text{pu}) \cdot h)^2 \right] \quad (4.6)$$

ANSI/IEEE C57.110-1986 da tanımlanan yük kayıplarındaki harmonik etkisine ek olarak, deri-etkisinin neden olduğu yükseltilmiş kayıplar vardır. Normalde, transformatör iletkeni 50 Hz de akım taşıdığı zaman, akım iletkenin iç bölgesinde sınırlandırılmıştır. Bu harmoniklerin yükseltilmiş frekanstaki durumu değildir. Bunun yerine, harmoniklerin yükseltilmiş frekansı

sonucu akım iletkenin yüzeyinden akmaya başlar. Bu olaya deri-etkisi denir ve kayıpların artması ile aşırı ısınmalara neden olur. Bunun nedeni iletkenin yüzeyindeki direncin içindeki dirençten daha büyük olmasıdır. Bu yüzden, iletkenin yüzeyinden deri-etkisi dolayısıyla daha fazla akım geçer, iletkenin direnç kayıpları ve ısınma artar. Deri-etkisinden dolayı olan kayıplara çoğu kez nötr iletkeninden akan üçüncü harmonik (150 Hz) akımlar neden olmaktadır.

Yüksüz Kayıplar : Harmonik bileşenli gerilimler transformatörler yüksüz iken transformatörün histeresis kayıplarını arttırmalar. Akı yoğunluğu, çekirdekteki mıknatıslanma ve mıknatıslılığın giderilmesinin değişme oranlarını yükselterek buna neden olurlar. Bu yüzden akı yoğunluğu ve değişim oranı uygulanan gerilimin frekansı ile doğru orantılıdır. Frekans arttığında, akı yoğunluğu ve değişim oranı artar. Yükseltilmiş akı yoğunluğu mıknatıslanma ve histeresis kayıplarına karşı direnci artırır. Çekirdekte değişim oranının yükselmesi çekirdeği mıknatıslanmak için daha fazla enerji gereksinimine ve ayrıca histeresis kayıplarının artmasına neden olur.

4.3 K-Faktörü

K faktörü harmoniklerin transformatörün yüklenmesi ve kayıpları üzerindeki etkilerini hesaplamak için geliştirilmiş bir sabittir. K faktörü ANSI/IEEE C57.110-1986 da ifade edilmemiş, fakat ANSI/IEEE C57.110-1986 K-faktör değeri için temel olan belirli bir harmonik yükde kayıpların ve akımların toplanması için metotlar vermiştir. Bu standart yağlı transformatörlerle (liquid-immersed transformers) yapılan uygulamalar için tasarlanmış olmakla beraber bu standartta verilen K faktörü, kuru tip transformatörlerde de bir hata payı ile de olsa kullanılmaktadır.

K-faktör oranının amacı, transformatörleri harmonik bileşenlere göre sınıflandırmak, deri-etkisi kayıplarını azaltmak ve çekirdekteki doymayı azaltmaktır. K-faktör oranlı transformatörlerin üzerindeki etikette, belirli bir K faktörü ile nonsinüsoidal akım yükleri için tasarladıklarını gösteren bir not vardır. K faktörü aşağıdaki formülle tanımlanır:

$$K = \frac{\sum (I_h \cdot h)^2}{\sum (I_h)^2} \quad (4.7)$$

Formülden görülebileceği gibi, K faktörü her bir harmonik akımının karesi ile harmonik derecesinin karelerinin çarpımının toplamı ve harmonik akımının karelerinin toplamına bölümü ile bulunur. Bu toplam, harmoniklere bağlı olarak yükseltilmiş fuko akımı kayıplarını bulmak için anma değeri verilmiş fuko akımı kayıpları ile çarpılır.

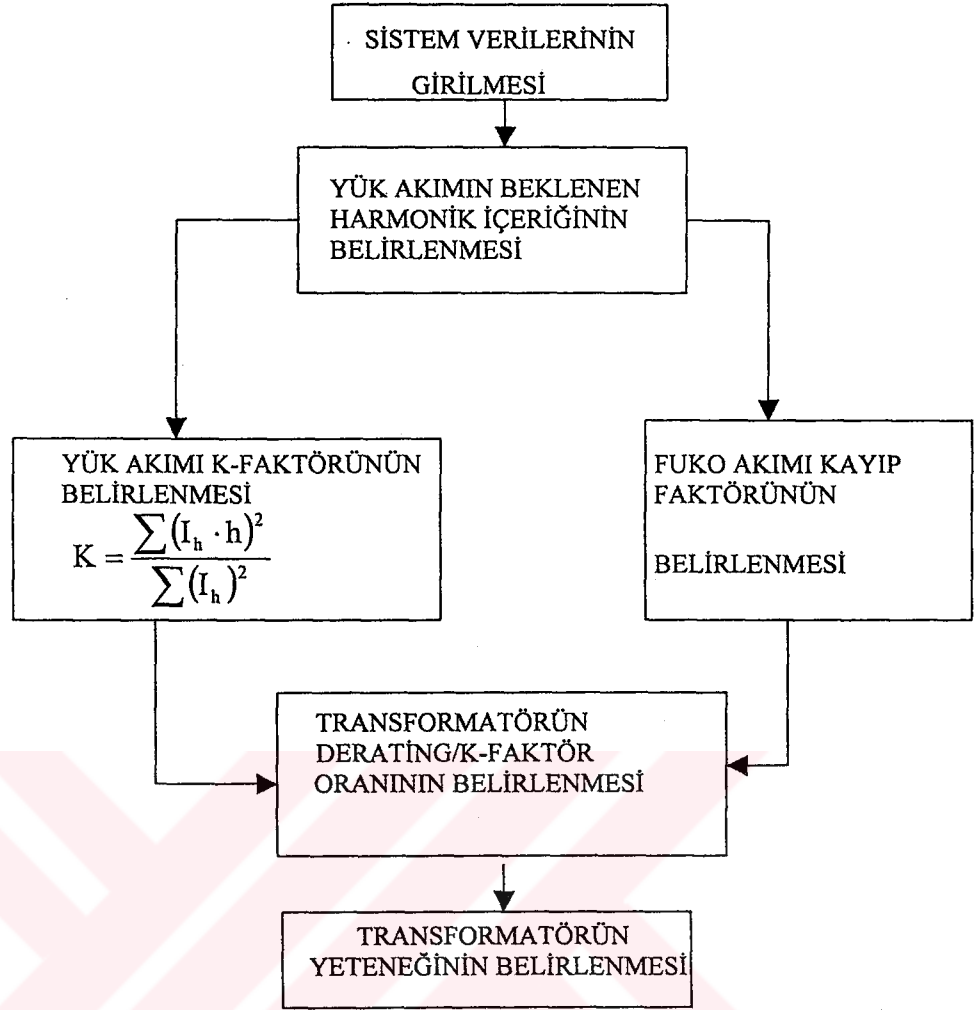
4.3.1 K Faktörü'nün Hesaplanması

Transformatörlerin K faktörünün hesaplanmasının adımları Şekil 4.1'deki akış diyagramında verilmiştir. Bu akış diyagramında, standart bir transformatörün anma değerini düşürmek için kullanılan K-faktörünü belirlemek veya K-faktörlü transformatörün anma değerini düşürmek için dört adım kullanılabilir (Kennedy, 1998):

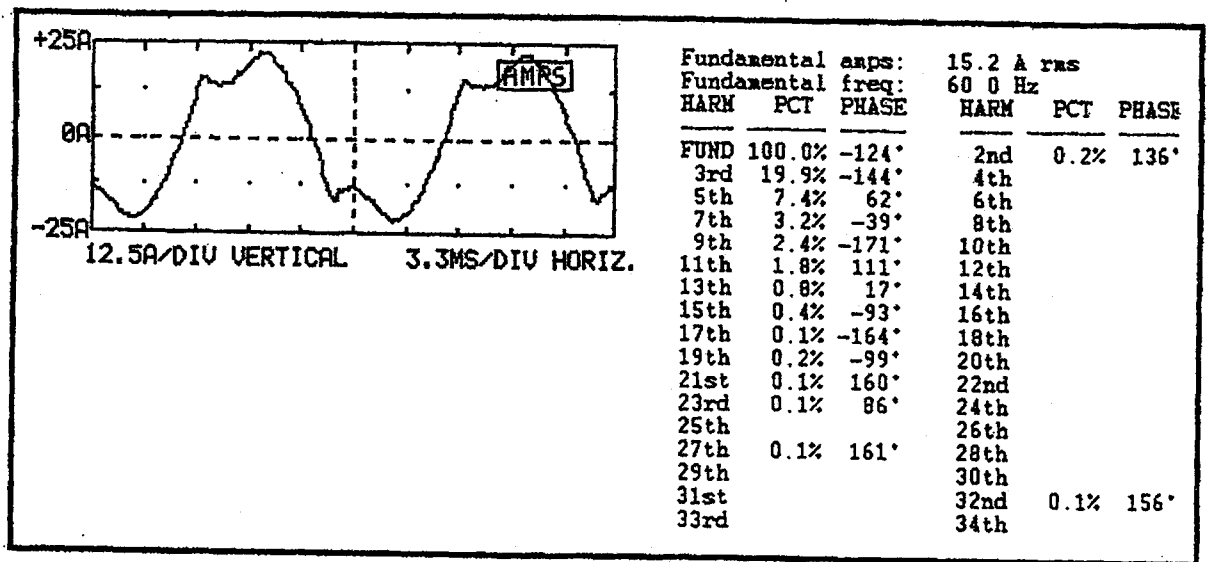
1. Adım: Bu adımda, harmonik derecesini ve toplam yük akımına karşılık gelen harmonik içeriğinin yüzdesini belirlemek önemlidir. Bu gerçek harmonik ölçümleriyle veya değişik harmonikli yükler için dalga şekillerinin karakteristikleri kullanılarak belirlenebilir. Tipik harmonik yükleri için dalga şekilleri ve bunların harmonik içeriklerinin değerleri çeşitli kaynaklarda verilmiştir. Bu değerler ölçümler vasıtasıyla bulunabilir. Transformatör empedansı yük akımının dalga şeklini ve harmonik içeriğini etkileyebilir. Bunun nedeni transformatör empedansının harmonik içeriğini azaltmak için filtre endüktansı gibi çalışmasıdır.

2. Adım: K faktörü $K = \frac{\sum (I_h \cdot h)^2}{\sum (I_h)^2}$ eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. Çizelge 4.1'deki değişik harmonik koşullarındaki K faktörü değerleri hesaplanabilir. Bu tablo işleme sayfası bilgisayar programı olarak yapılandırılabilir. I_h akımı h. harmonik bileşeninin yük akımının per-unit değeridir.

3. Adım: Transformatörün fuko akımı kayıp faktörünün belirlenmesi adımdır. Transformatör fuko akımı kayıp faktörü, transformatörün fuko akımı ile oluşan kayıplarının seviyesini belirtir. Bu değerler transformatör tasarımcısından, transformatör test verilerinden ve C57.110 yönteminden veya transformatör tipi ve büyüklüğüne dayanan tipik değerlerden elde edilebilir. Çizelge 4.2'de transformatör anma değerine göre fuko akımının kayıp değerleri yüzde olarak verilmiştir.



Şekil 4.1 : K-faktörü ve transformator anma değerinin düşürülmesinin hesaplanmasına ait akış diyagramı



Şekil 4.2 : Floresan aydınlatma yükü için akım dalga şekli ve harmonik spektrumu(Kennedy, 1998)

4. Adım: Maksimum akımın hesaplanması : 3. adımda hesaplanan fuko akımı kayıp faktörü ile 2. adımda hesaplanan yük akımı için K faktörü kullanılarak transformatörün anma değerinin ne kadar düşürülebileceğinin hesaplanması aşağıdaki formül yardımı ile yapılabilir :

$$I_{\max}(\text{pu}) = \sqrt{\sum I_h^2} = \sqrt{\frac{1 + P_{\text{EC-R}}}{1 + K \cdot P_{\text{EC-R}}}} \quad (4.8)$$

Burada,

$P_{\text{EC-R}}$: transformatör sargısının, anma değeri verilmiş koşullarda fuko akımı kayıp faktörünü belirtmektedir. Bu faktör hesaplanarak veya ilgili tablolar kullanılmak suretiyle iki şekilde tespit edilebilmektedir:

4.3.2 Hesaplama Yoluyla $P_{\text{EC-R}}$ 'nin Belirlenmesi

4.3.2.1 Ulaşılabilir Onaylanmış Test Raporları Kullanarak Transformatör Kabiliyet Eşdeğerinin Hesaplanması

Eldeki sınırlı verilerle hesaplama yapabilmek için, emniyet faktörünü yüksek tutmak için dikkate alınması gereken kesin kabuller yapılır. Bu kabuller özel transformatörler için imalatçıdan alınan kılavuz temel alınarak modifiye edilebilir. Bu kabuller (IEEE Recommended Practice For Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents, ANSI/IEEE C57.110-1986):

- 1-) Onaylanmış test raporu ANSI/IEEE C57.12.90-1987 veya ANSI/IEEE C57.12.91-1979'a göre eklerdeki bütün veri listelerini içermelidir.
- 2-) Tüm kaçak kayıplar sargılardaki fuko akımı kaybı olarak farz edilebilir.
- 3-) $I^2.R$ kaybı her bir sargıya eşit dağılmış kabul edilir.
- 4-) Sargılar arasındaki fuko-akımı kaybı oranı aşağıdaki gibi kabul edilir:
 - (a) Tüm transformatörler 1000 amper'den küçük kendi kendine soğuyan (self-cooled) akım anma değerine sahiptir, 60% iç sargılarda ve 40% dış sargılarda.
 - (b) 60% iç sargılarda, 40% dış sargılarda, tüm transformatörler 4:1 veya daha küçük sarım oranına sahiptir.

(c) % 70 iç sargılarda ve % 30 dış sargılarda tüm transformatörler için sarım oranı 4:1 den büyüktür ve ayrıca 1000 amper den büyük kendi kendine soğuyan (self-cooled) akım anma değeri ile bir veya daha fazla sargı mevcuttur.

5-) Her bir sargıdaki fuko-akımı kaybı dağılımının uniform olmadığı kabul edilir.

Maksimum fuko-akımı kayıp yoğunluğunun sargının en sıcak noktası olan bölgede olduğu kabul edilir ve ortalama fuko-akımı kayıp yoğunluğunun % 400 olduğu farz edilir.

4.3.2.2 Hesaplamalar

ANSI/IEEE C57.12.90-1987 ve ANSI/IEEE C57.12.91-1979'da kanıtlandığı gibi, yük kaybının kaçak kayıp bileşeni transformatörün ölçülen toplam kaybından $I^2.R$ kaybı çıkarılarak hesaplanır. Bu bölümdeki Kabul (2)'yi dikkate alınız. Bu nedenle:

$$P_{EC-R} = P_{LL} - C \cdot [(I_{1-R})^2 \cdot R_1 + (I_{2-R})^2 \cdot R_2] \quad \text{Watt} \quad (4.9)$$

burada, tek-fazlı transformatörler için $C = 1$, üç-fazlı transformatörler için $C = 1.5$ alınır. (ANSI/IEEE C57.12.91-1979)

Not 1 : Bir çok test raporu üç-fazlı transformatörler için üç-faz direncini seriler halinde gösterir. Bu durumlarda R_1 ve R_2 için değerler aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

Üçgen sargıda: R_1 veya $R_2 = \text{üç-faz direncinin } 2/9'u$

Yıldız sargıda: R_1 veya $R_2 = \text{üç-faz direncinin } 2/3'ü$

Alçak-gerilim sargılarındaki fuko-akımı kaybı Eşitlik 4.9'da belirlenen P_{EC-R} değerinden hesaplanabilir, (ya $0.6P_{EC-R}$ watt yada $0.7P_{EC-R}$ watt gibi) bu değer transformatör sarım oranı ve anma akımına bağlıdır. Alçak gerilim sargılarındaki fuko-akımı kaybının per unit değeri ($P_{EC-R}(pu)$) anma yükündeki $I^2.R$ kaybı per unit değeri,

$$P_{EC-R}(pu) = \frac{0.6P_{EC-R}}{C \cdot (I_{2-R})^2 \cdot R_2} \quad pu \quad (4.10)$$

veya

$$P_{EC-R} (pu) = \frac{0.7P_{EC-R}}{C \cdot (I_{2-R})^2 \cdot R_2} \text{ pu} \quad (4.11)$$

Kabul (3)'ten dolayı yukarıdaki $I^2 \cdot R$ kaybının sargılara eşit olarak dağıldığı kabul edilir ve Kabul (5)'ten maksimum fuko-akımı kayıp yoğunluğu ortalama değerin % 400 olduğu kabul edilerek, şu şekilde hesaplanabilir:

$$\max P_{EC-R} (pu) = \frac{2.4P_{EC-R}}{C \cdot (I_{2-R})^2 \cdot R_2} \text{ pu} \quad (4.12)$$

veya

$$\max P_{EC-R} (pu) = \frac{2.8P_{EC-R}}{C \cdot (I_{2-R})^2 \cdot R_2} \text{ pu} \quad (4.13)$$

4.3.3 Tablolar Kullanılarak P_{EC-R} 'nin Belirlenmesi

Bu konuda yapılan araştırmalar sonucunda çeşitli değerler elde edilmiş olup Çizelge 4.2'de P_{EC-R} 'nin değerleri çeşitli tip ve güçteki transformatörler için verilmiştir.

Çizelge 4.1 : K Faktörünün hesabına ilişkin çizelge ((Kennedy, 1998)

Harmonik bileşeni (h)	Frekans f (Hz)	I (pu)	I^2 (pu)	$I(pu)^2 \cdot xh^2$
1	50			
3	150			
5	250			
7	350			
9	450			
11	550			
13	650			
15	750			
17	850			
19	950			
21	1050			
23	1150			
25	1250			

Çizelge 4.2 : Transformatör anma değeri düşümü hesapları için kullanılan P_{EC-R} için tipik değerler (Kennedy, 1998)

Tip	kVA	Gerilim	% P_{EC-R}
Kuru Tip (Dry)	≤ 1000	480-V	% 3-8
	≥ 1500	5-kV	% 12-20
Yağlı (Oil-filled)	≥ 1500	15-kV	% 9-15
	≤ 1000	480 V	% 1
	2500-5000	tanımlanmamıştır	% 1-5
	> 5000	tanımlanmamıştır	% 9-15

4.4 K-Faktörünü Hesaplama Yöntemleri

Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilmiş iki önemli yöntem vardır.

4.4.1 UL (Underwriter's Laboratories) Yöntemi

UL yöntemi, transformatörün anma efektif (rms) akımını temel alır, genellikle efektif (rms) akımı ölçüldüğünde kullanılır. UL yöntemi aşağıdaki gibi tanımlanır [1]:

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} I_h(\text{pu})^2 \cdot h^2 \quad (4.14)$$

h : Harmonik bileşenini,

$I_h(\text{pu})$: pu olarak, h . harmonik bileşen akımını ifade etmekte olup bu akım değeri, harmonik bileşen akımının (I_h) transformatörün nominal akım değerine (I) bölünmesi sonucu belirlenmektedir.

$$I_h(\text{pu}) = I_h / I \quad (4.15)$$

4.4.2 Normlaştırılmış Yöntem

Normlaştırılmış yöntem yük akımının temel frekanstaki bileşenini referans alır. Harmonik analizörünün çıkış harmoniklerinin değerleri çoğunlukla temel akıma bağlı per-unit değerler olduğundan normlaştırılmış yöntemin kullanımı daha pratik olmaktadır. Normlaştırılmış yöntemde K faktörü şöyle tanımlanmaktadır [1]:

$$K = \frac{\sum I_h^2 \cdot h^2}{\sum I_h^2} \quad (4.16)$$

Burada I_h , h. harmonik bileşenine ait temel akımın per-unit değeri olup harmonik bileşen akımının (I_h) temel bileşen akımına (I_1) bölünmesi ile elde edilir.

$$I_h \text{ (pu)} = I_h / I_1 \quad (4.17)$$

4.4.3 Her İki Yöntem Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar

4.4.3.1 UL Yöntemi ile Yapılan Hesaplama

Çizelge 4.3 : UL yöntemi ile K-faktörü hesabını gösteren çizelge [1]

Harmonik	$I_h(\text{pu})$ (ölçülen)	$I_h(\text{pu})^2$	h^2	$I_h(\text{pu})^2 \cdot h^2$
1	0.72	0.52	1	0.52
3	0.52	0.27	9	2.43
5	0.31	0.10	25	2.40
7	0.25	0.06	49	3.06
9	0.15	0.02	81	1.82
11	0.07	0.00	121	0.59
13	0.05	0.00	169	0.42
K-faktör = 11.24				

4.4.3.2 Normlaştırılmış Yöntem ile Yapılan Hesaplama

Çizelge 4.4 : Normlaştırılmış yöntem ile K-faktörü hesabını gösteren çizelge [1]

Harmonik	$I_h(\text{pu})$ (ölçülen)	$I_h(\text{pu})^2$	h^2	$I_h(\text{pu})^2 \cdot h^2$
1	1.00	1.00	1	1.00
3	0.72	0.52	9	4.69
5	0.43	0.19	25	4.63
7	0.35	0.12	49	5.91
9	0.21	0.04	81	3.52
11	0.10	0.01	121	1.14
13	0.07	0.00	169	0.82
		$\sum I_h(\text{pu})^2 = 1.88$		$\sum I_h(\text{pu})^2 \cdot h^2 = 21.71$
K-Faktör = $21.71/1.88 = 11.54$				

Yukarıda görüldüğü gibi her iki yöntem de yaklaşık olarak aynı değerleri vermektedir. K-Faktör değeri yaklaşık olarak 11 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, ulaşılabilir en yakın bir sonraki değer olan K-Faktör = 13 değeri seçilmelidir. Ulaşılabilir K-Faktör anma değerli transformatörler Çizelge 4.5'te verilmiştir:

Çizelge 4.5 : Kuru-tip transformatörler için ulaşılabilir K-Faktörlü transformatörler [1]

K-Faktör	Yorumlar ve Tipik Uygulamalar
1	Harmonik faktörü 0.05'ten küçük olan sinüsoidal yük uygulamaları için Normal Transformatör
4	Kaynak makinaları ve indüksiyon ısıtıcıları, HID ve Floresan aydınlatma
9	Ulaşılabilir değildir, özel olarak dizayn edilir
13	Telekomünikasyon donanımı, okullar ve sağlık tesisleri
20	Bilgi işlem donanımları, ayarlanabilir hızlı sürücüler
30	Geniş aralıkta
40	Geniş aralıkta
50	Geniş aralıkta

BÖLÜM 5

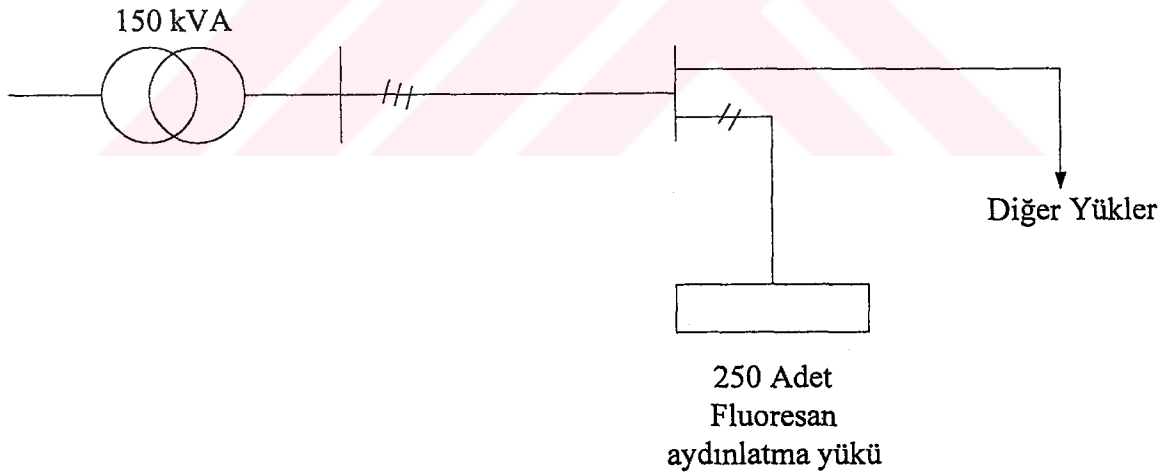
5. SAYISAL UYGULAMA

Nonlineer yüklerle yüklenen transformatörlerin anma değerindeki değişimi belirlemek için yapılacak K-faktörü hesaplamaları için iki sayısal uygulama gerçekleştirilmiştir. Sayısal uygulamalar tabloların kullanımı ve hesaplama yoluyla olmak üzere iki şekilde yapılmıştır.

5.1 Sayısal Uygulama 1

P_{EC-R} Değeri Tablolardan Alınarak Yapılan, K-Faktörü ve Transformatör Anma Değeri Düşümünün Belirlenmesi

Toplam gücü 100 kW olan bir tesiste bir fazdan beslenen 250 adet floresan aydınlatma yükü bulunmaktadır (Şekil 5.1). Bu güç 150 kVA'lık bir transformatörden sağlanmaktadır. Bu transformatörün K-Faktörü'nü ve transformatörün anma değerindeki düşümü hesaplayalım.



Şekil 5.1 : K-Faktörü hesaplanan örnek sistem

Bu tür sistemleri çözmek için, birinci adım olarak uygulanan yüklerin harmonik içeriklerinin yani harmonik spektrumunun bilinmesi gerekir. Harmonik bileşenler ölçüm yoluyla belirlenebilir veya daha önceden hesaplanarak verilmiş olabilir. Bu veriler Bölüm 4'te örnek olarak verilen Çizelge 4.1'de yerine konulmak suretiyle yapılan hesaplamalardan K-Faktörü değeri belirlenir. I_{max} formülünden faydalanılarak K-Faktörlü transformatör kullanılmayacak

ise kullanılan normal tip transformatörün anma değerinin ne kadar düşürülmesi gerektiği hesaplanabilir.

Birinci adımda floresan yüklerin harmonik içerikleri Şekil 4.2'den belirlenir. Daha sonra bu değerler Çizelge 4.1'e girilir. K-Faktörü ve anma değerinin ne kadar düşürülmesi gerektiği aşağıdaki çizelge yardımıyla hesaplanır.

Çizelge 5.1 : Örnek sistem için K-faktörünün hesaplanması

Harmonik bileşeni (h)	Akım (%)	Frekans (Hz)	Akım (pu)	$I_h(\text{pu})^2$	$I_h(\text{pu})^2 \cdot h^2$
1	100.0	50	1	1	1
3	19.9	150	0.19	0.036100	0.3249
5	7.4	250	0.074	0.005476	0.1369
7	3.2	350	0.032	0.001024	0.050176
9	2.4	450	0.024	0.000576	0.046656
11	1.8	550	0.018	0.000324	0.039204
13	0.8	650	0.008	0.000064	0.010816
15	0.4	750	0.004	0.000016	0.0036
17	0.1	850	0.001	0.000001	0.000289
19	0.2	950	0.002	0.000004	0.001444
21	0.1	1050	0.001	0.000001	0.000441
23	0.1	1150	0.001	0.000001	0.000529
25	0.1	1250	0.001	0.000001	0.000625

Çizelgedeki en son iki sütundaki değerlerin toplamı sonucu

$$\sum I_h(\text{pu})^2 = 1.043588$$

$$\sum I_h(\text{pu})^2 \cdot h^2 = 1.61558$$

elde edilir.

Bu değerlerden K faktörü

$$K = \frac{\sum I_h(\text{pu})^2 \cdot h^2}{\sum I_h(\text{pu})^2} = \frac{1.61558}{1.043588} = 1.5481$$

olarak hesaplanır.

Eğer K-faktörlü transformatör kullanılacak ise bulunan K-faktörü değerine sahip transformatör imal ettirilmelidir eğer imal edilmiş standart K faktörlü transformatör kullanılacak ise ulaşılabilir en yakın bir sonraki değer olan K-faktör = 4 değerine sahip transformatör seçilmelidir. (Ulaşılabilir K-faktör anma değerli transformatörler Çizelge 4.5'te verilmiştir genellikle bulunan K-faktör değeri için transformatör imal ettirmenin maliyeti yüksek olduğu için ulaşılabilir en yakın bir üst değerdeki transformatörler kullanılır).

Transformatörün yüklenebileceği en yüksek akım değerinin ($I_{\max}$) hesaplanması için P_{EC-R} değeri gereklidir. P_{EC-R} değeri Çizelge 4.2'den alınır. $P_{EC-R} = \%3 - \%8$ olduğundan en yüksek değere göre hesap yaparak en olumsuz hali göz önüne almalıyız. Bu nedenle $P_{EC-R} = 0.08$ olarak alınır. Böylece,

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K \cdot P_{EC-R}}} = \sqrt{\frac{1 + 0.08}{1 + 1.5 \cdot 0.08}} = 0.98$$

olarak belirlenmiş olur. Buradan şu sonuç çıkarılabilir:

Eğer normal transformatör kullanılacak ise transformatör anma değeri %98'e düşürülmelidir yani 150 kVA'lık transformatör en fazla 147 kVA'lık bir yükleme için kullanılabilir. Çizelge 5.2'de bu durum özetlenmiştir.

Çizelge 5.2 : Lineer ve nonlinear yüklü durum için transformatör değerleri

	Lineer Yük Durumunda	Nonlinear Yük Durumunda
Güç	150 kVA	147 kVA
$I_{\max}(\text{pu})$	1	0.98
Transformatör	Normal	K= 1.5481

5.2 Sayısal Uygulama 2

P_{EC-R} Değeri Hesap Yolu ile Belirlenerek Yapılan, K-Faktörü ve Transformatör Anma Değeri Düşümünün Belirlenmesi

ANSI/IEEE C57.12.01-1979 referansında verilmiş bulunan bir nonlineer yüke ait nonsinüsoidal yük akımı, Çizelge 5.3'deki harmonik bileşenlerine sahip olduğunda bu yükün beslendiği onaylanmış test raporundan alınan aşağıdaki karakteristiklere sahip transformatörden sürekli çekilebilecek maksimum yük akımını ve K-faktörü değerini belirleyelim.

Çizelge 5.3 : Yük akımına ait harmonik bileşenler (IEEE Recommended Practice For Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents, ANSI/IEEE C57.110-1986)

h	$I_h(\text{pu})$
1	1.0
5	0.175
7	0.110
11	0.045
13	0.029
17	0.015
19	0.010

Transformatörün karakteristik değerleri şöyledir:

- 3 fazlı 2500 kVA
- Yüksek-Gerilim Sargısı : 12 kV, Δ , 170 °C'de $R = 3.8150 \Omega$
- Alçak-Gerilim Sargısı : 480 Volt, Δ , 170 °C'de $R = 0.00411 \Omega$
- 170 °C'taki yük kaybı = 31232 Watt
(* Dirençler üç fazın toplamı)

R_1 ve R_2 değerleri Bölüm 4.3.2.2'deki Not 1 kullanılarak,

$R_1 = 0.84778 \text{ ohm}$ ve $R_2 = 0.0009133 \text{ ohm}$ olarak belirlenir.

Primer ve sekonder devredeki akım değerleri

$I_{1-R} = 120.28$ amper ve $I_{2-R} = 3007$ amper olarak hesaplanır.

Transformatörün fuko kaybı (P_{EC-R}) 4.9'nolu eşitlik kullanılarak,

$$P_{EC-R} = P_{LL} - C \cdot [(I_{1-R})^2 \cdot R_1 + (I_{2-R})^2 \cdot R_2]$$

$$\begin{aligned} P_{EC-R} &= 31232 - 1.5 \cdot [(120.28)^2 \cdot (0.894778) + (3007)^2 \cdot (0.0009133)] \\ &= 447 \text{ Watt} \end{aligned}$$

olarak hesaplanır.

Transformatör sarım oranının 4:1'i ve sekonder akımın 1000 amper'i aştığı durumlarda, alçak-gerilim sargısının fuko-akımı kaybı (P_{EC-R}) ve en büyük fuko-akımı kaybının ($P_{EC-Rmax}$) 0.7 katı 4.13'nolu eşitlikten aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$P_{EC-Rmax} = \frac{2.8 \cdot 447}{1.5 \cdot 8258.6} = 0.101 \text{ pu}$$

olarak elde edilir. Eşitlik 4.6'dan $P_{LL}(pu)$ 'nın hesaplanması Çizelge 5.4 ile gerçekleştirilir.

Çizelge 5.4 : $P_{LL}(pu)$ 'nın hesaplanması (IEEE Recommended Practice For Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents, ANSI/IEEE C57.110-1986)

h	$I_h(pu)$	$I_h(pu)^2$	h^2	$I_h(pu)^2 h^2$
1	1.000	1.000	1	1.000
5	0.175	0.0306	25	0.765
7	0.110	0.0121	49	0.593
11	0.045	0.002025	121	0.245
13	0.029	0.000841	169	0.142
17	0.015	0.000225	289	0.065
19	0.010	0.000010	361	0.036
		1.045826		2.846

Tablodaki üçüncü kolonun toplamının Eşitlik 4.4'e uygulanması 1.023 pu'lık nonsinüsoidal yük akımının efektif değerini verir. Eşitlik 4.6'dan en yüksek fuko-akımı kaybı bölgesindeki nonsinüsoidal yük akımı tarafından oluşturulan yerel kayıp yoğunluğu elde edilebilir:

$$P_{LL}(\text{pu}) = \sum I_h(\text{pu})^2 + P_{EC-R}(\text{pu}) \left[\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h(\text{pu}) \cdot h)^2 \right]$$

$$P_{LL}(\text{pu}) = 1.0458 + 0.101 \cdot 2.846 = 1.333 \text{ pu}$$

Böylece, Eşitlik 4.8'den, verilen harmonik kompozisyonu ile nonsinüsoidal yük akımının izin verilebilir maksimum efektif değeri,

$$I_{\max}(\text{pu}) = \left[\frac{1.101}{1 + \frac{2.846}{1.0458} \cdot 0.101} \right]^{1/2} = 0.9293$$

veya

$$I_{\max} = 0.9293 \cdot 3007 = 2794 \text{ amper}$$

olarak elde edilir.

Bu durumda verilen nonsinüsoidal yük akımı kompozisyonu için transformatörün yüklenebilirliği sinüsoidal yük akımındakinin %93'ü dür.

Bu transformatör için K-faktör değerinin hesabında

$$\sum I_h(\text{pu})^2 = 1.045826$$

ve

$$\sum I_h(\text{pu})^2 \cdot h^2 = 2.846$$

Buradan K faktörü

$$K = \frac{\sum I_h(\text{pu})^2 \cdot h^2}{\sum I_h(\text{pu})^2} = \frac{2.846}{1.045826} = 2.7213$$

olarak hesaplanır. Bu sistemde K-faktörlü transformatör kullanılmaya karar verilirse seçilecek değer buna en yakın bir üst K-faktörü değerine sahip (K-faktör = 4) olan transformatör seçilmelidir.

Çizelge 5.5 : Lineer ve nonlinear durumda $I_{\max}(\text{pu})$ ve transformatör değerleri

	Lineer Yüklü Durum	Nonlinear Yüklü durumda
$I_{\max}(\text{pu})$	1	0.93
Transformatör	Normal	K=2.7213

BÖLÜM 6

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Güç sistemlerindeki nonlinear elemanlar, iletim ve dağıtım sistemlerinde önemli bir harmonik kirliliğe sebep olmakta ve enerji kalitesini düşürmektedir. Elektrik enerjisine olan talebin devamlı artması, daha kaliteli enerji gereğini ve bunu gerçekleştirmek için çeşitli kriterlerin gerekliliğini göstermektedir. Elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımında kalite kavramının bilinmeli ve bu konudaki çalışmalara gereken önem verilmelidir.

Nonlinear yükler, enerji sisteminde gerilimin dalga şeklini bozmaktadır. Enerji sistemlerinde çok sayıda nonlinear yük bulunduğundan, sistemde ve elemanlarda ek kayıplar, harmonik gerilimleri ve THD değerleri yüksek değerlere çıkmaktadır. Bu yüzden, nonlinear yüklerin etkileri olabildiğince azaltılmalıdır.

Bu tezin birinci bölümünde harmonikler genel olarak tanıtılmış ve harmoniklerin analizine yönelik olarak fourier serilerinden nasıl faydalanılacağı anlatılmıştır. İkinci bölümde harmonik kaynağı olan güç sistem elemanları anlatılmış ve harmoniklerin güç sistemini oluşturan elemanlar üzerindeki etkileri açıklanmıştır. Üçüncü bölüm harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkilerini içermektedir.

Dördüncü ve beşinci bölümde transformatörler üzerindeki harmonik etkilerinin olumsuzluklarına çözüm olarak ortaya çıkmış olan K-faktör'lü transformatörler üzerinde durulmuştur. K-faktörü kullanılarak harmonikli şartlarda transformatör yeteneğinin nasıl belirleneceği ve hangi tip transformatör seçilmesi gerektiği belirtilmiştir. Yapılan sayısal uygulamalar ile çeşitli harmonikli yükler altındaki transformatörlerin yeteneğinin belirlenmesi ve hangi tip K-faktör'lü transformatör seçilmesine nasıl karar verileceği yapılan hesaplamalarla gösterilmiştir.

Eğer gerekli önlemler alınmazsa, önümüzdeki yıllarda enerji sistemlerinde harmoniklerin yol açtığı olumsuzlukların etkileri daha çok ortaya çıkacaktır. Bu yüzden enerji sistemindeki elemanlar üzerinden şebekeye geçen harmoniklerin azaltılması için, transformatörler harmoniklerin şebekeye geçmesini önleyecek şekilde dizayn edilmeli, şebekeye bağlantı yaptığı sargıların harmoniklerin şebekeye geçişini engelleyecek şekilde bağlanması

sağlanmalıdır. Daha düşük genlikli ve daha az sayıda harmonik bileşenler içeren yüksek darbe sayılı konverterlerin kullanılması önerilmelidir.

Güç sistemlerinde kullanılan elemanların ve varolan tesislerin harmoniklerin yol açtığı kayıplardan en az etkilenecek şekilde kurulması ve tasarlanması sağlanmalıdır.

Nonlinear yüklerin yoğun olduğu veya ileride yoğun olacağı belirlenen bölgelerde gerekli ölçümler yapıp, şebekenin özellikleri incelenerek, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi harmonik standartları geliştirilmelidir. Akım ve gerilimler için THD, TDD, HD_V ve HD_I değerleri için standartlar getirilmelidir.

Nonlinear yüklerin bulunduğu tesislerin, daha önceden standartlaştırılacak harmonik filtreleri kullanmaları sağlanmalıdır.

Nonlinear yüklerin transformatörlerde meydana getirdiği ek ısınma, gürültü gibi nedenlerle transformatörlerin olumsuz etkilenmeleri transformatörlerde verimin azalmasına ve finansal kayıplara yol açmaktadır. Bunların önlenmesi bakımından K-faktörü'nün ve K-faktör'lü transformatörlerin kullanılması yaygın hale getirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Arrillaga, J., Bradley, D.A. ve Bodger, P.S., (1985), Powre System Harmonics, John Wiley & Sons, Norwich.
- Arnold, A.H.M., (1938), AC Resistance of Hollow Square Conductors, Jour. Vol.82.
- Boduroğlu, T., (1988), Elektrik Makinaları Dersleri-I, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.
- Chang, C., (1998), “ Harmonics Theory”, Tutorial on Harmonics Modelling and Simulation, IEEE Power Engeneering Society.
- Çakır, H., (1985) Elektrik Şebeke Kayıpları, Y.T.Ü., İstanbul.
- Dommel, H.W., Yan, A. and Wei, S., (1986), Harmonics from Transformer Saturation, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRD-1, No.2.
- Dugan, R.C., McGranaghan, M.F. ve Beaty, H.W., (1996), Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill.
- Dungan, R.C., McGranagham, M.F. ve Beaty, H.W., (1996), Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill.
- Emanuel, A.E. ve Wang., X., (1985), “Estimation of Loss of Power Transformer Supplying Nonlinear Loads”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS 104.
- Emanuel, A.E., (1990), Powers in Nonsinusoidal Situations a Review of Definitions and Physical Meaning, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-, No.3.
- Emanuel, A.E. ve Czarnecki, L.S., (1990), “Power Componenets in a System with Sinusoidal and Nonsinusoidal Voltage and/or Currents”, IEE Proc..
- Emanuel, A.E., (1993), “Apparent and Reactive Powers in Three-Phase Systems: in Search of a Physical Meaning and a Better Resolution”, Eup. Trans. on Electric Power.
- Filipski, P.S., ve Labaj, P.W., (1992), “Evaluation of Reactive Power Meters in the Presence of High Harmonic Distortion”, IEEE Trans. on Power Delivery, 7.
- Grady, W.M., (1983), Harmonic Power Flow Studies, Ph. D. Thesis, Purdue University (U.S.A.).
- Grady, W.M., ve Heydt, G.T., (1985), “Prediction of Power System Harmonics due to Gaseous Discharge Lightning”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 97.
- Grady, W.M., Gilleskie, R.J., (1993), “Harmonics and How They Relate to Power Factor”, Proceedings of PQA93, San Diago.
- IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1983), “Power Systems Harmonics: An Overview”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS 102.

IEEE Recommended Practice For Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents, (1986), ANSI/IEEE C57.110-1986, New York, USA.

IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, (1993), New York, USA.

Kennedy, Barry W., (1998), Energy Efficient Transformers, McGraw-Hill.

Kerszenbaum, I., Mazur, A., Mistry, M. ve Frank, J., (1991), "Specifying Dry-Type Distribution Transformers for Solid-State Applications", IEEE Transactions on Industry Applications.

Kocatepe, C., (1995), "Sinüsoidal Olmayan Yükleri içeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simulasyonu", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Linden, W.P., (1996), "Transformer Design and Application considerations for Nonsinusoidal Load Currents", IEEE Transactions on Industry Applications.

Ortmeyer, T.H., Chakravathi, K.R., ve Mahmoud, A.A., (1985), "The Effects of Power Systems Harmonics on Power Systems Equipment and Loads", ", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 9.

Richter, R., (1951), Elektrische Maschinen Bd. I. Zweite, Verbesserte Auflage, Verlag Birkhaeuser Basel.

Steinmetz, C.P., (1917), Theory and Calculation on Electrical Circuits, McGraw-Hill.

Sundberg, Y., (1976), The Arc Furnace as a Load on The Network, ASEA Journal, Vol. 49.

Wagner, V.E., ve IEEE Task Force, (1993), "Effects of Harmonics on Equipment", IEEE Trans. on Power Delivery 2.

Yıldırım, D., Fuchs, E.F., (1999), "Measured Transformer Derating and Comparison with Harmonic Loss Factor (F_{HL}) Approach", PE-084-PWRD-0-03-1999, IEEE.

İNTERNET KAYNAKLARI

[1] www.stanleygroup.com, (June 1998), Industry Info.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 08.03.1978

Doğum Yeri Edirne

Lise 1989-1996 Edirne Anadolu Lisesi

Lisans 1997-2001 Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik–Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2001-2003 Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurum

2001-Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü
Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı'nda Arş. Gör.