

85096

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖLÇME VE ANALİTİK YAKLAŞIMIN
BİR ARADA KULLANILMASIYLA
BİR TRANSFORMATÖRÜN PARAMETRELERİNİN
NON-LİNEER BİÇİMDE ELDE EDİLMESİ

Elek. Yük. Müh. Mehmet Salih TACİ

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan

DOKTORA TEZİ
T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tez Savunma Tarihi : 21/04/1999

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Asım KASAPOĞLU (Y.T.Ü.)

Jüri Üyeleri : Prof.Dr. İrfan GÜNEY (M.Ü.)

: Doç.Dr. Özcan KALENDERLİ (İ.T.Ü.)

İSTANBUL, 1999

85096

[Handwritten signatures and initials]

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
GRAFİK LİSTESİ.....	viii
FORMUL LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Tanıtım.....	1
1.2. Önce Yapılan Çalışmalar.....	4
2. TRANSFORMATÖRLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	8
2.1. İdeal Transformatörler.....	8
2.2. Lineer Transformatörler.....	13
2.3. Transformatörün Sinüsoidal Gerilimle Beslenmesi.....	18
2.4. Transformatör Eşdeğer Devre Parametrelerinin Belirlenmesi.....	21
2.4.1. Boşta Çalışma Deneyi.....	22
2.4.2. Kısa devre deneyi.....	22
2.4.3. Sargı dirençlerinin ölçülmesi.....	23
2.5. Transformatörün Fazör Diyagramları.....	24
3. TRANSFORMATÖRLERE SİSTEM YAKLAŞIMI.....	29
3.1. Sinüsoidal Uyarmalı Demir Çekirdekli Endüktanslar.....	29
3.2. Transformatörün Mıknatıslanma Akımı.....	31
3.3. Demir Çekirdekli Transformatör.....	33
3.4. Transformatörün Yükte Çalışması.....	35
3.5. Yüklü Transformatörün Kararlı Hal Sinüsoidal Çalışması.....	37
3.6. Transformatör Kayıplarının İncelenmesi.....	39

3.6.1.	Bakır kayıpları.....	39
3.6.2.	Demir kayıpları.....	39
3.6.3.	Transformatörde kayıpların hesaplanması.....	39
3.7.	Lineer Olmayan Elemanlar.....	42
3.7.1.	Lineer olmayan direnç.....	42
3.7.2.	Lineer olmayan endüktans.....	42
3.7.3.	Demir çekirdek kayıpları.....	44
4.	ŞEBEKED E OLUŞAN PROBLEMLERİN TRANSFORMATÖR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....	45
4.1.	Anlık Gerilim Değişimlerinin Etkileri.....	45
4.1.1.	Gerilimin anlık düşüşü.....	45
4.1.2.	Gerilimin anlık yükselişi.....	45
4.1.3.	Gerilimin kesilmesi.....	46
4.1.4.	Düşük gerilim ve aşırı yüksek gerilim.....	46
4.1.5.	Faz açısı farklılığı.....	46
4.1.6.	Elektriksel gürültü.....	46
4.1.7.	Frekans sapması.....	46
4.1.8.	Gerilim modülasyonu.....	47
4.1.9.	Harmonik bozulması.....	47
4.2.	Harmoniklerle İlgili Temel Bağlıntılar.....	47
4.3.	Harmonik Kaynakları.....	50
4.4.	Harmonik Etkileri.....	51
4.4.1.	Transformatörlerdeki harmonikler.....	53
4.5.	Kondansatör Uygulamaları ve Rezonans.....	55
4.6.	Harmoniklere Bağlı Ek Isınma.....	56
4.7.	Harmoniklere Bağlı Transformatör Arızaları.....	56
4.7.1.	Harmoniklere bağlı manyetik devre arızaları.....	56
4.7.2.	Harmoniklere bağlı elektrik devre arızaları.....	57
4.7.3.	Harmoniklere bağlı yalıtım devresindeki arızalar.....	58
4.8.	Transformatörlerde Harmonik Etkileri.....	58
4.9.	Transformatörlerin Aşırı Yükte Çalışması.....	59

4.9.1.	Yalıtımın yaşanması.....	59
4.9.2.	Sıcak bölgelerin oluşması.....	59
4.9.3.	Transformatörlerin aşırı yüklenmelerinin ömürlerine etkisi.....	60
4.10.	Aşırı Yük Durumunda Sistem Güvenliği.....	61
4.10.1.	Aşırı yük sınırları.....	62
4.10.2.	Aşırı uyarma.....	62
5.	TRANSFORMATÖRÜN LİNEER OLMAYAN PARAMETRELERİNİN ELDE EDİLMESİ.....	63
5.1.	Transformatör Parametrelerinin Analitik Yoldan Hesaplanması.....	63
5.2.	Deney Devreleri Bağlantı Şemaları ve Tablolar (Deneysel Bulgular ve Hesaplama Sonuçları.....	69
5.3.	Deney Cismi Özellikleri.....	98
5.4.	Deneyde Kullanılan Harmonik Analizörün Özellikleri.....	98
5.5.	Çeşitli Kaynaktan Beslenen ve Çeşitli Yüklü Transformatörün Demir..... Oluşan Aktif Kayıplar.....	100
5.6.	Çeşitli Kaynaktan Beslenen ve Çeşitli Yüklü Transformatörün Primer ve..... Sekonder Sargılarında Oluşan Aktif Kayıplar.....	103
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	108
	KAYNAKLAR.....	112
	Ek 1 Program Yazılımı.....	120
	ÖZGEÇMİŞ.....	128

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1	Sinüsoidal kaynaktan beslenen ve lineer yüklü transformatörün temel ve..... harmonik bileşenlerine ait primer gerilim, akım ve empedans değerleri.....	71
Tablo 5.2	Sinüsoidal kaynaktan beslenen ve lineer yüklü transformatörün primer gerilim,... akım ve güç değerleri.....	73
Tablo 5.3	Sinüsoidal kaynaktan beslenen ve lineer yüklü transformatörün temel ve..... harmonik bileşenlerine ait sekonder gerilim, akım ve empedans değerleri.....	74
Tablo 5.4	Sinüsoidal kaynaktan beslenen ve lineer yüklü transformatörün sekonder..... gerilim, akım ve güç değerleri.....	76
Tablo 5.5	Sinüsoidal kaynaktan beslenen ve lineer olmayan yüklü transformatörün temel... ve harmonik bileşenlerine ait primer gerilim, akım ve empedans değerleri.....	78
Tablo 5.6	Sinüsoidal kaynaktan beslenen ve lineer olmayan yüklü transformatörün primer. gerilim, akım ve güç değerleri.....	80
Tablo 5.7	Sinüsoidal kaynaktan beslenen ve lineer olmayan yüklü transformatörün temel... ve harmonik bileşenlerine ait sekonder gerilim, akım ve empedans değerleri...	81
Tablo 5.8	Sinüsoidal kaynaktan beslenen ve lineer olmayan yüklü transformatörün..... sekonder gerilim, akım ve güç değerleri.....	83
Tablo 5.9	Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen ve lineer yüklü transformatörün temel... ve harmonik bileşenlerine ait primer gerilim, akım ve empedans değerleri.....	85
Tablo 5.10	Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen ve lineer yüklü transformatörün..... primer gerilim, akım ve güç değerleri.....	87
Tablo 5.11	Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen ve lineer yüklü transformatörün temel... harmonik bileşenlerine ait sekonder gerilim, akım ve empedans değerleri.....	88
Tablo 5.12	Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen ve lineer yüklü transformatörün..... sekonder gerilim, akım ve güç değerleri.....	90
Tablo 5.13	Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen ve lineer olmayan yüklü transformatörün temel ve harmonik bileşenlerine ait primer gerilim, akım ve empedans..... değerleri.....	92
Tablo 5.14	Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen ve lineer olmayan yüklü..... transformatörün primer gerilim, akım ve güç değerleri.....	94
Tablo 5.15	Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen ve lineer olmayan yüklü transformatörün temel ve harmonik bileşenlerine ait sekonder gerilim, akım ve empedans.....	

değerleri.....	95
Tablo 5.16 Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen ve lineer olmayan yüklü transformatörün sekonder gerilim, akım ve güç değerleri.....	97



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Tek fazlı transformatörün prensip şeması.....	8
Şekil 2.2 $\psi = f(i)$ çevrimi.....	10
Şekil 2.3 İdeal transformatör eşdeğer devresi.....	11
Şekil 2.4 Yük empedansı kaynak tarafına indirgenmiş ideal transformatörün eşdeğer devresi.....	11
Şekil 2.5 Maksimum güç transferi.....	12
Şekil 2-6 Transformatörün ortak ve kaçak akılarının gösterimi.....	13
Şekil 2.7 Lineer transformatörlerde akı-akım karakteristiği ($\phi = f(i)$ veya $B = f(H)$).....	14
Şekil 2.8 Kaçak endüktanslı transformatörün gösterilişi.....	16
Şekil 2.9 İdeal transformatörün primerine paralel bağlı mıknatıslama akımı gösterilişi.....	17
Şekil 2.10 Transformatörün lineer eşdeğer devresi.....	17
Şekil 2.11 Sinüsoidal gerilimle beslenen lineer transformatörün;	20
a) Tam eşdeğer devresi.....	
b) Primere indirgenmiş eşdeğer devresi.....	
c) Sekondere indirgenmiş eşdeğer devresi.....	
Şekil 2.12 Bir transformatörün sekonder büyüklükleri primer tarafına indirgenmiş tam eşdeğer devresi.....	21
Şekil 2.13 Transformatörün boşa çalışma deneyi için eşdeğer devre.....	22
Şekil 2.14 Transformatörün kısa devre deneyi için eşdeğer devre.....	22
Şekil 2.15 Boşa çalışan bir transformatörün fazör diyagramı.....	24
Şekil 2.16 Omik yüklü transformatörün fazör diyagramı.....	25
Şekil 2.17 Endüktif yüklü transformatörün fazör diyagramı.....	26
Şekil 2.18 Kapasitif yüklü transformatörün fazör diyagramı.....	26
Şekil 3.1 Demir çekirdekli endüktans.....	29
Şekil 3-2 Transformatörün blok diyagramı.....	30
Şekil-3.3. Akım, gerilim ve akı ilişkilerini gösteren fazör diyagramı.....	32
Şekil 3-4 Demir çekirdekli endüktans için fazör diyagramı.....	32
Şekil 3-5 İki sargılı transformatör devresi.....	33
Şekil 3-6 İki sargılı transformatörün blok diyagramı.....	34
Şekil 3-7 Yüksüz bir transformatörün blok diyagramı.....	34
Şekil 3-8 Kaçak akıların dikkate alınmasıyla bir transformatörün blok diyagramı.....	37

Şekil 3.9 Lineer olmayan (demir çekirdekli) bobin.....	43
Şekil 5.1 Transformatörün harmonik eşdeğer devresi.....	63
Şekil 5.2 Transformatörün primere indirgenmiş harmonik eşdeğer devresi.....	64
Şekil 5.3 Sinüsoidal kaynaktan beslenen ve lineer yüklü transformatörün primer ve sekonder tarafındaki harmonik akım, gerilim ve güç ölçümü deney devresi bağlantı şeması.....	70
Şekil 5.4 Sinüsoidal kaynaktan beslenen ve lineer olmayan yüklü transformatörün primer ve sekonder tarafındaki harmonik akım, gerilim ve güç ölçümü deney devresi bağlantı şeması.....	77
Şekil 5.5 Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen ve lineer yüklü transformatörün primer ve sekonder tarafındaki harmonik akım, gerilim ve güç ölçümü deney devresi bağlantı şeması.....	84
Şekil 5.6 Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen ve lineer olmayan yüklü transformatörün.... primer ve sekonder tarafındaki harmonik akım, gerilim ve güç ölçümü deney devresi bağlantı şeması.....	91

GRAFİK LİSTESİ

Grafik 5.5 Çeşitli kaynaktan beslenen ve çeşitli yüklü transformatörün demir direncinde..... oluşan aktif kayıplar.....	100
Grafik 5.6 Çeşitli kaynaktan beslenen ve çeşitli yüklü transformatörün primer ve sekonder.... sargılarında oluşan aktif kayıplar.....	103



FORMÜL LİSTESİ

Z_1 : Primer sargı empedansı

Z_2 : Sekonder sargı empedansı

Z'_2 : Primere indirgenmiş sekonder sargı empedansı

Z_s : Kaynak empedansı

Z_L : Yük empedansı

Z'_L : Primere indirgenmiş yük empedansı

Z_s^* : Kaynak empedansı kompleks eşleniği

$\bar{Z}_s$: Kaynak empedansı fazörü

R_1 : Primer sargı direnci

R_2 : Sekonder sargı direnci

R'_2 : Primere indirgenmiş sekonder sargı direnci

R_{fe} : Demir direnci

R_e : Eşdeğer direnç

R_s : Kaynak direnci

R_L : Yük direnci

R'_L : Primere indirgenmiş yük direnci

$R_{d.a.}$: Doğru akım direnci

X_1 : Primer sargı reaktansı

X_2 : Sekonder sargı reaktansı

X'_2 : Primere indirgenmiş sekonder sargı reaktansı

X_m : Mıknatıslanma kolu reaktansı

X'_m : X_m 'nin sekondere indirgenmiş primer mıknatıslanma kolu reaktansı

X_e : Eşdeğer kaçak reaktans

X_s : Kaynak reaktansı

X_L : Yük reaktansı

X'_L : Primere indirgenmiş yük reaktansı

L_1 : Primer sargı öz endüktansı

L_2 : Sekonder sargı özendüktansı

L'_2 : L_2 'nin Primere indirgenmiş sekonder sargı özendüktansı

Sekonder sargı özendüktansı

L_m : Mıknatıslama kolu endüktansı

L'_m : L_m 'nin sekondere indirgenmiş mıknatıslama kolu reaktansı

X_{k1} : Primer sargı kaçak reaktansı

X_{k2} : Sekonder sargı kaçak reaktansı

X'_{k2} : Primere indirgenmiş sekonder sargı kaçak reaktansı

I_1 : Primer sargı akımı

I_2 : Sekonder sargı akımı

I'_2 : Primere indirgenmiş sekonder sargı akımı

I_{fe} : Mıknatıslama kolu demir bileşeni akımı

i_m : Mıknatıslama akımı

i'_m : Primere indirgenmiş mıknatıslama kolu akımı

I_e : Fuko akımı

I_0 : Boşta çalışma akımı

I_ϕ : Uyarım akımı

I_{h+f} : Histeresiz ve fuko akımı

I_{kd} : Kısa devre akımı

U_1 : Primer sargı gerilimi etkin değeri

U'_1 : Sekondere indirgenmiş primer gerilim

U_2 : Sekonder sargı gerilimi etkin değeri

U'_2 : Primere indirgenmiş sekonder gerilim

U_{kd} : Kısa devre gerilimi

u_1 : Primer gerilimi

u_2 : Sekonder gerilimi

E_1 : Primer sargıda endüklenen gerilim

E'_1 : Sekondere indirgenmiş primer sargıda endüklenen gerilim

E_2 : Sekonder sargıda endüklenen gerilim

E'_2 : Primere indirgenmiş sekonder sargıda endüklenen gerilim

e_1 : Primer sargı uç gerilimi

e_2 : Sekonder sargı uç gerilimi
 e_{11} : Primerde endüklenen elektromotor kuvvet e.m.k.
 e_{22} : Sekonderde endüklenen elektromotor kuvvet e.m.k.
 P : Aktif güç
 P_{ad} : Transformatör nüve kaybı
 P_{kd} : Kısa devre gücü
 Q : Reaktif güç
 S : Görünür güç
 D : Distorsiyon gücü
 N_1 : Primer sarım sayısı
 N_2 : Sekonder sarım sayısı
 ϕ : Demir çekirdek malzemesindeki akı
 ϕ_m : Primer ve sekonder sargıyı halkalayan ortak akı
 ϕ_1 : Primer sargıdaki akısı
 ϕ_2 : Sekonder sargıdaki akısı
 ϕ_{k1} : Primer kaçak sargı akısı
 ϕ_{k2} : Sekonder kaçak sargı akısı
 B : Akı yoğunluğu
 ψ_1 : Primer sargı halkalanma akısı
 ψ_2 : Sekonder sargısı halkalanma akısı
 $\mathfrak{R}_m$: Çekirdek malzemesi relüktansı (manyetik direnci)

ÖZET

Transformatör elektrik enerji sistemlerinin en önemli elemanlarından birisidir. Transformatör kayıpları demir kayıpları (boşta kayıplar) ve bakır kayıpları (yükte kayıplar) olarak ikiye ayrılabilir. Transformatörün geleneksel işletme türü, primer gerilimin sinüsoidal ve yük empedansının lineer olduğu çalışma durumudur. Genellikle, transformatör kayıpları bu işletme durumu için tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada transformatörün kararlı hal analizine ilişkin temel tanım ve kavramlar açıklandıktan sonra, transformatörün sürekli halde çalışmasında lineer ve lineer olmayan modelleme teknikleri üzerinde durulmuştur. Çalışmanın bilimsel yenilik özelliği taşıyan 5. bölümde, transformatörün şönt elemanlarının lineer olmayan modelleme çerçevesinde hesabına yönelik bir analitik yaklaşım ortaya konulmuştur. Bu yaklaşımın ölçme/deney tekniği ile uyumlu olduğu bir başka deyişle deneysel ve teorik sonuçların söz konusu lineer olmayan parametrelerin hesabında aynı ölçüde doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Sayısal uygulama için seçilen 2 kVA, 220 /110 V, 50 Hz etiket değerlerine sahip örnek bir transformatör üzerinde deneysel bulgular ile hesaplama sonuçları 5. bölümde ortaya konulmuştur. R_{fe} direncindeki ve sargı dirençlerindeki aktif kayıplar, harmoniklere ve seçilmiş çalışma durumlarına bağlı olarak elde edilmiştir.

Farklı işletme türleri için (sinüsoidal veya sinüsoidal olmayan kaynak ve lineer veya lineer olmayan yük hem R_{fe} direncinde hem de sargı dirençlerinde oluşan aktif kayıplar ekonomik değerleri vardır. Maksimum harmonik genliğin mertebesi, maksimum harmonik mertebesi, işletme süresi, yüklenme faktörü göz önünde bulundurularak dört durum için (ek) aktif kayıpları elde edilmiştir. Optimal işletme açısından bu kayıpların maliyeti ile tasarlanacak olan süzgeç devrenin maliyetinin karşılaştırılması gerekir.

ABSTRACT

Transformer is one of the most important elements of electric power systems. Transformer losses could be divided into two components: iron losses (or no-load losses) and copper losses (or load losses). The conventional operation of a transformer is the operation condition where the source voltage (primary voltage) is sinusoidal and the load impedance is linear. Generally, transformer losses are defined for the conventional operation mode.

In this study, first, basic definitions and concepts of a transformer are presented for the steady-state mode. Later, linear and non-linear modelling techniques of a transformer are introduced. In chapter 5 which presents new modelling technique, for shunt elements of transformer, a new analytical approach was given using non-linear modelling. This chapter includes the scientific originality of the thesis. The results of this new approach are comparable with reference to the experimental ones, in other words, theoretical and experimental results are comparable. For the measurement data, a transformer 2 kVA, 220/110 V, 50 Hz was used. Active losses at the resistance R_{fe} and the windings were obtained depending on harmonics and the chosen operation modes.

For the different operation modes (source: sinusoidal or non-sinusoidal and load: linear or non-linear), active losses on the both resistance and winding resistances have an economical value. These active losses have been obtained considering maximum harmonic amplitude, maximum harmonic order, loading factor and loading time. With reference to the optimal operation, it is necessary to compare the cost of losses with the cost of filter to be designed.

1. GİRİŞ

1.1. Genel Tanıtım

Transformatörler, hem beslediği yükü, hem de kendi kayıplarını karşılamak için gereken gücü şebekeden çekerler. Bu cihazların bazıları ürettikleri harmoniklerle ek güç kayıplarına ve aşırı ısınmalara sebep olurlar. Söz konusu kayıplar şebekeye harmonikli akımlar olarak geri verilir. Bu ek gücün değeri harmonik akımlarının genliklerine ve maksimum harmonik mertebesine bağlıdır. Eğer bunların değerleri biliniyorsa bu ek güç hesaplanabilir.

Bir transformatör kendisine bağlı yükleri uygun bir gerilimle besleyecek güçte olmak zorundadır. Dolayısıyla bir transformatörün gücü, beslediği yüklerin aktif ve reaktif güç ihtiyaçlarına göre (belirli bir eşzamanlılık faktörü de dikkate alınarak) belirlenir.

Bir transformatörün lineer olmayan yüklerle yüklenmesi ya da harmonikleri içermesi durumunda, güç hesabında bu durumların dikkate alınması gerekir. Harmoniklerin varlığı durumunda, sargıların aşırı ısınmasını güvenle önlemek için transformatör ya aşırı boyutlandırılmalı veya işletmeye alınmış durumda ise, etiketinde yazılı güç kapasitesinden düşük güçte çalıştırılmalıdır.

Eğer bir transformatörün besleyeceği cihazın kendisi harmonik üretiyorsa, bu transformatör için güç düşürme faktörünü belirleyebilmek için, harmonik akımlarının transformatörün anma akımına oranları bilinmelidir.

Genellikle bir transformatörün gücü, etkin akımının $\sqrt{2}$ katına eşit tepe değerindeki akımlar çeken lineer yükler için hesaplanır. Lineer olmayan yüklerle çalışma durumunda, bu transformatörün aşırı ısınmasını ve çıkış geriliminin aşırı bozulmasını önlemek için maksimum yük, etiketindeki kapasitesinin altında tutulmalıdır.

Standart transformatörleri lineer olmayan yüklemedeki anma tepe akımına göre şöyle ayarlamak mümkündür. Örneğin tepe faktörü 1.414 olan lineer yüklere karşı tepe faktörü 2.5 olan lineer olmayan yükler için transformatörün lineer olmayan kapasitesi etiket kapasitesinin % 56.56'sı olur ($1.414/2.5=0.5656$).

Bir transformatörün tasarımı, lineer olmayan akımlarla yüklenebilecek şekilde yapılabilir. Fakat transformatörün boyutlarını arttırmak (veya kapasite indirimi yapmak) çoğu zaman daha pratik ve daha ucuz bir yoldur. Genellikle harmonikli yükleri besleyecek sistemlerin % 80 kapasitenin altında çalıştırılması önerilir. Bundan amaç eleman üzerindeki zorlamayı azaltmak, performans ve güvenilirliği arttırmak, transformatörün aşırı yüklenmesini önlemek ve gerilim bozulmasını kontrol etmektir. Uygulamada son zamanlarda yapılan incelemeler yüksek frekanslı harmoniklerin oluşması durumunda meydana gelen iç aşırı gerilimlerin tehlikeli boyutlara ulaştığını göstermiştir.

Güç ihtiyacını hesaplarken harmonikler hiç hesaba katılmazsa, transformatörün karşılamak zorunda kalacağı güç (akım) kendi kapasitesini aşar. Bunun sonucunda transformatörde aşırı ısınma meydana gelir ve bu yüzden transformatörün ömrü kısalmış ve arızalar oluşabilir. Bunlar ısınma etkisi olarak ortaya çıkan ek kayıplar nedeniyledir. Toplam güç faktörünün harmoniklerle ilgili kısmı şebekenin tamamının tasarımında hesaba katılmak zorundadır.

Akımın etkin değerindeki artış, aşırı ısınmanın tek sebebi değildir. Sirkülasyon akımını oluşturan elektromotor kuvvet sadece akımın değişme miktarı ile değil aynı zamanda frekans ile de orantılıdır. Yüksek frekanslı bir harmonik akımı, harmonik faktörü düşük olsa bile önemli miktarda ek kayıplara sebep olur.

Standart transformatörlerin, kararlı halde nisbeten yüksek endüksiyon ile (1.6 - 1.7 Tesla'lık maksimum manyetik bir akı yoğunluğunda) çalışması beklenir. Bu değer halen kullanılan demir çekirdek saçlarının doyma eğrisinin kırılma noktası civarındadır. Şebeke tarafında kalan (transformatöre göre) toplam empedansa bağlı olarak (kaynak empedansı), akımın temel dalgası üzerine harmonik akımları da bindiği zaman, bu harmonik akımların ürettiği harmonik akılar toplam akının tepe değerini yükseltebilir. Böylece histeresiz eğrisinin çevrelediği kapalı alan büyüyebilir. Yani maksimum manyetik akı yoğunluğunda çalışan bir transformatör regülasyona bağlı olarak % 30 luk bir gerilim yükselmesine maruz kalırsa, demir çekirdek malzemesi doymaya girmeye çok zorlanacaktır. Örneğin 1.9 - 2 Tesla'lık bir manyetik akı yoğunluğu kuvvetli bir doymaya yol açacak ve mıknatıslama akımı bozulmasını arttıracaktır (R.Yacamini,1982).

Demir çekirdekteki akının değişmesiyle oluşan demir çekirdek kaybı yükten bağımsızdır. Demir çekirdek malzemesindeki akı yoğunluğunun maksimum değeri; frekansa, demir çekirdekteki akının zamana göre değişimine, demir çekirdekte kullanılan demir malzemenin kalitesine, sa tabakaların özelliğine, demir çekirdek ara kesidi ya da demir çekirdek malzemesinin ağırlığına bağlıdır (ayrıca kayıpları en aza indirmek için salar, köşelerde 45°'lik açıda kesilir).

Ek demir çekirdek kayıplarına ve doymaya engel olmak için, transformatörü düşük endüksiyon değeri ile tasarlamak gerekir; bu da tabiatıyla maliyeti yükseltir.

Transformatör üreticileri harmoniklere karşı transformatör koruması için pahalı ek yalıtımdan başka bir standart çözümü hala verememektedirler. Üstelik ek yalıtım tam bir garanti de sağlayamaz. Her olay ayrı ayrı incelenmeli ve ilgili harmoniklerin mertebe ve yüzdeleri hesaba katılmalıdır. Şebekenin kaynak empedansı ve diğer elemanların empedansları da hesaba katılmalıdır. Bunun için transformatörlerin tasarımında demir çekirdek tipi konstrüksiyon göz önüne alınarak soğuk haddelenmiş yönlendirilmiş kristalli (elektriksel çelik) saın kullanılmasının geliştirilmesindeki hedef, düşük kayıp, düşük titreşim ve düşük gürültü düzeyinin sağlanmasıdır. Ayrıca işletme güvenliği bakımından ısı kararlılık önemlidir.

Bu çalışmada transformatörün kararlı hal analizine yönelik temel tanım ve kavramlar açıklandıktan sonra, transformatörün sürekli halde işletilmesinde lineer ve lineer olmayan modelleme teknikleri üzerinde durulmuştur. Çalışmanın bilimsel yenilik özelliği taşıyan bölümünde, transformatörün şönt elemanlarının lineer olmayan modelleme çerçevesinde hesabına yönelik bir analitik yaklaşım ortaya konmuştur. Bu yaklaşımın ölçme / deney sonuçları ile uyumlu olduğu, bir başka deyişle teorik ve deneysel sonuçların söz konusu lineer olmayan parametrelerin hesabında aynı ölçüde doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Sayısal uygulama için seçilen 2 kVA, 220 /110 V, 50 Hz etiket değerlerine sahip örnek transformatör üzerinde deneysel bulgular ile hesaplama sonuçları ortaya konulmuştur.

1.2. Önce Yapılan Çalışmalar

Aşağıda geniş bir araştırmayla konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar özetlenmiştir (Leon de F., Semylen, A., 1995).

Histerezisin tahminine yarayan ilk klasik model 1930'larda F. Preisach tarafından ortaya atılmıştır. Bu modelde malzemeler, herbiri kare şeklinde döngü gösteren birtakım manyetik dipollerden oluşturulmuştur. Birçok araştırmacı F. Preisach'ı takip etmiştir. Bu yaklaşım sonlu elemanlar programlarını geliştirenlerin tercih ettiği bir yaklaşımdır.

1970'te L. O. Chua ve K.A. Stromsmse histerezisi bir elektrik devresi eşdeğeri ile bilgisayarda modellemişlerdir. Bu model paralel bağlı bir lineer olmayan direnç ve bir lineer olmayan endüktanstan oluşmaktaydı.

1971'de G. W. Swift güç transformatörlerinde girdap akımı kayıplarının histeresiz kayıplarından çok daha önemli olduğunu belirtmiştir.

1972'de R. Bouc histeresizin matematiksel ifadesini bir fonksiyonla vermiştir. Aynı yıl L.O. Chua ve S. C. Bass, L. O. Chua ve K. A. Stromsmse'nin modelini geliştiren daha da karışık bir model kullanarak d.c. döngüsünün hesaba katılmasını sağlamıştır.

1974'te N. Gernay, S. Maestero ve J. Vroman, F. Preisach'ın teorisine dayanan statik, dinamik ve geçici durum modellerini sundular. Statik model, mıknatıslanma eğrisi ve ölçekbildikleri en büyük histerezis döngüsünden elde edilir. Dinamik model, alternatif akım kararlı hale uygundur. Geçici durum modelle ilgili makalelerinde hiçbir ayrıntı verilmemiş olup, yazarlar bunun sukunet hali simülasyonları için daha doğru sonuçlar verdiğini belirtirken, geçici koşullar için sınırlı bir doğruluk sağladığını ifade etmektedirler.

Aynı yıl H. L. Nakra ve T. H. Barton'nun teklif ettikleri modelde histerezis, deneyle belirlenen ve birbirlerine yakın konumlu bir dizi çizgi ile temsil edilmektedir. J. W. Teape R. R. S Simpson, R. D. Slater ve W. S. Wood deneylerden elde edilen bir model sundular. Yine 1974 'te S. H. Charap tarafından lineer dirençler ve lineer olmayan endüktanslardan oluşan iki kollu bir devre ortaya konmuştur. Bu model domen (bölge) duvarlarının 180° ve 90°

hareketinden çıkarılmıştır. A. Wrigt ve S. Cornerio akım transformatörleri için bir histeresiz modeli geliştirmiştir.

1975'te A. Semlyen ve A. Castro doyma için bir histeresiz model öne sürdüler. Bu model, (doyma bölgesi eğimine paralel olarak) iki yönde kaydırıldığında histeresizin bir temsilini vermektedir. Aynı yıl H. Yamashita, E. Nakamae, M. S. A. A. Hammam, ve K. Wakisho histeresiz döngüsünü doyma ile birbirinden kaymış birkaç elemana ayırdılar. Bu model, küçük döngüleri temsil etmeye uygundur, fakat oldukça karışıktır. Çünkü herbir dilim başka bir diferansiyel denklemle tanımlanmaktadır. H. W. Dommel tarafından geçici olayların simülasyonu için geliştirilen transformatör modelinde, histeresiz karakteristikleri bir temel frekans döngüsü ile temsil edilmiştir.

1976'da S. N. Talukdar ve J. R. Bailey'in histeresiz için öne sürdükleri geçici durum modeli, "üst eğri" ve "alt eğri" denilen iki eğri ailesini esas alıyordu. 1976'da M. Jufer ve A. Apostolides birinci mertebeden rasyonel bir fonksiyonla doymanın geçici durum ve kararlı durum modellerini elde ettiler. Bu histeresiz modeli, eğriyi kaydırarak ve sabiteleri değiştirerek elde edilmekte ve eğrisel bölgeler için daha karışık bazı fonksiyonlar kullanılmakta idi.

D. O. Kelly 1977'de histeresiz döngüsünü modellemek üzere üstel bir fonksiyon öne sürmüştür. 1977'de N. Janssens deneysel sonuçlara uydurulan bir eğriler kümesi kullanmıştır.

1978 ve 1979'da R. A. Newbury %3 yönlendirilmiş tanecikli silikon çeliği için dört köşe biçimde bir histeresiz döngüsü modelini ortaya atmıştır. Onun modeli küçük döngüleri içine almakta olup, nispeten basittir.

1980'de A. Y. Hannalla ve D. C. Macdonald "ani değişen" akımlarının hesabında iyi sonuçlar veren bir histeresiz formülü öne sürdüler. Aynı yıl R. M. Dal Vecchio yönlendirilmemiş çelik saçlar için F. Preisach'ın teorisine dayanan karışık bir histeresiz modeli geliştirmiştir.

E. P. Dick ve W. Watson 1981'de S. N. Talukdar ve J. R. Bailey'in modelini iyileştirdiler. Onların teklifinde, deneylerden elde edilen sonuçlara dayanan iki tane model vardır.

Modellerden biri hiperbolik fonksiyonlara dayanmakta, diğer modelde ise akım kaynakları ile seri olarak bağlı bir kaç kol kullanılmaktadır. J. Rivas, J. M. Zamorro, E. Martin ve C. Pereira 1981'de öne sürdükleri rasyonel fonksiyon şeklindeki model ile (biri yukarıya , diğeri aşağıya giden) iki eğri kümesini elde ettiler. B. Stein geçici durumların hesabı için yeni bir transformatör modeli öne sürdüler. Aynı yıl D. Ivanoff ana histerezis döngüsünün dört farklı çizgisi ile ilgili sirkülasyon kurallarına dayanan bir histerezis modeli geliştirmiştir. M. A. Raham, Poloujadoff, R. D. Jackson, J. Perard ve S. D. Gowda sert manyetik malzemeler için bir histerezis modeli öne sürmektedir.

1982'de R. M. Del Vecchio magnetik alanların sonlu elemanlarla hesabına yarayan bir histerezis modeli teklif etmiştir. Y. Saito L. O. Chua'ninkine benzer bir histerezis modeli kullanarak üç boyutlu sonlu elemanlarla alan hesabını göstermiştir. A. Savini sonlu elemanlarla magnetik alan hesaplamada histerezise parça-parça lineerleştirmeyi uyguladı. N. Burais ve G. Grellet histerezis modellemesi için bir rasyonel fonksiyon ve bunun sonlu farklar ve sonlu elemanlar için uygulamasını sundular. J. G. Frame, N. Mohan ve Liu, T., geçici durum hesapları için kullanışlı bir histerezis modeli öne sürdüler ve bu model Electomagnetic Transient Program'a dahil edildi. Bu model, S. N. Talukdar'ın modelinin değiştirilmiş bir şeklidir. J. Avila-Rosales ve F. L. Alvarado yine 1982'de E. P. Dick ve W. Watson'un modelini kullanarak demir çekirdek için bir geçici durum modelini öne sürdüler. Bu model, histerezisi temsil etmek üzere bir Foster devresinin kollarıyla seri bağlı akım kaynaklarından meydana gelmiştir. F. A. A. Zaher ve A. I. Shobeir analog bilgisayar simülasyonları için S. N. Talukdar'inkine benzer bir model teklif ettiler.

1983'te D. C. Jiles, ve D. L. Atherton fiziksel özelliklerden, yani manyetik dipollerden, duvar hareketlerinden, bölge (domen) dönüşleri vs'den türetilmiş bir model sundular.

Y. Saito, H. Saotome, S. Hayano, ve T. Yamamura'nın çalışmaları 1984'de D. C. Jiles ve D. L. Atherton'un önceki çalışmalarının detaylı bir araştırmasıdır. S. Prusty ve M. V. S. Rao doyma eğrisi ve boşta çalışma deneyinden elde edilen bir analitik ifade vermektedirler.

1985'te M. O. Mahmoud ve R. W. Whitehead miknatıslanma karakteristiğine parça-parça lineerleştirme yöntemiyle eğri uydurma işlemini yaptılar . Aynı yıl S.S. Udpa ve W. Lord histerezisi temsil etmek için bir Fourier analizörü kullanmışlardır.

1986'da D. N. Ewart'ın teklif ettiği transformatörün geçici durum modelinde doyma, parça parça lineerlik yaklaşımı altında incelenmiştir.

1988'de J. D. Green ve C. A. Gross tarafından harmoniklerin incelenmesinde kullanılmak üzere teklif edilen histerezis modeli, dört adet üstel fonksiyondan meydana gelmiştir.

1989'da N. Rajaković ve A. Semlyen histerezisi harmonik domeninde temsil etmek için bir polinom kullandılar. C. E. Lin, J. B. Wei, C. L. Huang ve C. J. Huang geliştirdikleri yeni fonksiyonlar denilen fonksiyonlarla bir model ileri sürdüler.

1990'da A. P. B. Joosten, J. Arrillaga, C. P. Arnold, N. R. Watson iki eğimli doğrulardan meydana gelen çok basit bir model gösterdiler. Bu yazarlar, modelin basit olmasına rağmen ölçme teknikleriyle birleştirilerek kullanılmasının yerinde olacağını savunmaktadır.

Histerezis modeli ile ilgili bir diğer çalışma da, 1991'de C. E. Lin, C. E. Chen ve C. L. Huang, tarafından verilmiştir.

Histerezisin polinom şeklinde modellenmesi, 1993'te D. Dolinar, J. Philer ve B. Grca tarafından yapılmıştır. Bu yazarlar, D. N. Ewart'ın yaklaşımını kullanarak transformatörün geçici durum modelini kurmuş ve histerezisi yaklaşık olarak bir polinomla temsil etmişlerdir.

J. W. Macki, P. Nistri ve P. Zecca 1993'teki makalelerinde çeşitli mühendislik, fizik ve matematik alanlarında bulunan bugünkü histerezis modellerini matematiksel açıdan gözden geçirmekte ve 1897'den başlayan ek referanslar listesini vermektedirler.

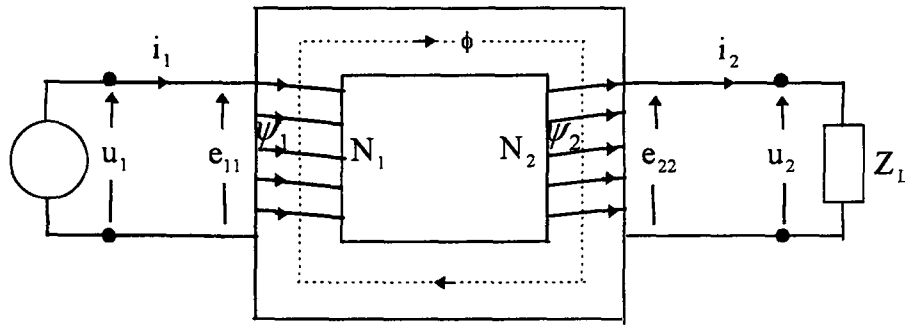
2. TRANSFORMATÖRLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

2.1. İdeal Transformatörler

Transformatörler, elektrik enerjisinin gerilim ve akım değerlerini ihtiyaca göre değiştiren cihazlardır. Transformatörler esas itibariyle bir manyetik malzeme (demir çekirdek) üzerine yerleştirilmiş iki veya daha fazla sargıdan oluşur. Şekil 2.1'de bir fazlı transformatörün prensip şeması görülmektedir.

Transformatör için göz önüne alınacak ilk model ideal olanıdır. İdeal bir transformatörün incelenmesinde şu kabuller yapılır:

- i) Sargıların meydana getirdiği elektriksel alan ihmal edilir.
- ii) Sargı dirençleri ihmal edilir.
- iii) Bütün akının ferromanyetik demir çekirdekten geçtiği kabul edilir.
- iv) Demir çekirdek malzemesinin bağıl magnetik geçirgenliği (permeabilitesi) o kadar büyüktür ki, demir çekirdekteki akının oluşumu için gerekli magnetomotor kuvvet (m.m.k) ihmal edilecek kadar küçüktür.
- v) Demir çekirdek kayıpları ihmal edilir.



Şekil 2.1 Bir fazlı transformatörün prensip şeması

Primer adı verilen birincil sargıya belli bir gerilim ve frekansta elektrik gücü verilir. Sekonder yani ikincil sargıdan ise değiştirilmiş gerilimde güç alınır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi N_1 sarımlı primer sargı uçlarına u_1 gerilimi uygulanırsa sargıdan i_1 akımı geçer. $N_1.i_1$ m.m.k.'i demir çekirdekte ϕ akısını ve böylece N_1 sargısında ψ_1 akısını meydana getirir. u_1 gerilimi

zamanla değişirse i_1 , ϕ ve ψ_1 'de zamanla değişir. N_1 sargısında endüklenen elektromotor kuvvet (e.m.k.) ise;

$$e_{11} = \frac{d\psi_1}{dt} \quad (2.1)$$

olur. Akım ve bunun neticesinde akı zamana göre değişirse, bobinde endüklenen emk, akıdaki bu değişmeye karşı koyar (Lenz kanunu) ve yönü Şekil 2.1'de gösterildiği gibi olur. (iii) yaklaşımı ile bütün akı, demir çekirdeğe hapsedilmiş kabul edildiğinden, N_1 sarımlı primer sargının tamamı tarafından halkalanan akı ve e.m.k.,

$$\psi_1 = N_1 \cdot \phi \quad (2.2)$$

$$e_{11} = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

olur. Ayrıca (ii) yaklaşımı ile sargı dirençleri ihmal edildiğinden,

$$u_1 = e_{11} \quad (2.4)$$

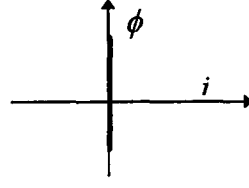
şeklindedir. ϕ akısı; N_2 sarımlı sekonder sargısını da halkalar ve ψ_2 akı halkalanmasını meydana getirir. Akı değişirse, Şekil 2.1'de gösterildiği yönde, N_2 sarımlı sekonder sargısında e_{22} e.m.k.'i endüklenir;

$$e_{22} = \frac{d\psi_2}{dt} = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

Sekonder sargısı uçlarına pasif dış yük bağlanırsa, e_{22} , Şekil 2.1'de gösterildiği gibi i_2 akımını doğurur. Sekonder sargı direnci de ihmal edildiğinden;

$$u_2 = e_{22} \quad (2.6)$$

olur. Bu ilk üç yaklaşımdan;

Şekil 2.2 $\phi = f(i)$ çevrimi

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{e_{11}}{e_{22}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.7)$$

elde edilir. Buradan gerilimler oranının sarmıllar oranına eşit olduğu bulunur. Herhangi bir anda demir çekirdekte geçerli olan net m.m.k.

$$F = N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 \quad (2.8)$$

olduğundan (iv) yaklaşımı ile;

$$N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 = 0 \quad (2.9)$$

olur. Bu yaklaşım, demir çekirdek $\phi - i$ çevriminin, ϕ eksenine üzerine düşen bir doğru ile temsil edilmeğe eşdeğer olduğu anlamına gelir (Şekil 2.2).

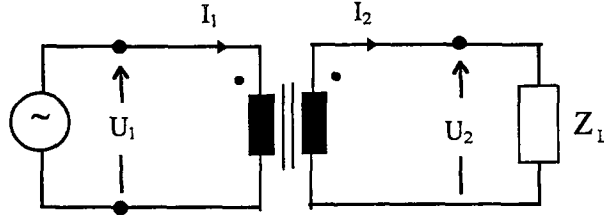
Denklem 2.9'dan i_1 akımı,

$$i_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2 \quad (2.10)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (2.7) ve (2.10) denklemleri düzenlenirse,

$$u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2 \quad (2.11)$$

eşitliği elde edilir. (2.11) eşitliği, transformatöre verilen giriş gücünün çıkış gücüne eşit olduğunu gösterir. Bu, (i), (ii) ve (v) yaklaşımları ile transformatörde bütün kayıplar ve enerji depolanması kaldırıldığından, önceden beklenen bir sonuçtur.



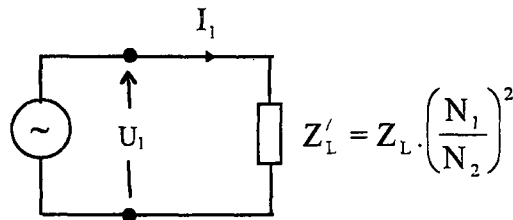
Şekil 2.3 İdeal transformatörün eşdeğer devresi

Şekil 2.3'de, sinüsoidal bir gerilim kaynağından beslenen (u_1) ve pasif yükle yüklü ideal bir transformatörün eşdeğer devresi görülmektedir. Eşdeğer devrede ideal transformatör sarımları N_1 ve N_2 olan iki bobinle temsil edilmektedir. Devre diyagramında ferromanyetik çekirdeğin kaldırılması N_1 ve N_2 'nin çekirdek üstüne sarıldığı yönlerle ilgili olarak Şekil 2.1 'de verilen bilgiyi ortadan kaldırır. Bu bilgi Şekil 2.3'de sargı uçlarında noktalarla verilir. Noktaların bulunduğu sargı uçları, iki sargının diğer uçlarına göre aynı anda pozitif potansiyelde olduğu uçları gösterir. Fazör denklemler (2.7) ve (2.10) denklemlerinden,

$$\bar{U}_1 = \frac{N_1}{N_2} \cdot \bar{U}_2 \quad (2.12)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot \bar{I}_2 \quad (2.13)$$

$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{I}_1} = \left| \frac{N_1}{N_2} \right|^2 \cdot \frac{\bar{U}_2}{\bar{I}_2} = \left| \frac{N_1}{N_2} \right|^2 \cdot \bar{Z}_L \quad (2.14)$$



Şekil 2.4 Yük empedansı kaynak tarafına indirgenmiş ideal transformatörün eşdeğer devresi

İdeal transformatör ve buna bağlı pasif yük devresinin kaynak tarafına indirgenmiş eşdeğer devresi Şekil 2.4'de gösterilmiştir.

$$\bar{Z}_L = \frac{\bar{U}_2}{\bar{I}_2} \quad (2.15)$$

yazılabilir. $\bar{Z}_L$; N_2 sarımlı sekonder sargısı uçlarına bağlanan pasif devrenin empedansdır. Yük empedansının kaynak tarafına indirgenmiş değeri

$$\bar{Z}'_L = \left| \frac{N_1}{N_2} \right|^2 \cdot \bar{Z}_L \quad (2.16)$$

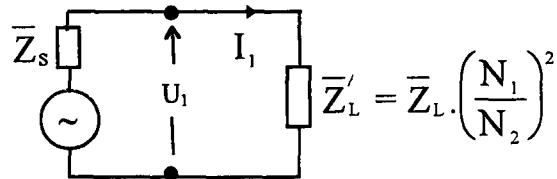
şeklinde gösterilebilir. Burada $\bar{Z}'_L$ yük empedansı $\bar{Z}_L$ 'nin transformatörün primer tarafına indirgenmiş değerini gösterir. Bu ifadeden de görüleceği gibi, transformatörün N_1 / N_2 oranını değiştirmek suretiyle kaynağa uygulanan yük empedansının etkin değerini değiştirmek ve Z_s iç empedansına sahip kaynaktan maksimum güç elde etmek mümkündür (maksimum güç transferi teoremi). Bu durumda iç empedansı $\bar{Z}_s$ (ya da R_s) olan kaynaktan empedansı $\bar{Z}'_L$ (ya da R'_L) olan yüke maksimum güç transferi için sarımlar oranının,

$$\bar{Z}'_L = \left| \frac{N_1}{N_2} \right|^2 \cdot \bar{Z}_L \quad \bar{Z}'_L = \bar{Z}_s^* \quad (2.17)$$

$$R'_L = \left| \frac{N_1}{N_2} \right|^2 \cdot R_L \quad R_s = R_L \quad (2.18)$$

olacak şekilde seçilmesi gerekir ; Burada $\bar{Z}_s^*$, $\bar{Z}_s$ 'in kompleks eşleneğidir.

Transformatörlerde primer ve sekonder olarak adlandırılan sargılardan biri diğerine göre daha yüksek potansiyelde (iki benzer sargıya sahip olabilen, iki elektrik devresini ayırmak için



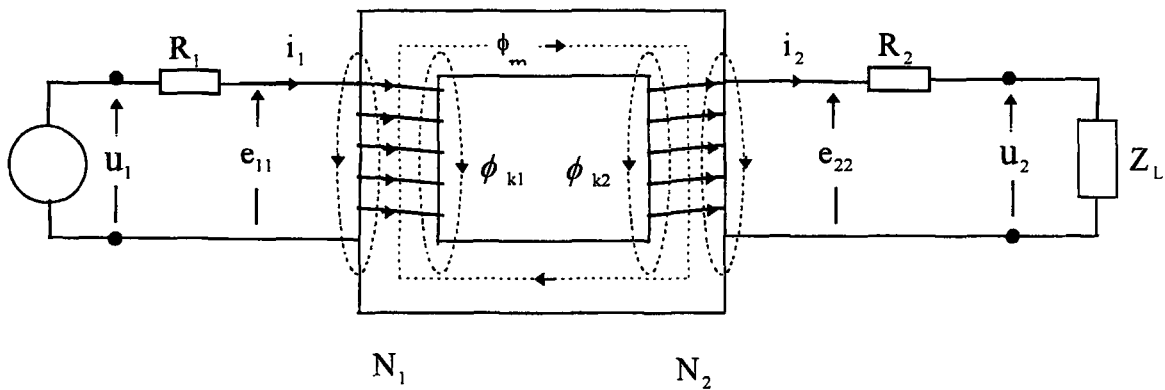
Şekil 2.5 Maksimum güç transferi

kullanılan yalıtım transformatörlerinde bile) olacak şekilde tasarlanır. Transformatör üzerinden her iki yönde enerji akışının olabildiği durumlarda, sargıları; “yüksek gerilim sargısı” ve “alçak gerilim sargısı” diye belirtmekte fayda vardır. Primer sargısı düşük gerilimli olan transformatöre, “Yükseltici Transformatör”, primer sargısı yüksek gerilimli olan transformatöre “İndirici Transformatör” denir. Bir transformatör yükseltici ya da indirici olarak kullanılabilir. Sistemdeki yeri, onun tasarımını ve sargıların durumunu belirler.

Transformatörün tasarım frekansı, akımı, gerilimi ve gücü anma değerleri olarak ifade edilir. Anma gerilimin, demir çekirdekteki akı yoğunluğunu doymanın altında tutan, anma akımın ise transformatörün fazla ısınmasına neden olmayan değerde olması gerekir. Bu sebepten bir transformatörün güç kapasitesi watt olarak aktif güç ile değil, Volt-Amper ile ölçülen görünür güç (S) ile verilir.

2.2. Lineer Transformatörler

İdeal transformatör modeli, bütün analizler için yeteri kadar hassas bir model değildir. Transformatörün davranışının yeterince sıhhatli bir biçimde incelenmesi için; fiziksel sisteme daha yakın olan bir model kullanılmalıdır. Bu, ideal transformatör modelinin çıkarılmasında yapılandan daha az hacimli yaklaşımların yapılması demektir. Aşağıdaki yaklaşımlar yapıldığında, farklı işletme durumları altında elde edilen transformatör davranışının ideal modele göre çok daha az hata ile önceden belirlenmesi için, daha elverişli bir model üretilebilir.



Şekil 2.6 Transformatörün ortak ve kaçak akılarının gösterimi

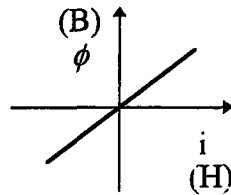
Lineer transformatör yaklaşımında

- i) Sargıların meydana getirdiği elektriksel alan ihmal edilir.
- ii) Sargı dirençleri her bir sargıya ait sarımların toplam dirençleri olarak temsil edilirler.
- iii) Bir sargı m.m.k.'nin meydana getirdiği manyetik akı iki kısma ayrılır;
 - 1) Her bir sargıyı halkalayan kaçak akı. 2) Her iki sargıyı birden halkalayan ortak akı.
- iv) Demir çekirdeğin manyetik geçirgenliğinin sabit olduğu kabul edilir.
- v) Demir çekirdek kayıpları ihmal edilir.

(i) ve (v) yaklaşımları ideal transformatör modelini üretirken de yapılan yaklaşımlardır. Yukarıdaki yaklaşımlar dikkate alınarak elde edilen transformatör eşdeğer devresi Şekil 2.6'da görülmektedir. İki sargıda meydana gelen kaçak akılar ϕ_{k1} ve ϕ_{k2} ile gösterilmiştir. Bunların yönleri i_1 ve i_2 akımlarının yönleri ile belirlenir. ϕ_m ortak akısı; her iki sargıyı halkalar ve sargıların toplam m.m.k.'ini meydana getirir. Demir çekirdek relüktansı (manyetik direnci) $\mathcal{R}_m$ ile gösterilirse, ortak akı,

$$\phi_m = \frac{N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2}{\mathcal{R}_m} \quad (2.19)$$

şeklinde elde edilir. Şekil 2-6'da $N_1 \cdot i_1 > N_2 \cdot i_2$ ise ϕ_{k1} , ϕ_{k2} , $\phi_m > 0$ 'dır. (iv) - (v) yaklaşımları çekirdeğe ait ϕ - i değişimini belirli eğimli bir doğru haline getirmiştir (Şekil 2-7). Bu, demir çekirdek malzemesinin B-H çevriminin yada sargılardan birinin demir çekirdeği için ϕ - i çevriminin modelini gösterir. (v) yaklaşımı ile demir çekirdek kayıpları sıfır kabul edildiğinden, B-H çevrimi sıfır alana sahiptir. (iv) yaklaşımı ile demir çekirdek magnetik geçirgenliği sabit kabul edildiğinden, ϕ ile i arasında lineer bağıntı vardır. "Lineer Transformatör" ismi de buradan gelmektedir. Transformatörün primer ve sekonder sargılarından geçen akımların meydana getirdiği akılar,



Şekil 2.7 Lineer transformatörlerde akı-akım karakteristiği ($\phi = f(i)$ veya $B = f(H)$)

$$\phi_1 = \phi_{k1} + \phi_m \quad (2.20)$$

$$\phi_2 = -\phi_{k2} + \phi_m \quad (2.21)$$

şeklinde yazılabilir. N_1 sarımlı primer sargıdaki ve N_2 sarımlı sekonder sargıdaki akılar için;

$$\psi_1 = N_1 \cdot \phi_1 \quad \psi_2 = N_2 \cdot \phi_2 \quad (2.22)$$

yazılabilir. Şekil 2.6 'da verilen eşdeğer devreden lineer transformatörün gerilim denklemleri,

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + e_{11} = R_1 \cdot i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \quad (2.23)$$

$$u_2 = -R_2 \cdot i_2 + e_{22} = -R_2 \cdot i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} \quad (2.24)$$

şeklinde yazılabilir. Primer ve sekonder sargılarda e_{11} ve e_{22} gerilimleri,

$$e_{11} = \frac{d\psi_1}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\phi_{k1}}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.25)$$

$$e_{22} = \frac{d\psi_2}{dt} = -N_2 \cdot \frac{d\phi_{k2}}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.26)$$

olur. İki sargının kaçak endüktansları ise,

$$L_{k1} = \frac{N_1 \cdot \phi_{k1}}{i_1} \quad L_{k2} = \frac{N_2 \cdot \phi_{k2}}{i_2} \quad (2.27)$$

dir. Primer ve sekonder sargıda endüklenen e_1 ve e_2 e.m.k.'leri,

$$e_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad e_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.28)$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıda verilen ifadeler yardımıyla transformatörün gerilim denklemleri,

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_{k1} \cdot \frac{di_1}{dt} + e_1 \quad (2.29)$$

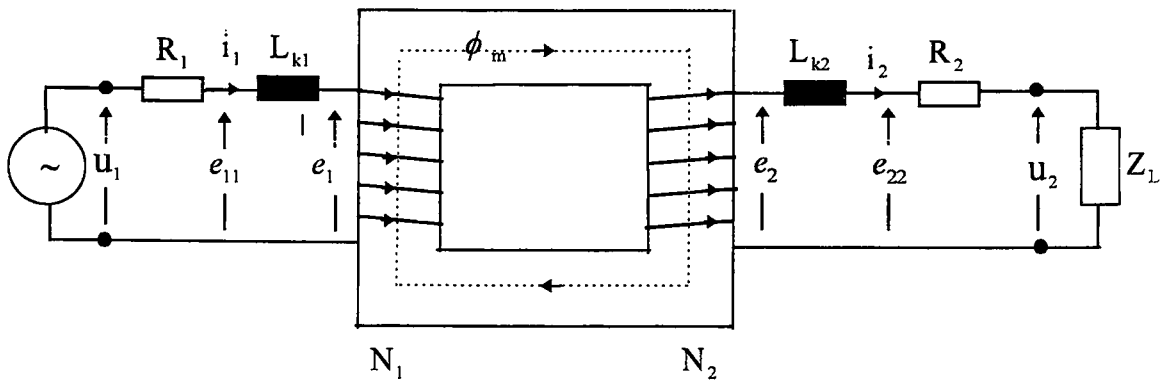
$$u_2 = -R_2 \cdot i_2 - L_{k2} \cdot \frac{di_2}{dt} + e_2 \quad (2.30)$$

olarak elde edilir. Bu son iki ifadenin belirlediği transformatör eşdeğer devresi Şekil 2.8'de verilmiştir. Denklem 2.30 'da verilen e_1 ve e_2 e.m.k.'leri oranlanırsa,

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.31)$$

elde edilir. Elde edilen gerilim oranı, N_1 , N_2 sarımlı ideal transformatörün uç gerilimleri için elde edilen orana eşittir. Dolayısıyla Şekil 2.8'deki transformatörün uç gerilimleri olarak alınabilirler. Ancak bu transformatör ideal değildir. Çünkü demir çekirdeğin net m.m.k.'i; demir çekirdek malzemesinin magnetik geçirgenliğinin sonsuz olmaması sebebiyle, sıfır değildir. N_1 sarımlı primer sargıda sadece ϕ_m ortak akısı meydana getirmek için gerekli olan akıma i_m diyelim. Bu akıma N_1 sarımlı primer sargıya indirgenmiş mıknatıslanma akımı da denilebilir. Bu taktirde;

$$N_1 \cdot i_m = N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 \quad (2.32)$$



Şekil 2.8 Kaçak endüktanslı transformatörün gösterilişi

$$i_1 = i_m + i_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (2.33)$$

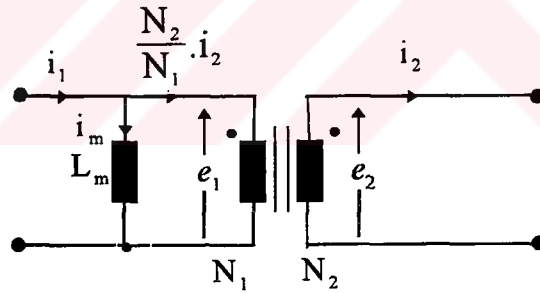
yazılabilir. i_m , akıyı meydana getiren, endüktif akımdır. Bu takdirde (2.33) ve (2.35) denklemleri, N_1 sarımlı primer sargısı uçlarına bağlı olan ve üzerinden i_m akımı geçen endüktanslı ideal bir transformatördür. Bu devre Şekil 2.9 'da görülmektedir.

İdeal bir transformatörün demir çekirdeğindeki bileşke m.m.k.'nin sıfır olması koşulu şu şekilde yazılabilir:

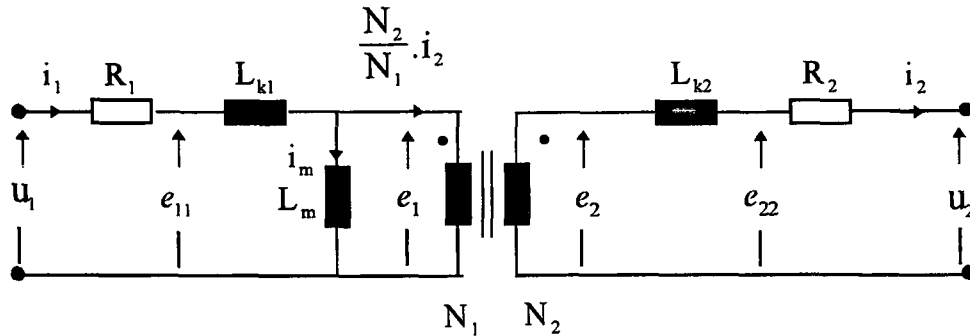
$$N_1 \cdot \left| \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2 \right| - N_2 \cdot i_2 = 0 \quad (2.34)$$

Şekil 2.9'daki devrede belirtilen L_m endüktansı

$$L_m = \frac{N_1 \cdot \phi_m}{i_m} = \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_m} \quad (2.35)$$



Şekil 2.9 İdeal transformatörün primerine paralel bağlı mıknatıslama akımı gösterilişi



Şekil 2.10 Transformatörün lineer eşdeğer devresi

şeklinde elde edilir. Bu endüktans transformatörden ibaret bir devreyi tanımlamak için kullanılabilir. Bu devre Şekil 2.9'da gösterilmiş olup, ideal transformatörün demir çekirdeğinde oluşan m.m.k.'in sıfır olacağı tanımı doğrultusunda transformatörün N_1 sarımlı primer sargısına indirgenmiş mıknatıslanma endüktansıdır. Şekil 2.9'da gösterilen devreyi, Şekil 2.8'deki yaklaşık ideal transformatörde yerine koyarak Şekil 2.10'daki devre elde edilir. i'_m mıknatıslanma akımının sadece N_2 sargısından aktığı kabul edilmesi durumunda L'_m endüktansı;

$$L'_m = \frac{N_2 \cdot \phi_m}{i'_m} = \frac{N_2^2}{\mathfrak{R}_m} \quad (2.36)$$

şeklinde elde edilir. (2.36) ifadesinden görüleceği gibi L'_m endüktansı sekonder sargısı sarım sayısına bağlıdır. Temel yaklaşıma göre,

$$N_1 \cdot i_m = N_2 \cdot i'_m \quad (2.37)$$

şeklinde yazılabilir. (2.35 ve 2.37) ifadesinden,

$$\frac{L_m}{L'_m} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (2.38)$$

elde edilir. L'_m , L_m 'nin N_2 sarımlı sekonder sargısına indirgenmiş mıknatıslanma endüktansıdır.

2.3. Transformatörün Sinüsoidal Gerilimle Beslenmesi

Transformatörün N_1 sarımlı primer sargısına zamanla sinüsoidal değişen U_1 gerilimli bir enerji kaynağı ve N_2 sarımlı sekonder sargı uçlarına lineer bir yük bağlandığı zaman, sistemin bütün değişkenleri zamanla sinüsoidal olarak değişir ve transformatörün eşdeğer devresi, Şekil 2.11 a'daki gibi temsil edilebilir.

Devrede değişkenler efektif büyüklüklerle ve endüktanslar da, transformatörün çalışma frekansında reaktansla gösterilmiştir. Transformatörün primer sargı kaçak reaktansı,

$$X_{k1} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{k1} = \omega \cdot L_{k1} \quad (2.39)$$

şeklinde yazılabilir.

Eşdeğer devre, değişkenleri ve parametreleri transformatörün bir tarafından diğer tarafına indirgenerek basitleştirilebilir. Sekonder büyüklüklerin primere indirgendiğinde elde edilen devre Şekil 2.11 b'de gösterilmiştir.

(2.7), (2.10) ve (2.16) denklemlerinden elde edilen indirgenmiş değerler;

$$\bar{E}_2' = \frac{N_1}{N_2} \cdot \bar{E}_2 = \bar{E}_1 \quad (2.40)$$

$$\bar{U}_2' = \frac{N_1}{N_2} \cdot \bar{U}_2 \quad (2.41)$$

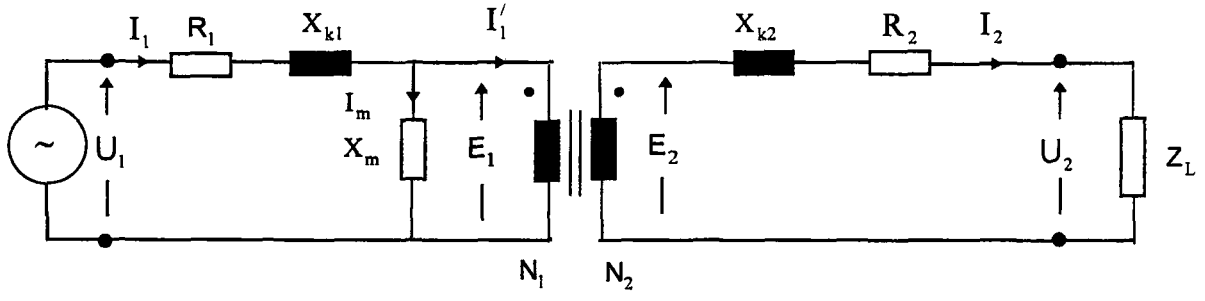
$$\bar{I}_2' = \frac{N_2}{N_1} \cdot \bar{I}_2 \quad (2.42)$$

$$\bar{Z}_L' = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2 \cdot \bar{Z}_L \quad (2.43)$$

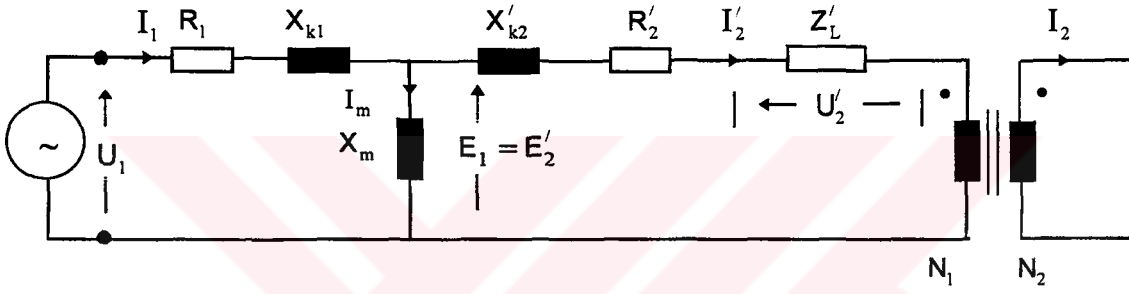
$$X_{k2}' = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2 \cdot X_{k2} \quad (2.44)$$

$$R_2' = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2 \cdot R_2 \quad (2.45)$$

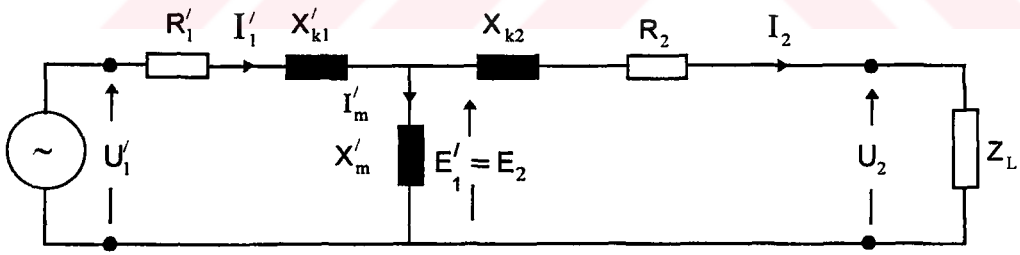
şeklinde yazılabilir.



(a)



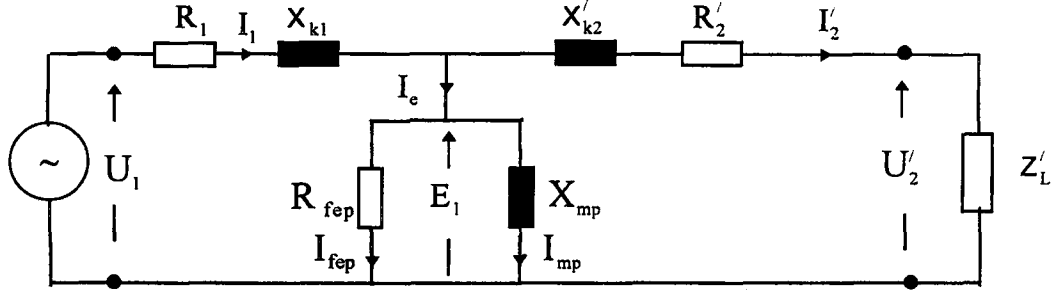
(b)



(c)

Şekil 2.11 Sinüsoidal gerilimle beslenen lineer transformatörün;

- a) Tam eşdeğer devresi
- b) Primere indirgenmiş eşdeğer devresi
- c) Sekondere indirgenmiş eşdeğer devresi



Şekil 2.12 Bir transformatörün sekonder büyüklükleri
primer tarafına indirgenmiş tam eşdeğer devresi

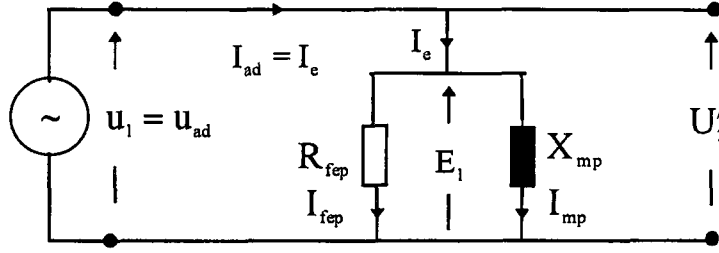
Benzer şekilde, bir transformatörün primer tarafındaki büyüklükler, (kaynak dahil) sekondere indirgenebilir. Transformatörün, primer tarafındaki büyüklüklerin sekondere indirgendiği eşdeğer devresi Şekil 2.11 c’de verilmiştir. Çözülecek probleme bağlı olarak, Şekil 2.11 b yada 2.11 c’de verilen eşdeğer devre seçilebilir.

Demir kayıplarına tekabül eden gücün eşdeğer devrede temsil edilebilmesi; Şekil 2.10’daki devreye R_{fe} direnç elemanının ilave edilmesi ile mümkündür. Böylece, başta lineer eşdeğer devre için yapılan (v). yaklaşımında “ihmal edilen demir kayıpları”nın ihmal edilmediği eşdeğer devre (sürekli sinüsoidal çalışma için) Şekil 2.12’deki gibi olur.

2.4. Transformatörün Eşdeğer Devre Parametrelerinin Belirlenmesi

Transformatör tasarımcısı tasarımı sonucunda eşdeğer devre parametrelerini; seçilen soğutma metodu ile de transformatörün ısı dağıtma yeteneğini yaklaşık olarak hesap edebilir. Tasarımcı böylece transformatörün maksimum çıkış gücünü ve detaylı çalışma performansını önceden belirleyebilir.

Transformatörlerin devre parametrelerini belirlemek amacı ile yapılan deneyler, her iki sargının primer olarak kullanılmasıyla, sargıların anma değerlerine ve mevcut kaynağa bağlı olarak her iki taraftan uyarılarak yapılabilir. Anma gerilimde yapılacak bir deney için, genellikle düşük gerilim sargısını kullanmak elverişlidir. Çünkü uygun gerilimde kaynak bulmak her zaman mümkün olmayabilir. Transformatörün, primer tarafına uygulanan açık devre ve kısa devre deneyi yardımıyla ölçülen değerlerden, primer tarafına indirgenmiş devre parametreleri bulunabilir.



Şekil 2.13 Transformatörün boşa çalışma deneyi için eşdeğer devre

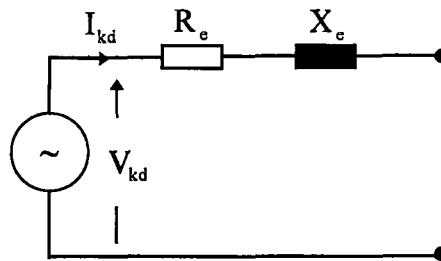
2.4.1. Boşa çalışma deneyi

Transformatörün boşa çalışma deneyinde sekonder uçları açık devre iken primere anma gerilim uygulanır. R_{fe} ve X_m , R_1 ve X_{k1} 'den çok büyük olduğundan, bu deneye ait yaklaşık eşdeğer devre Şekil 2.13 'de gösterilmiştir. Burada X'_{k2} ve R'_2 'de kaldırılmıştır. Çünkü $I'_2 = 0$ 'dır. Bu şartlar altında primer akımı uyarma akımı I_e 'ne eşittir. I_e , U_1 , U_2 ve transformatör gücü P_{ad} ölçülür. Bu ölçmelerden $\frac{N_1}{N_2}$ sarımlar oranı kontrol edilebilir.

Ayrıca R_{fe} ve X_m hesaplanabilir. P_{ad} gücü, işletme şartlarındaki transformatör demir çekirdek kaybına yakındır. Çünkü E_1 gerilimi, transformatör akımındaki değişmelerde az değişir.

2.4.2. Kısa devre deneyi

Sekonder uçları kısa devre iken, anma frekansta anma primer akımı sağlayacak bir gerilim (V_{kd}) primere uygulanır. R_{fe} ve X_m , R'_2 ve X'_{k2} 'den çok büyük olduğundan bu deneye ait yaklaşık eşdeğer devre Şekil 2.14 'de görüldüğü gibidir. Burada R_e ve X_e 'ye eşdeğer direnç ve eşdeğer kaçak reaktans adı verilir.



Şekil 2.14 Transformatörün kısa devre deneyi için eşdeğer devre

Eşdeğer direnç ve kaçak reaktans için,

$$R_e = R_1 + R'_2 \quad (2.46)$$

$$X_e = X_{k1} + X'_{k2} \quad (2.47)$$

yazılabilir. V_{kd} , I_{kd} ve transformatörü giriş gücü P_{kd} ölçülerek R_e ve X_e hesaplanabilir.

Yaklaşık olarak;

$$X_{k1} = X'_{k2} = \frac{X_e}{2} \quad (2.48)$$

kabul edilir. Bu, her iki sargının kaçak akısı için relüktansın ($\mathfrak{R}$) eşit alındığı anlamına gelir.

Bu durumda X_{k1} , X_{k2} ve X'_{k2}

$$X_{k1} = \omega \cdot \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_1} \quad (2.49)$$

$$X_{k2} = \omega \cdot \frac{N_2^2}{\mathfrak{R}_1} \quad (2.50)$$

$$X'_{k2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot X_{k2} = \omega \cdot \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_1} = X_{k1} \quad (2.51)$$

şeklinde yazılabilir.

2.4.3. Sargı dirençlerinin ölçülmesi

R_1 ve R_2 sargı dirençleri doğrudan Wheatson ya da Kelvin köprüsü ile ölçülebilir. Bu ölçmeler, sargıların d.a. dirençlerini verir. Ölçülen bu değerler, iletkenlerdeki düzgün olmayan

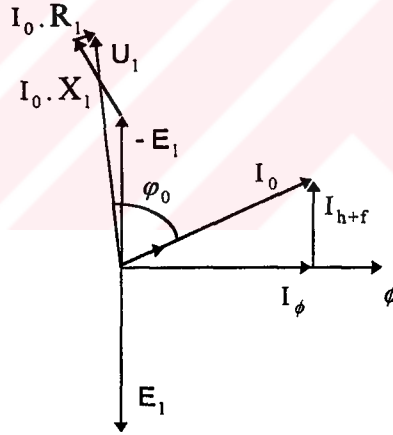
alternatif akım dağılımı sebebiyle, alternatif akım dirençlerinden hissedilir derecede farklıdır. Bu kısa devre deneyinden R_e belirlenebilir ve bu transformatörün primer tarafına indirgenmiş eşdeğer sargı direnci ile mukayese edilebilir. R_1 ve R_2 ölçülen d.a. direnç değerleri ise eşdeğer d.a. direnci için;

$$R_{d.a.} = R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot R_2 \quad (2.52)$$

yazılabilir.

$R_{d.a.}$, R_e 'den önemli miktarda farklıysa, primer tarafa indirgenmiş a.a. sargı dirençleri; (2.52) ifadesinin sağ tarafındaki terimleri, $R_e / R_{d.a.}$ oranı ile çarparak bulunabilir (Slemon, G.R., Straughen, A., 1980).

2.5. Transformatörün Fazör Diyagramları



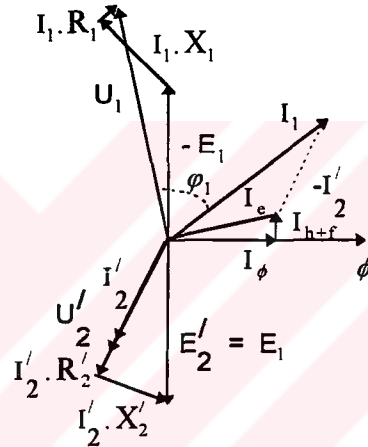
Şekil 2.15 Boşta çalışan bir transformatörün fazör diyagramı

Şekil 2.15'de boşta çalışan bir transformatör için I_ϕ , I_{h+f} , I_e , ϕ ve E_1 fazörleri görülmektedir. $E'_2 = E_1$ ve aynı fazda ve eşittir. Çünkü yük saf omik olduğundan I'_2 sekonder akımı E'_2 uç gerilimi ile aynı fazdadır. Bu nedenle U'_2 ile sekonder akımı I'_2 aynı doğrultuda çizilmiştir. E_2 emk'i manyetik akı tarafından sekonderde endüklenecek elde edilir. Bu da U'_2 ye I'_2 ile aynı fazda $I'_2 \cdot R'_2$ omik gerilim düşümü ve I'_2 'ye 90° ileri fazda $I'_2 \cdot X'_2$ endüktif gerilim düşümü değerlerinin toplamı elde edilir.

Şekil 2.16'da omik yüklü bir transformatörün fazör diyagramı görülmektedir. Fazör diyagramındaki E'_2 ve E_1 e.m.k.'leri, aynı ϕ akısı tarafından endüklendikleri için aynı fazdadır. Sekonder gerilimi U'_2 ile sekonder akımı I'_2 arasındaki faz farkı tamamıyla dış yük devresinin özelliğine bağlı olarak belirlenir. E'_2 sekonder geriliminin bileşeni üzerinde sekonder kaçak reaktans gerilim düşümünü gidermek için $I'_2 \cdot X'_2$ I'_2 akımından 90° ileri fazdadır. Omik gerilim düşümü $I'_2 \cdot R'_2$ I'_2 ile aynı fazdadır.

$$\bar{E}'_2 = \bar{E}_1 = \bar{I}'_2 \cdot (R'_2 + jX'_2) + (R'_1 + jX'_1) \cdot \bar{I}'_2 = (R'_2 + jX'_2) \cdot \bar{I}'_2 + \bar{U}'_2 \quad (2.53)$$

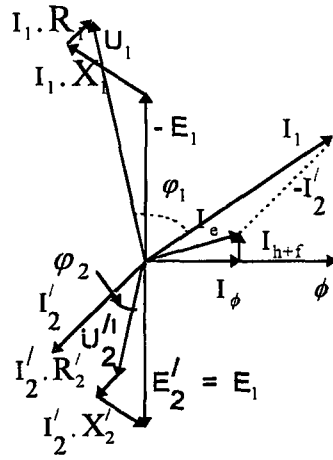
denklemine göre $I'_2 \cdot R'_2$, $I'_2 \cdot X'_2$ ve U'_2 'nün geometrik toplamı $E'_2 = E_1$ 'i verir.



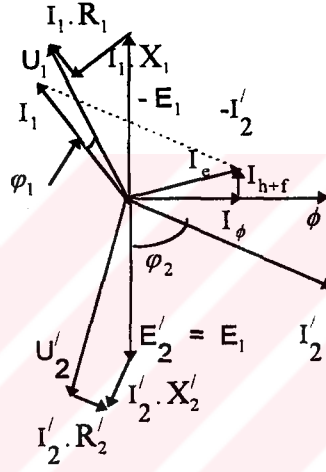
Şekil 2.16 Omik yüklü transformatörün fazör diyagramı

$$\bar{I}_1 + \bar{I}'_2 = \bar{I}_e, \quad \bar{I}_1 = \bar{I}_e + (-\bar{I}'_2) \quad (2.54)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece, Şekil 2.16 'daki fazör diyagramında I_1 akımı I_e 'ye $-I'_2$ ilave edilerek elde edilir. $-E_1$, fazörü ana akı tarafından endüklenen e.m.k.'ni gidermek için gerekli primer gerilimdir. Primer direncindeki gerilim düşümü I_1 ile aynı fazdadır. Kaçak reaktanstaki gerilim düşümü $I_1 \cdot X_1$, $I_1 \cdot R_1$ 'e diktir. Bunları E_1 gerilimine ilave ederek primer gerilimi U_1 elde edilir. Primer gerilimi U_1 ile primer akımı I_1 arasındaki açı, primerin ϕ_1 açısıdır. Sekonder taraftaki gerilim ve akımların aynı fazdaki durumuna rağmen mıknatıslama akımı ve her iki sargının kaçak endüktansı primer gerilim ve akım arasında küçük bir faz kaymasına neden olur.



Şekil 2.17 Endüktif yüklü transformatörün fazör diyagramı



Şekil 2.18 Kapasitif yüklü transformatörün fazör diyagramı

Şekil 2.17'de endüktif yüklü bir transformatörün fazör diyagramı görülmektedir. Bu diyagramdan da görüleceği gibi, sekonder akı sekonder U_2' uç geriliminin ϕ_2 açısı kadar gerisindedir. Sekonder faz açısı endüktif yük arttıkça ϕ_1 de artacaktır.

Kapasitif yük durumu için Şekil 2.17'deki durumun tersi olacaktır. Şekil 2.18'de ise kapasitif yüklü bir transformatörün fazör diyagramı görülmektedir.

Şekil 2.16 - 2.17 ve 2.18'deki fazör diyagramlarından görüldüğü gibi transformatörün primerine uygulanan U_1 gerilimi, ϕ_1 gibi bir faz açısı gerisinden I_1 primer akımını meydana getirir. ϕ_1 açısı transformatörün iç yapısına bağlı olduğu kadar yüke de bağlıdır. Şebekeye

bağlı olan transformatör ve yükten oluşan bir eşdeğer empedans, ϕ_1 açısında I_1 akımını şebekeden çekecektir.

$$\bar{U}_1 + \bar{E}_1 - j\bar{I}_1 \cdot X_1 = \bar{I}_1 \cdot R_1 \quad (2.55)$$

$$\bar{E}_2' - j\bar{I}_2' \cdot X_2' = \bar{I}_2' \cdot R_2' + \bar{U}_2' \quad (2.56)$$

Aşağıdaki Kirchhoff'un çevre denklemleri yardımıyla elde edilebilir. Bu denklemler,

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 \cdot (R_1 + jX_1) \quad (2.57)$$

$$\bar{E}_2' = \bar{E}_1 = \bar{I}_2' \cdot (R_2' + jX_2') + \bar{I}_2' \cdot (R_L' + jX_L') \quad (2.58)$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2' = \bar{I}_e = -\bar{E}_1 \cdot \bar{Y}_m = -\bar{E}_2' \cdot \bar{Y}_m \quad (2.59)$$

şeklinde yazılabilir. Bu üç denklemden üç değer bilinmektedir (E_1 , I_1 ve I_2'). Eşdeğer devredeki eşdeğer empedans E_1 ve I_2' 'yi yok ederek I_1 için çözümden elde edilir.

$$\bar{Z}_1 = (R_1 + jX_1) \quad (2.60)$$

$$\bar{Z}_2' = (R_2' + R_L') + j(X_2' + X_L') \quad (2.61)$$

$$\bar{E}_1 = \bar{I}_2' \cdot \bar{Z}_2' = (\bar{I}_e - \bar{I}_1) \cdot \bar{Z}_2' = -\bar{E}_1 \cdot \bar{Y}_m \cdot \bar{Z}_2' - \bar{I}_1 \cdot \bar{Z}_2' \quad (2.62)$$

$$\bar{E}_1 = -\frac{\bar{I}_1}{(1/\bar{Z}_2') + \bar{Y}_m} \quad (2.63)$$

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 \cdot \bar{Z}_1 + \frac{\bar{I}_1}{(1/\bar{Z}_2') + \bar{Y}_m} = \bar{I}_1 \cdot \left[\bar{Z}_1 + \frac{1}{(1/\bar{Z}_2') + \bar{Y}_m} \right] \quad (2.64)$$

(2.64)'de köşeli parantez içindeki değer; primerden bakıldığında görülen toplam empedanstır. Burada Z_1 transformatörün primer empedansını, Z_2' yük empedansı ve Y_m temel akı admitansını gösterir.

$$\bar{Y}_m = \bar{G}_{fe} - j\bar{B}_m \quad (2.65)$$

$$\bar{Z}_m = 1/\bar{Y}_m = (R_m + jX_m) \quad (2.66)$$

yazılabilir (L. Michael, Whipple ,C.C., 1961).

Bu transformatörün yüklü eşdeğer devresidir. Bu devrede, Z_2' sekonder empedansı temel akı admitansı Y_m ile paralel olup, bileşke admitans veya bileşke empedans oluştururlar. Bu da transformatörün en yaygın kullanılan eşdeğer devresidir. X_m 'in genliği ϕ temel akısının genliğine bağlı olup, demirin doymasına göre değişir. Çünkü transformatörün temel akısı tam yük ve yüksüz çalışma durumunda hemen hemen sabit düşünülebilir. Transformatörün eşdeğer devresindeki R_1 , X_1 , R_2' , X_2' , R_{fe} ve X_m veya (G_{fe} ve B_m) boşa ve kısa devre deneylerinden elde edilebilir. Bu eşdeğer devrenin bulunması transformatörün akım, güç katsayısı, güç gibi değerlerinin hesaplanmasına imkan verir.

Bu eşdeğer devrenin primerden görülen eşdeğer devre olduğu unutulmamalıdır. Bu devredeki I_2' gerçek sekonder akımı olmayıp primere indirgenmiş bir akımdır. Fakat primerden dolaşan akım sekonderden dolaşan akımla aynı m.m.k.'yı meydana getirecektir.

Bir transformatörün analizi sırasında;

1. Çıkış akım ve geriliminin verilmesi halinde giriş akım ve gerilimi,
2. Çıkış akım ve gerilimi verilince verimi,
3. Primer uç gerilimin sabit kaldığı kabulü ile, boştaki sekonder uç gerilimi ile belli bir yükteki sekonder uç gerilimi arasındaki fark bulunur.

3. TRANSFORMATÖRLERE SİSTEM YAKLAŞIMI

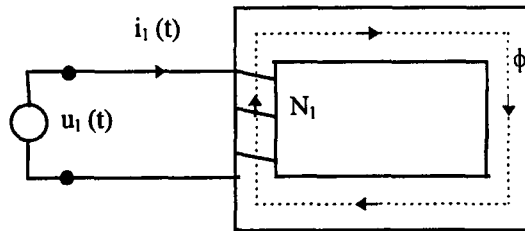
Demir çekirdekli transformatörler bugün kullanılan en önemli elektriki cihazlardan biridir ve alternatif akımda gerilim seviyesini değiştiren önemli bir elemandır. Gerilim seviyesinde değiştirilme yapılamazsa, yüksek gerilim enerji iletim sistemlerinin ve birçok elektrik tehzizatının çalışması mümkün değildir. Transformatör iki veya daha fazla sayıda sargıdan meydana gelir. Bu sargılar o şekilde yerleştirilmiş ve yönlendirilmiştir ki her bir sargının manyetik alanı diğer sargı veya sargıların sarmırlarını halkalar. Bazı hallerde, mesela yüksek frekanslı kuplaj devrelerinde, bobinler hava nüvelidir, buna karşılık 0 ile 400 Hz arası frekanslarda çalışan güç transformatörlerinin sargıları, yüksek geçirgenlikli ve saç tabakalı demir çekirdekler üzerine sarılır.

3.1. Sinüsoidal Uyarmalı Demir Çekirdekli Endüktanslar

Bir tel bobin şeklinde bir demir çekirdeğin etrafına sarılırsa demir çekirdeğin yüksek geçirgenliğinden dolayı, demirsiz bobinin endüktif etkisinden çok daha fazla bir endüktif etki elde edilir. Demir çekirdekli bobin devrede lineer olmayan bir endüktans olarak görülür. Bu endüktansın büyüklüğü bobinden geçen akımın bir fonksiyonudur. Şekil 3.1’de bir demir çekirdekli endüktans devresi görülmektedir. Devre $u_1(t)$ gerilimi ile uyarıldığında, sistemi tanımlayan diferansiyel denklem;

$$u_1(t) = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 3.1 Demir çekirdekli endüktans

$$\phi = f(N_1 \cdot i_1) \quad (3.2)$$

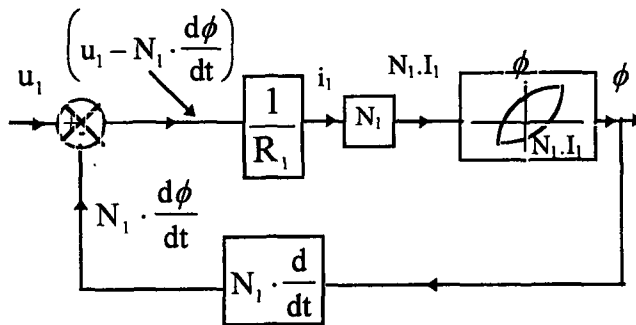
Yukarıdaki ifadelerde, N_1 sarım sayısını, ϕ sargıyı halkalayan toplam akıyı, R_1 sargı direncini gösterir. (3.2) denklemi m.m.k. ile ϕ akısı arasındaki bağıntıyı gösterir. (3.1) ve (3.2) denklemleri demir çekirdekli endüktansın davranışını anlayabilmek için bir fonksiyonel blok diyagram şeklinde gösterilebilir. (3.1) denklemi gerekli düzenleme yapılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$i_1 = \frac{1}{R_1} \cdot (v_1 - N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}) \quad (3.3)$$

Şekil 3.2'deki blok diyagramından görülebilir ki; R_1 'in küçük değerleri için, u_1 giriş gerilimi ve geri besleme gerilimi (zıt e.m.k.) $N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$ arasındaki sarımda küçük bir fark bobinde büyük bir akıma sebep olur. İleri çevrimde böylece ortaya çıkan kazanç ve negatif geri besleme, $N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$ 'nin yaklaşık olarak uygulanan gerilime eşit olmasına sebep olur. Limit olarak, R_1 sıfıra yaklaşırsa, $u_1 \approx e_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$ şeklinde yazabiliriz.

Burada e_1 bobinde endüklenen gerilimi gösterir. u_1 giriş gerilimi sinüsoidal kabul edilirse

$$u_1 = V_{\max} \cdot \cos \omega t = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (3.4)$$



Şekil 3.2 Transformörün blok diyagramı

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{U_{1\max}}{N_1} \cos\omega t \quad (3.5)$$

şeklinde yazılabilir. (3.5) ifadesinden ϕ akısı çözülürse,

$$d\phi = \frac{U_{1\max}}{N_1} \cos\omega t \, dt \quad (3.6)$$

$$\phi = (U_{1\max} / \omega \cdot N_1) \sin\omega t \quad (3.7)$$

elde edilir. Yukarıda verilen ifadelerden endüklenen gerilimin maksimum değeri $E_{1\max}$,

$$E_{1\max} = \omega \cdot N_1 \cdot \phi_{\max} \quad (3.8)$$

şeklinde elde edilir. Burada $\phi_{\max}$ akının maksimum değerini gösterir. (3.8) ifadesinde efektif değerler kullanılırsa, endüklenen E_1 gerilimi için,

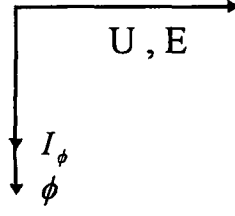
$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \cdot N_1 \cdot \phi_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_{\max} \quad (3.9)$$

yazılabilir. Burada f frekansı ve N_1 sarım sayısını gösterir. Denklem (3.9) bobin ve transformatör sargılarının tasarımında kullanılan önemli denklemlerden biridir.

3.2. Transformatörün Mıknatıslama Akımı

Bir demir çekirdekli bobine, uygulanan gerilimin ve akının dalga şekli sinüsoidal biçimde ise bobindeki akım sinüsoidal olmayan bir akımdır. Şekil 3.2'de lineer olmayan çıkışında akıyı sinüsoidal farzederek ve akımı elde etmek üzere blok diyagramda geri dönüş yaparak bu durum kolayca görülebilir.

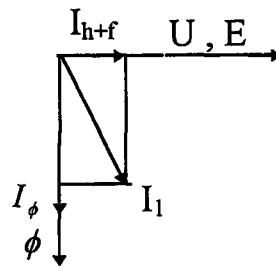
Şekil 3.3'de uygulanan gerilim U , mıknatıslama akımı I_ϕ , endüklenen gerilim E ve ϕ akısını gösteren fazör diyagramı görülmektedir. I_ϕ akımını bir fazör olarak göstermek tam doğru



Şekil 3.3. Akım, gerilim ve akı ilişkilerini gösteren fazör diyagramı

değildir. Çünkü mıknatıslama akımı sinüsoidal değildir ve sadece sinüsoidal değişen büyüklükler fazörlerle temsil edilebilir. Fakat literatürde I akımı çoğunlukla fazör olarak gösterilir. Demir çekirdekli endüktanstaki mıknatıslama akımı sinüsoidal olmayıp, demir çekirdekte sinüsoidal akı üretir. Diğer yandan demir çekirdeğin içinde lokalize sirkülasyon akımlarına yol açan endüklenen gerilimler mevcuttur. Fuko akımları olarak adlandırılan bu akımlar, demir çekirdekte $R \cdot i^2$ kayıplarına sebep olur. Ayrıca demir çekirdeğin içinde polarite değişimleri esnasında magnetik domenlerin hareketi ile histerezis kayıpları olarak adlandırılan kayıplar meydana gelir. Histerezis ve fuko akımlarının meydana getirdiği kayıpların birleşik etkisi ile bobin devresinde empedansın bir direnç bileşeni meydana gelir. Akımın uyarma bileşeni ile histerezis ve fuko akımları bileşeni, demir çekirdekli endüktansın, lineer olmayan bir endüktansla seri bağlı bir dirençten meydana gelmiş bir empedans olarak görünmesine yol açar. Bobin akımının fazörle gösterilmesi, sinüsoidal olmayan akımın bir yaklaşıklıkla sinüsoidal olarak düşünülmesi demektir. Şekil 3.4'te bobin akımının sistemdeki diğer değişkenler yanında alışımlı fazör biçimli gösterilişi görülüyor.

Şekil 3.4'de görüldüğü gibi I_1 akımı, 90° 'den biraz küçük bir açı kadar, uygulanan gerilimin gerisindedir. I_1 'in gerilimle aynı fazdaki bileşeni I_{h+f} ile gösterilmiş olup, demir çekirdekteki kayıplar ile sargı bakır kayıplarını karşılar. I_ϕ mıknatıslama akımıdır ve demir çekirdekli endüktanslar için çoğu zaman I_{h+f} 'den büyüktür.



Şekil 3.4 Demir çekirdekli endüktans için fazör diyagramı

3.3. Demir Çekirdekli Transformator

Demir çekirdekli transformatorler, iki veya daha çok sargılı bir demir çekirdekli endüktanstan meydana gelir. Bu sargılardan biri, normal olarak demir çekirdekli endüktans gibi uyarılır, diğer sargı veya sargılar ise dış yüklere bağlıdır.

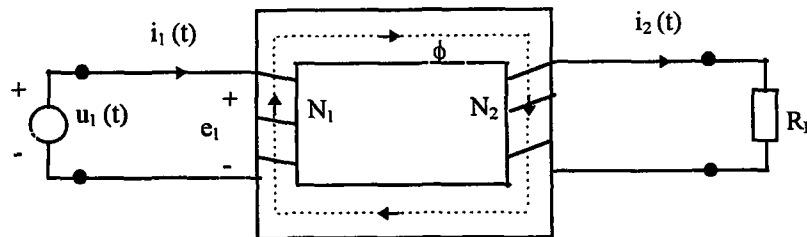
Şekil 3.5'de, demir çekirdekli, iki sargılı bir transformator görülmektedir. Basitlik için bütün magnetik akının her iki sargıyı halkaladığını farzedelim. Şekil 3.5'de görülen transformatorün gerilim denklemleri,

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (3.10)$$

$$\phi = f(N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2) \quad (3.11)$$

$$0 = (R_2 + R_L) \cdot i_2 - N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (3.12)$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki ifadelerde, N_1 ve N_2 primer ve sekonder sargı sarım sayılarını, ϕ demir çekirdekdeki magnetik akıyı, R_1 ve R_2 sargıların ohmik dirençlerini ve R_L yük direncini gösterir. Denklem (3.11) net m.m.k. ($N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2$) ile demir çekirdekdeki akı arasındaki bağıntıyı verir. Transformatorlerin incelenmesine yardımcı olmak amacıyla bir fonksiyonel blok diyagramı çizilebilir. Bu amaçla (3.10), (3.11) ve (3.12) ifadeleri yeniden düzenlenirse,



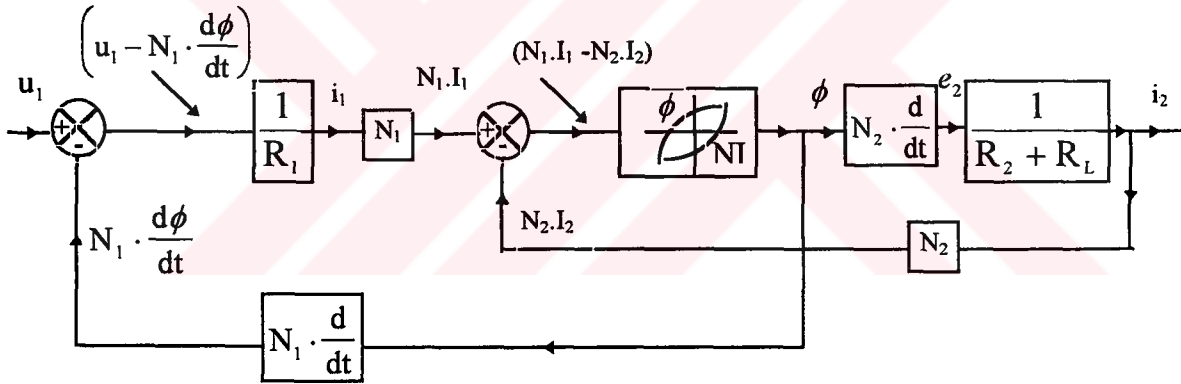
Şekil 3.5 İki sargılı transformator devresi

$$i_1 = \frac{1}{R_1} \cdot (U_1 - N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}) \quad (3.13)$$

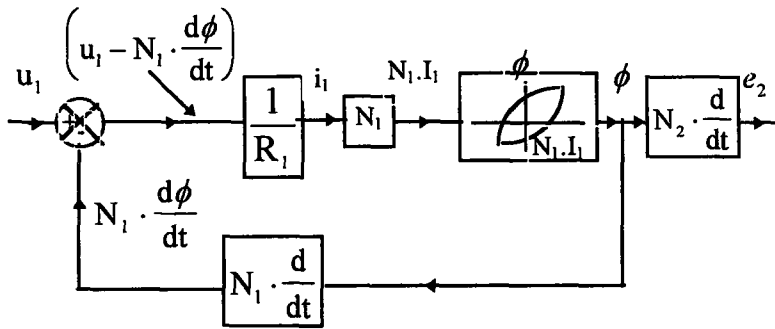
$$\phi = f(N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2) \quad (3.14)$$

$$i_2 = \frac{N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}}{(R_2 + R_L)} \quad (3.15)$$

elde edilir. (3.13) , (3.14) ve (3.15) denklemlerini temsil eden blok diyagram Şekil 3.6'da görülmektedir. Eğer transformatörün sekonderi i_2 'yi sıfır yapmak üzere açık devre haline getirilirse, Şekil 3.6'daki blok diyagram, Şekil 3.7'deki diyagrama indirgenebilir. Buradan, Şekil 3.7'de verilen boşta çalışmadaki blok diyagramın, Şekil 3.2'deki demir çekirdekli endüktans için elde edilen blok diyagram ile aynı olduğu görülür.



Şekil 3.6 İki sargılı transformatörün blok diyagramı



Şekil 3.7 Yüksüz bir transformatörün blok diyagramı

Bir transformatörün primer sargısına bir gerilim uygulandığında, sekonderi açık devre yapılarak elde edilen boşa çalışma davranışı, demir endüktans davranışına benzerdir. Aradaki fark, sekonder sargıda bir $e_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$ gerilim endüklenmesidir. Akının tamamının her iki bobini halkalaması halinde $\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$ olur.

3.4. Transformatörün Yükte Çalışması

Transformatörün yük altında çalışması, Şekil 3.6'da verilen blok diyagramı veya (3.13), (3.14) ve (3.16) denklemleri yardımıyla incelenebilir. Eğer R_1 primer direnci küçük ise, giriş gerilimi $v_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$ dir. O halde, sinüsoidal çalışma şartlarında, eğer U_{1max} sabit kalıyorsa ϕ_{max} 'da esas olarak sabit kalmak zorundadır. Şekil 3.6'da görülebileceği gibi, sabit bir ϕ genliği için $(N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2)$ net m.m.k.'sının sabit genlikte olması gerekir.

$$N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 = \alpha \quad (3.16)$$

Burada, α kompleks bir büyüklüktür. Primer akımı I_1 , bir I_0 boştaki bileşeni ve bir I_{1L} yük bileşenine ayrılabilir. I_2 'nin sıfır olması halinde (boşa çalışma şartları) (3.16) denklemi,

$$N_1 \cdot I_0 = \alpha \quad (3.17)$$

şeklini alır. Elde edilen (3.17) denklemi (3.16) denkleminde yerine konursa, ve gerekli işlemler sonunda,

$$N_1 \cdot i_1 = N_2 \cdot I_{1L} + \alpha \quad (3.18)$$

ifadesi elde edilir. Her iki bobini aynı akı halkalıyorsa $\frac{I_{1L}}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$ elde edilir.

Kaçak akıların etkileri, primer ve sekonder sargılara lineer endüktanslar ekleyerek önceki blok diyagramlara dahil edilebilir. Kaçak akı, her iki sargıya ortak olmayan akı olarak tarif

edilir. Transformatörlerde çekirdekdeki akı, ϕ_{L1} , ϕ_m ve ϕ_{L2} olarak üç bileşene ayrılabilir. ϕ_{L1} ve ϕ_{L2} , sırasıyla primer ve sekonder sargıların eşdeğer kaçak akılarıdır ve kendilerine ait akımlarla lineer değiştikleri kabul edilir. Çünkü kaçak akı yolunun büyük bir kısmı bobini saran havadan ibarettir. ϕ_m akısı her iki bobini halkalar ve primer ve sekonder sargıların net amper-sarım değerlerinin lineer olmayan bir fonksiyonudur. (3.10), (3.11) ve (3.12) denklemleri kaçak akıyı hesaba katarak yeniden yazılırsa, aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d\phi_{L1}}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (3.19)$$

$$\phi_m = f(N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2) \quad (3.20)$$

$$0 = (R_2 + R_L) \cdot i_2 + N_2 \cdot \frac{d\phi_{L2}}{dt} - N_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (3.21)$$

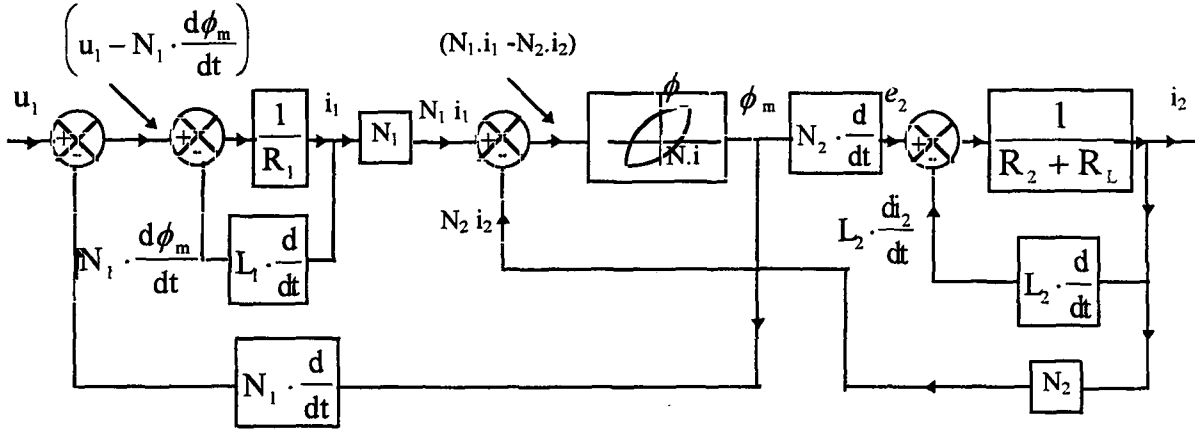
Yukarıdaki ifadelerde yer alan $N_1 \cdot \frac{d\phi_{L1}}{dt}$ terimi $N_1 \cdot \frac{d\phi_{L1}}{di_1} \cdot \frac{di_1}{dt}$ olarak yazılabilir ve $\frac{d\phi_{L1}}{di_1}$ sabit olduğundan $N_1 \cdot \frac{d\phi_{L1}}{di_1} \cdot \frac{di_1}{dt}$ terimi $L_1 \cdot \frac{di_1}{dt}$ olarak elde edilir. Burada $N_1 \cdot \frac{d\phi_{L1}}{dt}$ kaçak endüktans adını alır. Benzer şekilde $N_2 \cdot \frac{d\phi_{L2}}{dt}$ 'de $L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}$ olarak yazılabilir. Elde edilen bu değerler (3.19) ve (3.21) ifadelerinde yerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$i_1 = \frac{1}{R_1} \cdot (u_1 - L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} - N_1 \cdot \frac{d\phi_m}{dt}) \quad (3.22)$$

$$\phi_m = f(N_1 i_1 - N_2 i_2) \quad (3.23)$$

$$i_2 = \frac{1}{R_2 + R_L} \cdot (N_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} - L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}) \quad (3.24)$$

denklemleri elde edilir. Yukarıdaki denklemlerin belirlediği blok diyagramı Şekil 3.8'de temsil edilmiştir.



Şekil 3.8 Kaçak akıların dikkate alınmasıyla bir transformatörün blok diyagramı

3-5. Yüklü Bir Transformatörün Kararlı Hal Sinüsoidal Çalışması

Bir transformatörün kararlı hal sinüsoidal çalışması (3.19) , (3.20) ve (3.21) denklemlerini önce alışılmış çevre akımı denklemleri şeklinde yeniden yazdıktan sonra, bu ifadelerin frekans domenine aktarılması ile ifade edilebilir. Bu işlem $\frac{d}{dt}$ yerine $j\omega$ operatörünü kullanmak ve gerilim ve akımları fazör şeklinde ifade etmekten ibarettir. (3.22) ve (3.24) denklemlerinde $\frac{d}{dt}$ yerine $j\omega$ konursa,

$$R_1 \cdot I_1 + j\omega \cdot L_1 \cdot I_1 + N_1 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} = U_1 \quad (3.25)$$

$$(R_2 + R_L) \cdot I_2 + j\omega \cdot L_2 \cdot I_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (3.26)$$

ifadeleri elde edilir. $N_1 \cdot \frac{d\phi_m}{dt}$ e₁ gerilimine, benzer şekilde $N_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt}$ 'de e₂ gerilimine eşit olur. (3.25) ve (3.26) denklemleri fazör olarak,

$$(R_1 + jX_1) \cdot I_1 + E_1 = U_1 \quad (3.27)$$

$$(R_2 + jX_2) \cdot I_2 + U_2 = E_2 \quad (3.28)$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki ifadelerde, $\omega.L_1$ ve $\omega.L_2$ yerine X_1 ve X_2 , $R.I_2$ yerine de transformatörün sekonder uç gerilimi olan U_2 yazılmıştır.

Bir transformatörde endüklenen gerilim ve akım oranları,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{ve} \quad \frac{I_{1L}}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.29)$$

dir. Primer akımı I_1 , yük akımı $I_{1L} = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2$ 'nin indirgenmiş değeri ile uyarma akımlarının toplamıdır. Bu durumda primer akım I_1 ,

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 + I_o \quad (3.30)$$

şeklinde elde edilir. Yüklü haldeki bir transformatörün fazör diyagramı, yukarıda elde edilen eşitlikler yardımıyla çizilebilir. Bu şekilde elde edilen fazör diyagramı Şekil 2.16 , 2.17 ve 2.18'de verilmiştir. Bunun için en uygun yol, bir U_2 sekonder gerilimi ve I_2 sekonder akımı ile başlayıp geriye doğru giderek U_1 primer gerilimine ulaşmaktır. Eğer yük sadece dirençten ibaret ise, sekonder gerilim ve akım aynı fazda olur. Sekonder devre için bağıntıyı denklem (3.28) verir. Ortak akıyı temsil eden fazör E_2 nin 90° gerisinde çizilmiştir ki bu da e_2 denkleminin fazör biçiminde yazılıp ϕ 'yi çözmekle gösterilebilir. Bu işlemin adımları şöyledir:

Sekonder sargıda endüklenen gerilim,

$$E_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} = j\omega \cdot N_2 \cdot \phi_m \quad (3.31)$$

olup, bu ifadeden ϕ_m değeri,

$$\phi_m = E_2 / (j\omega.L_2) \quad (3.32)$$

şeklinde hesaplanır. E_1 zıt e.m.k.'sı $\frac{N_1}{N_2} \cdot E_2$ 'ye eşit alınır Primer akımın boştaki bileşeninin büyüklük olarak sekonder uçları açık transformatöre $\frac{N_1}{N_2} \cdot E_2$ 'ye eşit bir primer uç gerilimi uygulandığında transformatörün çekeceği akıma eşit olduğu kabul edilir. I_n ve $\frac{N_1}{N_2} \cdot E_2$ arasındaki faz açısı, yukarıda belirtildiği gibi primer gerilim ve primer akım arasındaki faz açısına eşit kabul edilmiştir. Aslında, daha önce de belirtildiği gibi, boştaki akım sinüsoidal değildir ve bir “ eşdeğer ” fazörle sadece yaklaşık olarak gösterilebilir. Diğer yandan boşta çalışma şartlarında bile uç gerilimi endüklenen gerilimden $I_1 \cdot Z_1$ gerilim düşümü kadar farklıdır. Sözü geçen kabul, sonuçları önemli derecede değiştirmedeği esasına göre yapılmıştır (Hopkins, M.,H., 1972).

3.6.Transformatör Kayıplarının İncelenmesi

Transformatörde kayıplar bakır ve demir kayıpları olmak üzere iki kısma ayrılır.

3.6.1. Bakır kayıpları

Bakır kayıpları primer ve sekonder sargıdan geçen akımların meydana getirdiği kayıplar olup, ısı kaybı ($I^2 \cdot R$) olarak da adlandırılır.

3.6.2. Demir kayıpları

Demir kayıpları histeresiz ve fuko kayıpları olmak üzere iki kısma ayrılır. Histeresiz kaybı, demir çekirdeğin moleküllerinin değişen yüklerde mıknatıslanmasından, sürtünme sonucunda oluşan ısıya bağlıdır. Fuko kayıpları ise demir çekirdek içinde, bakırda olduğu gibi endüklenen akımların sebep oldukları ısıya tekabül eder.

3.6.3. Transformatörde kayıpların hesaplanması

Transformatördeki P_T toplam kayıp, P_{fe} boştaki kayıplar (demir kayıpları) ile P_L yüklü durumdaki kayıpların toplamı şeklinde yazılabilir.

$$P_T = P_{fe} + P_L \quad (3.33)$$

Demir çekirdek kaybı veya boştaki kayıp, demir çekirdeğin gerilim uyartımı nedeniyledir. Sinüsoidal olmayan yük akımları için primer gerilimin sinüsoidal şekilde değiştiği kabul edilebilir. IEEE C57.110 standardına göre sinüsoidal olmayan yük akımları için çekirdek kaybında herhangi bir artışa izin verilmemelidir. Mıknatıslama akımı, yük akımına göre oldukça küçük olduğu için harmoniklerin oluşmadığı kabul edilebilir. Bu durumda kayıplarda mıknatıslanma akımının etkisi küçüktür. Yük kayıpları, $R \cdot I^2$ kaybı, P_{fuko} fuko kaybı ve P_{ka} kaçak kayıpların toplamına eşittir. Bu durumda yük kaybı P_L için,

$$P_L = I^2 \cdot R + P_{fuko} + P_{ka} \quad (3.34)$$

yazılabilir. $R \cdot I^2$ kaybı sargılardan geçen akımların meydana getirdiği bakır kayıpları olup, ohmik kayıplar olarak adlandırılabilir. Ohmik kayıplar, sargının direnci belirlenerek, sargılardan geçen akımlar yardımıyla hesaplanabilir. Toplam kaçak ve fuko kaybı empedans deneyi esnasında toplam yük ölçülerek belirlenir. Toplam kayıptan ohmik kaybı çıkartırsak, toplam fuko ve kaçak kaybı için

$$P_{fuko} + P_{ka} = P_{yük} - R \cdot I^2 \quad (3.35)$$

eşitliği yazılabilir. Fuko kaybı, frekansın karesi ve efektif akımın karesi ile değiştiği ve aynı zamanda n , harmonik derecesinin karesi ile orantılı olduğu kabul edilirse,

$$P_{fuko} = \sum_{n=1}^{n=n_{mak}} \left[\frac{I_n}{I_R} \right]^2 \cdot n^2 \quad (3.36)$$

şeklinde yazılabilir. Fuko kaybı düşük frekanslarda frekansın karesi ile değiştiği halde, çok yüksek frekanslarda fuko kaybının frekansın karesiyle değiştiği tartışılmaktadır. Zaman zaman bu kaybı hesaplamak için değişik formüller sunulmuştur. Fuko kaybının azaltılması için sunulan bu formüller oldukça karmaşık olup çeşitli faktörlerin hesaplanmasını gerektirir.

Bu nedenle pratik olarak $R \cdot I^2$ kayıplarının bir yüzdesi olarak ifade etmek formülle hesaplamaya göre tercih edilmektedir. Buradaki % miktarı özellikle transformatörün tasarımındaki tecrübeye dayanır. Benzer yorumlar kaçak kayıplar için de yapılır. Fuko kaybı kaçak akı alanına dik kuvvet hatlarının karesel bir fonksiyonudur. Sargının ucunda alan akısı bükülür ve kaçak akı alanının bir vektör bileşenine dik büyük boyutlu bir dikdörtgen kuvvet hattıdır. Primer ve sekonder sargıların yüksekliklerini aynı seviyeye getirerek sargı uçlarında yoğunlaşan fuko kayıpları azaltılır. Buna rağmen sargı uçlarındaki fuko kayıpları kaçak akının bükülmesi nedeniyle sargının ortasından daha büyük değerdedir. Sargının ucundaki bükülmeyi azaltarak % olarak fuko kayıpları azaltılabilir. Fakat ohmik kayıplar bir sarımda daha az artar. Eğer bir sarımdan daha fazla kullanılırsa fuko kayıpları sirkülasyon akımları nedeniyle artabilir. Küçük transformatörlerde doğal olarak küçük bükülme boyutları nedeniyle düşük akımlar olacaktır.

Kaçak kayıplar, mekanik kısımların sıcaklığını yükseltebilir. Kuru tip transformatörler için bu bölgelerde artan sıcaklıklar, sargı sıcaklığında artışa neden olmazlar. Yağlı transformatörlerde kaçak kayıplar arttıkça yağ ısı ve sargının sıcaklığı artar. Üreticiler kaçak kayıpların hesaplanması için metodların kullanılmasında anlaşılmamaktadır. Yarı iletken doğrultucu transformatörleri için kaçak kayıpların, akımın frekansının karesi ile değiştiği (harmonik derecesinin karesi ile değiştiği) bir standart olarak kabul edilmektedir.

$$P_{ka} = \sum_{h=1}^{n=n_{mak}} \left[\frac{I_n}{I_R} \right]^2 \cdot n^2 \quad (3.37)$$

Transformatördeki kayıplar, sargıların ve çekirdeğin sıcaklığının artmasına neden olur ve ortama ısı olarak yayılır. Çekirdek kaybı için,

$$P_{fe} = \frac{E_1^2}{R_{fe}} \quad (3.38)$$

yazılabilir. Bakır kaybı için ise,

$$P_{cu} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 \quad (3.39)$$

yazılabilir. Kayıpların meydana getirdiği bu ısı transformatörün yalıtımına zarar verecek kadar yüksekse, iletimle uzaklaştırılmalıdır.

Transformatörde yayılan ısının, transformatörün çalıştırıldığı gerilime ve sargılardaki akımlara bağlı olduğu, fakat yük devresindeki güç faktörüne bağlı olmadığı görülür. Bu sebeple daha önceden işaret edildiği gibi; transformatörün gücü kW olarak aktif güçten ziyade, kendine özgü uç geriliminde Volt-Amper biçiminde görünen güç olarak ifade edilir (Linden W. P. 1996).

3.7. Lineer Olmayan Elemanlar

Pratikte elektrik devrelerindeki birçok eleman lineer değildir. Bu şu demektir, ani gerilim, akımla orantılı değildir, akımın türevi veya integrali ile de orantılı değildir. Daha başka bir deyişle, elemanın direnci veya endüktansı ya da kapasitesi sabit olmayıp elemandaki akımın veya gerilimin bir fonksiyonudur. Yarı iletken elemanların çalışması lineer olmayan özelliktedir. Transistörler ve doğrultucular lineer olmayan elemanlardır. Manyetik amplifikatörler demir çekirdeğin doymasına göre çalışırlar.

3.7.1. Lineer olmayan direnç

Lineer olmayan karakteristikli bir dirence sinüsoidal bir gerilim uygulandığında akım gerilimle orantılı olmadığı için akım sinüsoidal olmaz. Bu eleman düşük gerilimlerde az akım, yüksek gerilimde çok akım geçirir. u ile i arasındaki bağılılığı gösteren eğri, sabit direnç elemanına ait doğrusal karakteristik gibi olmayıp eğriseldir.

Akım dalgasının şekli ise, uygulanan gerilimle aynı frekansta bir sinüsoidal dalga ile bu frekansın üç katı frekansta bir sinüsoidal dalganın toplamından meydana gelir. I_1 temel frekanstaki akım, I_3 ise temel frekansın üç katı frekanstaki üçüncü harmonik akımıdır.

3.7.2. Lineer olmayan endüktans

Eğer bir bobinin demirden veya demir alaşımından veya başka ferromanyetik malzemeden bir çekirdeği varsa çekirdeğin içindeki magnetik akı bobindeki akımla orantılı olmaz. Manyetik

doyma oluşur. Karakteristik eğri, düz çizgi olmaz. Çekirdeğin yapısında muhtemelen belli bir hava aralığı bulunacağından histerezisi ihmal edilebilir.

Akım küçük ise akı akımla doğru orantılıdır. Fakat büyük akımlar için akıdaki artışlar akımla az orantılı olur. Bir bobinin içinden sinüsoidal dalgalı bir akım geçerse sinüsoidal bir akı değil, tepesi belli derecede düzleşmiş bir akı dalgası meydana gelir.

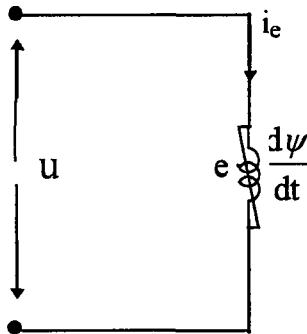
Doyma olmasaydı akı dalgası, gösterilen yüksekliğin hemen hemen iki katına çıkan bir tepeye sahip olurdu. Karakteristik eğrinin doğrusal kısmı uzatılırsa ortaya çıkacak olan akı tahmin edilebilir. Endüktif elemanın uçlarındaki gerilim akının değişme hızı ile orantılıdır.

Eğer dış devre endüktif elemanın uçlarına uygulanan gerilimin sinüsoidal olmasını gerektiriyorsa akım sinüsoidal olamaz. Doymalı bir bobinin uçlarına sinüsoidal bir gerilim uygulandığında oldukça yüksek tepeli bir akım dalgası meydana gelir.

Demir çekirdeğin (ferromanyetik malzemenin) B ile H 'sı arasındaki lineer olmayan bağıntı sebebiyle sinüsoidal gerilim kaynağından uyarılan bir bobinden geçen akım, zamanla sinüsoidal değişmez. Burada öncelikle sargı direncinin ihmal edildiği bir bobin (boşta çalışan bir transformatörün yaklaşık eşdeğeri) hali göz önüne alınmıştır. Bir bobinin devre gösterimi Şekil 3.9'da verilmiştir. Uyarıma akımı,

$$i_e = i_{e1} + i_{e3} + i_{e5} + \dots \quad (3.40)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 3.9. Lineer olmayan (demir çekirdekli) bobin

$$e = \frac{d\psi}{dt} \quad (3.41)$$

'dir.

Uyarma akımının efektif değeri ise;

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{e3}^2 + I_{e5}^2 + \dots} \quad (3.42)$$

'dır. Burada I_{e1} , I_{e3} , I_{e5} ,... harmonik bileşen akımların efektif değerleridirler. Demir çekirdekli cihazlarda i_e ile i_{e1} arasındaki fark genellikle küçüktür. i_e 'nin i_{e1} 'in yerine kullanılmasına izin verir. Bu devrede sargı direnci ve uyarma akımının harmonikleri ihmal edilmiştir. R_{fe} direnci demir çekirdek kayıplarına X_m endüktif reaktansına ve I_m temel mıknatıslama akımına karşılık düşer.

3.7.3. Demir çekirdek kayıpları

Transformatörde demir çekirdek kayıpları, tamamen endüktif reaktansta meydana gelir. Bundan başka, boşta (yüksüz) bir transformatör hava aralığı olmayan bobin gibi davranır. Bu şartlar altında transformatör uyarma akımı bir bobininkine benzer; I_m mıknatıslama ve I_{fe} demir çekirdek kaybı bileşenleri, elemanların sinüsoidal olduklarını kabul edersek, primer sargıda endüklenen e.m.k., eşdeğer devreye sokulan demir çekirdek kayıp elemanına karşılık gelir. Artık sıfır çekirdek kaybı yaklaşımının yapılmadığı transformatörün komple eşdeğer devresi olur. Endüktif geri güç faktörüyle bir yük devresini besleyen transformatörün R_{fe} demir çekirdek kayıplarına tekabül eden gücün eşdeğer devreye R_{fe} direnç elemanının ilave edilmesi ile mümkün olabilir. Böylece, başta lineer eşdeğer devre için yapılan (v). yaklaşımında "ihmal edilen çekirdek kayıpları"nın ihmal edilmediği eşdeğer devre olur.

4. ŞEBEKED E OLUŞAN PROBLEMLERİN TRANSFORMATÖR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

4.1. Anlık Gerilim Değişimlerinin Etkileri

Üreticiler ve tüketiciler, şebeke kaynağının dizaynı ve çalışması için birçok standartlar oluşturarak güç kalitesinin sabit, kesintisiz ve distorsiyonsuz olması yönünde çaba harcamışlardır. Ancak kullanıcı elemanlarının ve bu cihazların ihtiyaçlarının değişmesinden dolayı güç kalitesinde önemli derecede problemler meydana gelmektedir. Bu elemanların (bir çok elektronik cihazları, bilgisayarlar, işlem kontrol donanımları ve haberleşme elemanları) duyarlılığından dolayı tüketiciler istenmeyen işletme şartları ile karşılaşabildikleri gibi uzaktan kontrol elemanlarının kötü çalışmasına, dağıtım sistemlerinin kablolarının aşırı ısınmasına, generatör ve motorların mekanik olarak titreşimlerine, transformatörlerin fuko akımlarının artmasına, rezonans ile kondansatörlerin ve yalıtımın bozulmasına, koruma cihazlarının doğru çalışmamasına, elektrik ölçme aleti ve elektrik sayaçlarının hatalı çalışmasına ve hatta güç sistemlerinin karışıklılığına sebep olur.

Bu karışıklıklar, geçici darbeleri ve geçici sönümlü, kısa süreli etkin değişimi ve kesilmeler, uzun süreli etkin değişimi ve kesilmeler, dalga şeklinin bozulması ve gürültü ortaya çıkması şeklinde olmaktadır (Dugan, R.C., 1996).

4.1.1. Gerilimin anlık düşüşü

Transformatör gerilimindeki anlık düşüşler, güç sistemlerinde kısa devre, motorların kalkışında oluşur. Gücün bir an için kesilmesi bilgisayar ve kontrol devrelerinin, mikro dalga fırınlarının kötü çalışması ve cihazların kapanmasına sebep olur. Gerilimin azalışı % 1 ila % 90 civarındadır. Çoğunlukla 4-10 periyod süresince bu gerilim % 80 civarındadır. 5 periyod civarında bu gerilim % 50 dir.

4.1.2. Gerilimin anlık yükselişi

Transformatör geriliminin anlık yükselişi, büyük yüklerin anlık olarak azalması veya anlık olarak devre dışı kalması sonucu meydana gelir. Anlık gerilim yükselişi yalıtımın

bozulmasına, eleman ve cihazların zarar görmesine neden olur. Üç fazlı sistemlerde tek faz-toprak arızasında da gerilim yükselmesi meydana gelir. Bu tek faz-toprak arızasında gerilim anma gerilimini topraklama katsayısına bağlı bir artma olur. Yıldırım darbeleri veya anahtarlama anında herhangi bir yerdeki gerilim 350 V-2000 V 'a kadar çıkar.

4.1.3. Gerilimin kesilmesi

Güç sisteminde kısa devreler ve hatlarda oluşan karışıklıklar (bozulmalar) ile yıldırım, ağaç dallarının faz iletkenlerine düşmesi, hayvanların iletkenler arasında hareketi sonucu gerilim kesilerek gücün tamamen kaybolmasına sebep olur. Elektronik elemanlarının hasar görmesi, transformatör ve motor yüklerinin yalıtımının bozulması sonucu cihazlar çalışmaz. Darbelerin süresi kısa olmakla beraber mikro μ s 'den ms 'ye kadar sürebilir.

4.1.4. Düşük gerilim ve aşırı yüksek gerilim

Normal olmayan düşük gerilimle veya yüksek gerilimle beslenen cihazların kısa süreli de olsa hasara uğramasına veya tamamen kullanılamaz hale gelmesine neden olur.

4.1.5. Faz açısı farklılığı

Üç fazlı hatlarda dengesiz yüklenmeler faz açısı farklılığına yol açarak ısınmaya neden olur.

4.1.6. Elektriksel gürültü

Elektriksel gürültü iletkenlerde, şalterlerde ve radyo cihazlarında oluşur.

4.1.7. Frekans sapması

Frekansın 50 Hz 'den sapmasıdır. Frekansın sapması anlık yük değişimlerinden oluşur.

4.1.8. Gerilim modülasyonu

Gerilimin çok değişik bölgelerde çalışmasıdır. Gerilimin periyodik olarak artması ve azalması, düşük gerilim regülasyonunda ve periyodik yüklerin çalışmasında oluşur. Bu gibi yükler pompalarda meydana gelir ve servomotorların kötü çalışmasına sebep olur.

4.1.9. Harmonik bozulması

Elektrik şebekesine bağlanacak yükleri meydana getiren aygıtların hemen hemen hepsi sinüsoidal gerilimle beslenmek üzere tasarlanır. Fakat şebeke gerilimi tam sinüsoidal olsa bile, günden güne kullanımı artan endüstriyel, ticari ve konut gibi yerlerdeki yüklerin bazılarının çektiği akım dalgasının biçimi, periyodik olmakla beraber ideal sinüs biçiminden uzaklaşmış bir biçimdedir. Yani bu yükler 50 Hz 'lik temel frekansı bastıran harmonik akımları üretirler.

Böyle bir akım dalgasının içindeki harmonikler (akım harmonikleri) şebeke empedansı üzerinde harmonik gerilim düşümlerine ve dolayısıyla şebekenin gerilim dalgası şeklinin de bozulmasına, yani gerilim harmoniklerinin ortaya çıkmasına yol açarlar. Bundan dolayı gerilim harmoniğinin ortaya çıkması sistemdeki yük elemanının empedansına ve ayrıca şebekeye enjekte edilen akımın genliğine bağlıdır. Bu türlü aygıtların oluşturduğu yükler, “lineer olmayan yükler” olarak bilinir. Bu yüklerde gerilim ile akım arasındaki bağıntı lineer değildir.

4.2. Harmoniklerle İlgili Temel Bağıntılar

Enerji sistemlerinde harmonik etkinliklerinin her geçen gün artması, bu etkilerin minimuma indirilmesi ve sınırlandırmasında kolaylık sağlamak için genel tanım büyüklüklerinin verilmesini zorunlu kılmıştır (Shuter vd. 1989; Heydt vd. 1991). Harmonik bileşenleri sinüsoidal akımlardır ve bunların frekansları 50 Hz 'in katlarıdır. Her elemanın frekansının (f_n) temel frekansa (f_1) oranı harmonik mertebesini verir ve

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilir. Harmonik içeren veya fourier bileşenleri olarak bilinen gerilim ve akım için aşağıdaki tanımlar yapılabilir. Böylece harmonik analizi sırasında ve sonrasında bazı kolaylıklar sağlanır. Örneğin maksimum harmonik mertebesi N olan sinüsoidal olmayan bir akım ve gerilim dalgası fourier serisine açılırsa,

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^N I_{mn} \cdot \sin(n\omega t \pm \varphi_n) \quad (4.2)$$

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^N U_{mn} \cdot \sin(n\omega t \pm \theta_n) \quad (4.3)$$

ifadeleri elde edilir (4.3) 'te verilen gerilim ifadesi efektif değer cinsinden,

$$U_{ef} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} = \left(U_0^2 + \frac{U_{m1}^2 + U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots}{2} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\sum_{n=1}^N U_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada; $U_{m1}, U_{m2}, \dots, U_{mn}$ gerilim bileşenlerinin maksimum değerlerini, $U_1, U_2, \dots, U_n$ ise gerilim bileşenlerinin efektif değerlerini gösterir.

Efektif akım ise benzer şekilde,

$$I_{ef} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} = \left(I_0^2 + \frac{I_{m1}^2 + I_{m2}^2 + \dots}{2} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\sum_{n=1}^N I_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir. Burada; $I_{m1}, I_{m2}, \dots, I_{mn}$ akım bileşenlerinin maksimum değerlerini, $I_1, I_2, \dots, I_n$ ise akım bileşenlerinin efektif değerlerini gösterir. Aktif güç,

$$P = U_0 \cdot I_0 + \sum_{n=1}^N U_n \cdot I_n \cdot \cos(\theta_n - \varphi_n) \quad (4.6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, U_n ve θ_n gerilimin genliği ile açısı; I_n ve φ_n akımın genliği ile açısıdır. Reaktif güç Q ve görünen güç S

$$Q = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin(\theta_1 - \varphi_1) + \sum_{n=2}^N U_n \cdot I_n \cdot \sin(\theta_n - \varphi_n) \quad (4.7)$$

$$S = U_{ef} \cdot I_{ef}^* = \left[\sum_{n=0}^N U_n^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\sum_{n=0}^N I_n^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

$$\text{Güç faktörü} = \frac{\text{Aktif güç}}{\text{Görünen güç}} = \frac{P_{\text{toplam}}}{|U_{ef}| \cdot |I_{ef}|}$$

$$\text{Güç faktörü} = \frac{P_{\text{toplam}}}{\left(U_0^2 + \frac{U_{m1}^2 + U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(I_0^2 + \frac{I_{m1}^2 + I_{m2}^2 + \dots}{2} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (4.9)$$

Gerilim için yüzde olarak toplam harmonik distorsiyonu (% THD_u),

$$\% \text{ THD}_u = \frac{\left[\sum_{n=2}^N U_n^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{U_1} \quad (4.10)$$

Akım için yüzde olarak toplam harmonik distorsiyonu (% THD_i),

$$\% \text{ THD}_i = \frac{\left[\sum_{n=2}^N I_n^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{I_1} \quad (4.11)$$

Gerilim için distorsiyon faktörü (DF_u)

$$DF_u = \frac{\left[\sum_{n=2}^N U_n^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{U} \quad (4.14)$$

Akım için distorsiyon faktörü (DF_i)

$$DF_i = \frac{\left[\sum_{n=2}^N I_n^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{I} \quad (4.15)$$

$$K \text{ faktörü} = \frac{\left[\sum_{n=1}^N n^2 I_n^2 \right]}{\left[\sum_{n=1}^N I_n^2 \right]} \quad (4.16)$$

$$\text{Tepe faktörü} = \frac{U_{\text{tepe}}}{U_{\text{efektif}}} \quad (4.17)$$

Distorsiyon gücü ise

$$D = (S^2 - P^2 - Q_R^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4.18)$$

şeklinde tanımlanır.

4.3. Harmonik Kaynakları

Lineer olmayan yükler (harmonik akım/gerilim kaynakları) üç ana grupta toplanabilir:

- 1) Ferromagnetik (doymalı) elemanlar, motorlar ve transformatörler,
- 2) Floresan lambalar, (sodyum buharlı ve civa buharlı) sokak lambaları , elektrik ark fırınları, elektrik kaynak makinaları,
- 3) Yarı iletken teknolojisi kullanan cihaz veya sistemler (elektronik güç dönüştürücüleri, eviriciler, her türlü doğrultucu, endüstri kontrol işlemcileri, kesintisiz güç kaynakları, yüksek frekans anahtarlama güç kaynakları, ayarlanabilir motor hız kontrol sistemleri,

vinç kontrol sistemleri, bilgisayarlar, proses kontrol cihazları, haberleşme sistemleri, lazer yazıcılar, tıbbi cihazlar, televizyon cihazları gibi).

Lineer olmayan yükler başka bir açıdan şöyle gruplandırılabilir.

- Arzu edilen lineer olmayan yükler; başka lineer olmayan yüklerin ürettiği harmonikler sistemde mevcut ise, bu yükler toplam harmonik distorsiyonunun azalmasına yardımcı olur. (Farklı kaynaklı aynı mertebeli harmoniklerin aşağı yukarı zıt faza düşerek birbirlerini zayıflatması ile).
- Arzu edilmeyen lineer olmayan yükler; başka lineer olmayan yüklerin ürettiği harmonikler sistemde mevcut ise, bu yükler toplam harmonik distorsiyonunun yükselmesine sebep olur. Bu durum farklı kaynaklı aynı mertebeli harmoniklerin üstüste binmesi ile ortaya çıkar (Srinivasan K., 1996).

4.4. Harmonik Etkileri

Bir güç sistemindeki harmonikler daha büyük efektif akımlara, daha büyük tepe akımlarına ve daha yüksek frekanslara neden olurlar. Elektrik güç dağıtım sisteminde nötr akımındaki artış, elektrik kaynak transformatörlerinde aşırı ısınmaya, düşük güç faktörüne, bilgisayar güç kaynaklarının düşük güvenilirliğine neden olur.

Lineer olmayan yüklerin toplam yükler içindeki oranının gittikçe artmakta oluşunun sonucu olarak, elektrik enerji şebekesinde gerilim ve akım dalga şekilleri gittikçe daha bozulmakta (distorsiyona uğramakta) ve bundan da tüketicilere sunulan elektrik enerjisinin kalitesi olumsuz olarak etkilenmektedir.

Gerilim harmoniklerine bağlı olarak ortaya çıkan problemler, transformatörlerin demir kayıpları ile ilgili aşırı ısınma, yalıtım ömürlerinin azalması, verimin düşmesi, motorların arızaları, yalıtımın zorlanması, kondansatör banklarının aşırı gerilimle arızalanması, elektronik kumanda sistemlerindeki bazı cihazların yanlış çalışması gibi problemlerdir.

Akım harmoniklerine bağlı olarak da demir çekirdekli cihazlarda (transformatörün ve motorların) aşırı ısınmasından dolayı ömrünün kısalması, sirkülasyon akımları nedeniyle ilave

I^2R kayıpları, artan çekirdek kayıpları, koruyucu ve güç elektroniği devrelerinde elektromanyetik girişim etkisi, motorların mekanik titreşimi, kondansatör sigortalarının atması ve nötr akımının aşırı şekilde artması yüzünden kabloların aşırı ısınması ile yalıtkanın bozulması, bileşke akım tepe değerinin daha yüksek olması, enerji sayaçları ve aşırı akım röleleri gibi endüksiyon diskli cihazlarda hatalı değerler ölçme, röle ve devre kesicilerinde anlık arızalar, elektromekanik cihazların ısınması, haberleşme sistemlerinde girişim gibi problemler ortaya çıkar. Sistemdeki mevcut empedanslara bağlı olarak manyetik devreler doyuma gidebilir.

Kablo empedansları frekansa bağlı olduğundan 400 Hz ve yukarıdaki frekanslar için ilave gerilim düşümü nedeniyle kablo boyutunda küçük bir etkisi olur.

Bazı frekanslarda rezonans sonucu aşırı gerilimler ve akımlar olabilir.

Bazı cihazlar kurulu kapasiteyi değiştirmezler, (kompanzasyon yapmazlar) fakat harmonik akımları üretirler. Bu akımlar endüstriyel bölge civarında verilen gücün kalitesini etkiler ve dağıtım şebekesinin filtresiz kullanımını imkansızlaştırır. (filtre yapılırsa o zaman kullanılır).

Dolayısıyla gerilim ve akım harmonikleri hem enerji dağıtım kuruluşları hem de tüketiciler yönünden arzu edilmeyen sonuçlar meydana getirmektedir. Bu nedenle harmonik akımların etkileri dikkate alınmalıdır.

Enerji dağıtım sistemlerinde gerilime ilişkin toplam harmonik distorsiyonu % 5'i aşmamalıdır. Akıma ilişkin toplam harmonik distorsiyonu ise çoğu zaman gerilim distorsiyonunun bir kaç katı mertebesinde olup, harmonik kaynaklarına ve sistem yüklerine sıkı sıkıya bağlıdır.

Bunun için enerji üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinin harmonikler yönünden incelenmesi ve müşteri tarafından üretilen harmoniklerin etkilerine karşı çareler üretilmesi çalışmalarında, lineer olmayan yüklerin harmonik spektrumlarının bilinmesi gerekir. Distorsiyonlu periyodik eğrilerin harmoniklerine ayrıştırılması amacıyla analitik metodla, çeşitli lineer olmayan yüklerin distorsiyonlu akım ve gerilim eğrilerine uygulanarak bunların harmonikleri genlik ve faz açıları itibarıyla elde edilmelidir. Alternatif ölçme teknolojileri , analiz metodları ile kontrol ve azaltma teknikleri geliştirilmeli ve standartlara uyulmalıdır.

4.4.1. Transformatörlerdeki harmonikler

Transformatörler temel frekansta minimum kayıpla, bağlı olan yüklere gerekli gücü verebilecek şekilde dizayn edilirler. Akımın harmonik distorsiyonu özellikle aynı şekilde gerilim harmonikleri de önemli miktarda sıcaklık artışına neden olurlar. Bir transformatörü yüksek frekanslarda çalışabilecek şekilde dizayn etmek için tasarımcılar katı iletken yerine bükülebilen kablo kullanımıyla ve daha çok soğutma boşlukları koyacak şekilde farklı dizayn yöntemleri kullanırlar. Harmonik bileşenlerini içeren yük akımı olduğu zaman transformatörün sıcaklık artışının 3 nedeni vardır.

1) Efektif akım: Eğer bir transformatör yük akımı şartlarına göre boyutlandırıldığı zaman harmonik akımları transformatör efektif akımında onun kapasitesinden daha büyük akım meydana getirirler. Bu artan efektif akım iletkenlerdeki kayıplarda artışa neden olur.

2) Fuko akım kayıpları: Bir transformatörde manyetik akımlar tarafından indüklenen akımlar nedeniyle oluşur. Bu indüklenen akımlar sargılarda, çekirdekte ve manyetik alana maruz kalan diğer iletken kısımlarda meydana gelir ve transformatörde ilave ısınmaya neden olur. Transformatör kayıplarındaki bu bileşen fuko akımlarının frekansı ile orantılı olarak artar. Bu yüzden harmonik ısınması transformatör kayıpları için çok önemli bileşendir.

3) Demir çekirdek kayıpları: Transformatör demir çekirdeğinin dizaynı ve uygulanan gerilim üzerinde harmoniklerin etkisi demir çekirdek kayıplarında harmoniklerin bulunmasına göre artacaktır. Demir çekirdek dilimlerindeki fuko akımları gerilim distorsiyonundaki artışla artabilecektir. Bileşke etkisi demir çekirdek dilimlerin kalınlığı ve çeliğin kalitesine göre olacaktır. Harmonikler nedeniyle bu kayıplardaki artışlar genellikle daha önceki iki kayıp kadar etkili değildir.

Fakat aşırı ısınma veya arıza nedeniyle aşırı yüklenme olabilir. Topraklı Y-Y bağlı transformatörlerin hat akımları yaklaşık % 8 oranında üçüncü harmonik bulundurulur. Bu da anma yükünden daha az ısınan transformatörde oldukça düşüktür. Bu transformatör fabrikada ısı deneyinden geçirilmeli ve aşırı yük deneyi uygulamada olabilecek şekilde gerçekleştirilmelidir. Mekanik soğutma problemlerini giderirken değişiklikler iyi bir şekilde yapılmalıdır ve aksi manyetik alandaki iletken elemanlar harmonik akımları ile etkilenebilirler.

Dağıtım şebekeleri için transformatör merkezlerinde en yaygın kullanılan üç bacaklı demir çekirdeklerde sıfır bileşen akıları kaçacaktır. 3, 9, 15 ve diğer harmonikler etkin olarak sıfır bileşendir. Bu yüzden eğer sargı bağlantıları sıfır bileşen akımı akışına imkan verecek şekilde ise bu harmonik akıları, kazan ve çekirdek kelepçelerinde ilave ısınmalara neden olacaklardır. Bu yağda ve tankın içinde kaçak akıda önemli bir artışa neden olur. Bu iki belirti kazanda ısınma sonucunda kabarcık oluşturur.

Akımdaki dc doğrultmalar çekirdekde kaçak akıya neden olabilir. Çekirdek biraz fazla doyuma gider. Örneğin negatif yarı periyod için pozitif yarı periyot normal kalır. Birçok elektronik güç dönüştürücülerinde meydana gelen akım dalga şekilleri simetrik değildir. Bu transformatörün yük tarafındaki doğrultma nedeniyle meydana gelir. Güç transformatörlerinin çoğunda doğrultma nedeniyle meydana gelen problemler çok küçük miktardadır.

Sıkıştırma kelepçesi, izolatör bağlantısı ve diğer iletken elemanlar manyetik alana çok yakın olabilir. Temel frekanstaki kaçak kayıpların etkisi farkedilmeyecek kadar küçük olabilir. Fakat harmonik akılarına maruz kaldığı zaman sıcak nokta meydana getirebilir.

Bu sınıftaki malzemeye, transformatörler ve demir çekirdekli elektromagnetik cihazlar, motorlar dahildir. Çeliğin lineer olmayan mıknatıslama karakteristiği nedeniyle harmonikler meydana gelir. Güç transformatörleri normal olarak mıknatıslama karakteristiğinin doyma noktası altında çalışacak şekilde dizayn edilirler. Bir transformatörün çalışmadaki akı yoğunluğu boşdaki kayıplar, gürültü, çeliğin maliyetinin karmaşık optimizasyonu ve birçok sayıda diğer faktörlere bağlıdır. Bir çok elektrik şebekesi transformatör satıcılarını yüksüz ve yüklü kayıplar için değişik miktarlarda cezalandırırlar ve bu nedenle satıcılar daha düşük maliyetle transformatör özelliklerini sağlamaya çalışırlar. Yüksüz kayıplardaki yüksek bir ceza maliyeti veya demir çekirdeğinin mıknatıslama eğrisindeki doymanın meydana getirdiği harmonik akımları genellikle gürültü meydana getirirler.

Transformatör mıknatıslama akımında dahi normal çalışma geriliminde harmonikler çoktur. Örneğin tam yük akımının % 1 'lik değerinden daha düşüktür. Güç elektroniği dönüştürücüler ve ark elemanları ile yüklü transformatörlerde harmonik akımları anma değerinin % 20 'si veya daha fazlasıdır. Bununla birlikte bunların etkileri özellikle dağıtım

şebekelerinde yüzlerce transformerde farkedilebilir. Sabahın erken saatlerinde çok az gerilim yükseldiği zaman 3 ve 3 'ün katı harmoniklerde önemli bir artış görülmesi çok yaygındır.

Transformatörün yük akımı yetersiz olduğundan artan gerilim daha çok akım meydana getirebilecek o zaman uyarma akımı etkisi daha çok görülecektir. Harmonik gerilim distorsiyonu, transformatörün aşırı uyardan korumak için genellikle ve sadece düşük yük şartları altında görülebilir.

Güç transformatörlerinde yüksek akı yoğunluklu çekirdek malzeme kullanımı sonucu transformatörün ağırlığında azalma ve maliyet azalması dizayn şartları sağlanabilir. Maalesef bu uygulamada, manyetik devrenin doyması ve akı ile akımın veya akı yoğunluğu ile amper-sarım eğrisinin lineersizliğinden kaynaklanan bir takım ciddi problemlerle karşılaşmaktadır.

4.5. Kondansatör Uygulamaları ve Rezonans

Elektrik şebekelerinde gerek reaktif güç kompanzasyonu ve gerekse gerilim regülasyonu için kullanılan kondansatörler ise, belirli koşulların gerçekleşmesi halinde lineer olmayan yüklerin ortaya çıkardığı harmoniklerin etkilerini büyütme kabiliyetine sahiptir. Şöyle ki, aslında kondansatörün kendisi harmonik üretmez fakat sistemin rezonans frekansını düşürebilir, ve harmonik üreten elemanların rezonansa yol açması böylece kolaylaşabilir. Çünkü küçük mertebeli harmonikler genlik olarak daha etkili olanlardır. Bu durum rezonans frekansının

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (4.19)$$

şeklindeki genel bağıntısından görülebilir. Güç faktörü düzeltme kondansatörünün kullanıma girmesinden önce sistemin C değeri çok düşük değerde olup rezonans frekansı kHz mertebelerinde iken, çok daha büyük C değerine sahip olan güç faktörü düzeltme kondansatörünün sisteme ilavesi sonucunda rezonans frekansı birkaç yüz Hz gibi değerlere düşebilmektedir. Sistemin rezonans frekansı lineer olmayan yüklerin ürettiği harmoniklerin frekanslarına yakın olduğu zaman harmoniklerle bağıntılı büyük gerilim ve akım harmonikleri meydana gelebilir, yani sistemdeki enerjinin kalitesi ciddi biçimde etkilenebilir (Gilker, C. vd., 1990).

4.6. Harmoniklere Bağlı Ek Isınma

$I^2 R$ kaybı olarak bilinir. Süperpozisyon teoremi ile toplam kayıp, ayrı ayrı harmonik kayıpların toplamı olarak ifade edilir. Birçok AG veya AA ekipman 50 Hz 'e göre dizayn edilir. Harmonik bileşenlerin göz önüne alınmasıyla bulunacak toplam kayıp (50 Hz kayıp artı harmonik kayıpları) (Subjak Y.S., 1990).

$$I^2 R = R_{50\text{Hz}} * I_{50\text{Hz}}^2 + R_{100\text{Hz}} * I_{100\text{Hz}}^2 + R_{150\text{Hz}} * I_{150\text{Hz}}^2 + \dots \quad (4.20)$$

şeklinde ifade edilir.

4.7. Harmoniklere Bağlı Transformatör Arızaları

Genellikle en çok karşılaşılan arıza biçimleri şunlardır.

- a) Manyetik devrede oluşan arızalar (çekirdekler, boyunduruk ve çekirdek saçlarının dizilme yapısı)
- b) Sargılarda oluşan arızalar (bobinler, kısmi yalıtım ve çıkış uçları)
- c) Dielektrik devrede oluşan arızalar (yağ ve ana yalıtım)
 - a) şıkkındaki arızalar, kötü işçilik, kötü malzeme, kötü dizaynı içine alan üretim nedeniyledir.
 - b) şıkkındaki arızalar, dikkatsiz kurutma ve yalıtımın yetersiz kontrolü ile anormal geçici çalışma ve darbeleri (anlık ark) çalışma şartlarını içere anormal çalışma bu arızalara neden olur.

4.7.1 Harmoniklere bağlı manyetik devre arızaları

Zaman zaman çekirdek tipi transformatörlerle, çekirdek saçların bir araya getirmek amacıyla boyunduruk ve çekirdeğe geçirilmiş olan civatalar etrafında yalıtım bozulması oluşabilir. Harmonik gerilimleri nedeniyle yalıtım zorlanması artmaktadır. Bu arızadan dolayı ortaya çıkan ısı bobin yalıtımında arızaya neden olması sonucu bitişik sargılar arasında bir kısa devreye neden olabilir. Bu nedenle pratikte, büyük güç transformatörlerinin saç çekirdekleri yalıtkan bantlarla sıkıştırılır. Bu konstrüksiyon metodu bacak civata arızalarını giderir.

Boyunduruk sıkıştırma lamaları ve boyunduruklar arasındaki yalıtımın bozulması nedeniyle arızaları olabilir. Bunun sonucunda büyük miktarda sıcaklık meydana getirerek çekirdek ve bobin yalıtımına zarar verebilir. Aynı zamanda transformatörün demir kaybını da artırır.

Verilen etkin gerilim için e.m.k. dalgaları tepesi düzlendiğinde büyük çekirdek kayıpları ve bunun sonucunda, çekirdekde ısınma meydana gelir. Darbe e.m.k. dalgası için $K_f 1.11$ 'den daha büyüktür.

Manyetik devresindeki akı yoğunluğu yüksek olan yüksüz bir transformatör devreye alındığı zaman büyük mıknatıslanma akımları meydana getirir. Bu mıknatıslanma akımı genellikle hızlı bir şekilde azalırken büyük elektromanyetik kuvvetler meydana getirir ve bunun sonucunda sargılardan bu akım geçerken sargılar zorlanır. Bu olay generatöre yakın yerleştirilmiş transformatörlerde devreye sık sık girip çıkma sonucunda sargılarda termik etkilere neden olacaktır.

Manyetik devrelerdeki büyük akı yoğunluğu gerilim ve akımda kabul edilebilir genliklerden daha büyük harmonikler meydana getirecektir. Bunların ciddi ısınma etkileri olabilecektir. Genellikle 3. harmonik önemlidir. Çok anormal şartlar altında üçüncü harmonikten daha büyük harmoniklerde etkili olabilir. Üç fazlı mantel tipi transformatörler, tek fazlı çekirdek tipi transformatör grupları ve mantel tipi transformatörlerde üçüncü harmonik bulunması istenmez. Genellikle çekirdek tipi transformatörlerde üçüncü harmonik ihmal edilebilir.

4.7.2. Harmoniklere bağlı elektrik devre arızaları

Sarımlar arasında kötü lehimlemeler nedeniyle aşırı ısınmalar ve bobinde bölgesel yanmalar oluşturabilir. Akım harmonikleri ek ısınmaya yol açarlar. Bağlantı noktalarında oluşan ısı bir bobinin belli bölgelerine yansıyacaktır ve bu da iletkenlerin çevresindeki yalıtımın kısmen yanmasına ve bunun sonucunda bobinde kısa devreye neden olacaktır. Bu gibi lehim bağlantıları açılabilir ve sargılarda açık devre oluşturabilir.

Aşırı yük altındaki transformatörde harmonik akımları da aşırı yük olarak nitelendirilebilir, yüksek sıcaklıklar oluşur. Sargı yalıtımı kırılganlaşır ve zamanla muhtemelen kavrulup dökülmesine neden olarak sargılar arasında kısa devreler meydana getirir. Kavrulup dökülme

sonucu ortaya çıkan yağ tortusu hem tankın dibine çöker hem de sargılar ve çekirdek üzerinde bir örtü gibi yayılır. Bakır kayıplarının oranı demir kayıplarına göre daha yüksek olan transformatörler aşırı yüklenmeye az dayanıklı olduklarından aşırı yüklerde arıza yapma ihtimalleri daha yüksektir.

4.7.3. Harmoniklere bağlı yalıtım devresindeki arızalar

Transformatörün harmonik akımla uzun süre aşırı yüklenmesi, çıplak bakır ve kurşunun da katkıları sonucunda yağın bozulmasına sebep olabilir. Yağın aşırı ısınması su, asit ve tortu oluşumunu hızlandırır.

4.8. Transformatörlerde Harmonik Etkileri

Sinüsoidal olmayan akımlar çeken alıcıları besleyen üçgen yıldız bağlı bir güç dağıtım transformatörü, aşırı ısınmaya maruz kalır. Harmonikleri fazla olan distorsiyonlu akım dalga şekli transformatör çekirdeği ve bobinlerinde ilave ısınmalar meydana getirir. Bu lineer olmayan yükün ısı faktörü yük altındaki transformatörün normal sıcaklık artışı ile orantılı değişir. Sürekli aşırı ısınma transformatörde yalıtımının bozulmasına ve bunun sonucunda transformatör ömrünün ksalmasına neden olur.

Transformatör sargısı fuko akımı kayıpları yük akımının karesi ve frekansın karesi ile artar. Lineer olmayan bu artış, sinüsoidal olmayan akımlarla yüklenen transformatörlerde aşırı ısınmaya ve anormal sargı sıcaklığı artışlarına sebep olur. Transformatörlerde harmonik yüklerin sebep olduğu ek ısınmayı doğru olarak modellemek için harmonik frekansları göz önüne alınmalıdır.

Harmonik yük akımlarının ısınma etkilerini modellemek için frekanslar dikkate alınmalıdır. K faktörü birim değer akımları kareleri toplamının harmonik mertebesi karesi ile çarpımı şeklinde tarif edilir. K faktörünün hesaplanması frekansın ve akımın transformatör kayıplarına olan önemli etkisini ele almak demektir. Birim-değer yük akımlarının karesi ve harmonik mertebesinin karesine bağlı olan ilave ısınma, sinüsoidal olmayan akımlar besleyen transformatörlerin anormal sargı sıcaklığı yükselmesi yüzünden erken delinmesine yol açar.

4.9. Transformatörün Aşırı Yükte Çalışması

Gerektiğinde belli şartlar altında normal değerin üzerindeki aşırı yüklerde çalışma gerçekleşebilir. Anma değerin üzerindeki aşırı yüklerdeki çalışmalar için soğutma sistemi sürekli olarak maksimum çalışma veriminde çalışmalıdır. Sargılardaki yağ dolaşımının iyi olması için, yağ içindeki tortu ve nem miktarının aşırı olmasına engel olup mümkün olduğu ölçüde yağın temiz olması sağlanmalıdır. Akım harmonikleri transformatörlerin aşırı akımla çalışmasına dolayısıyla ısınmasına yol açar; bu ise ek soğutma ve havalandırma düzenlerini gerektirebilir. Bu tür sürekli çalışma için düşünülen transformatörler ortam sıcaklığı 55 °C veya 65 °C olacak şekilde dizayn edilmelidir.

Transformatörler üzerine aşırı yükleme yapılmamalıdır. Bu sınırlamalar içerisinde yağın genleşme miktarı, basınç miktarı, izolatörlerin, kabloların, lehim bağlantılarının, kademe değiştiricilerin sıcaklığı ve bobin, devre kesici, sigorta ve anahtarlar ile akım transformatörleri gibi donanımlardaki sıcaklıklar kontrol edilmelidir.

4.9.1. Yalıtımın yaşlanması

Yalıtım yaşlanması veya bozulması sıcaklığın ve zamanın bir fonksiyonudur. Çünkü transformatörde bir çok bölgedeki sıcaklık eşit olmadığından en yüksek sıcaklıkta çalışan kısım doğal olarak en fazla yalıtım bozulmasına maruz kalacaktır. Bu nedenle yaşlanma etkilerinin sıcak bölgelerde meydana geldiği düşünülmelidir. Gerilim harmoniklerinden kaynaklanan yalıtım zorlanmasına yol açması bakımından, yalıtımın ömrünü azaltıcı bir faktördür.

4.9.2. Sıcak bölgelerin oluşması

Sargının en sıcak noktasının ömrünü yüke bağlı olarak belirlemede temel faktör sıcaklıktır. Sargılarda gerilim bulunduğundan bir sıcaklık dedektörünün yerleştirilmesindeki zorluklar nedeniyle bu noktadaki sıcaklık doğrudan ölçülemez. En sıcak noktadaki bakır sıcaklığı, soğutma ortamı sıcaklığı, bakırın ortalama sıcaklık artışı ve maksimum izin verilen sıcak nokta değerlerinin toplamıdır. Ortalama sıcaklığı 55 °C olan bir transformatör için 10 °C 'lık

sıcaklık artışına, ortalama sıcaklığı 65 °C olan bir transformatör için 15 °C 'lık sıcaklık artışına müsaade edilebilir.

4.9.3 Transformatörlerin aşırı yüklenmelerinin ömürlerine etkisi

Bir yağlı transformatör için genellikle temel yükleme şartı, anma gerilim değeri ve anma kVA değerinde sürekli yüklü çalışma için tanımlanır. Ancak akım harmoniklerinin ve akım asimetrisinin var olması, soğutma tipi ne olursa olsun, sargı kayıplarını artıracığından normal sıcaklık değerleri aşılabılır. Dolayısıyla genel tanımlama artık geçerliliğini kaybetmiş olur.

Eğer transformatör hava soğutmalı ise ortamın soğutucu hava sıcaklığı 40 °C yi aşamaz. 24 saatlik bir süre için soğutucu havanın ortalama sıcaklığı 30 °C yi geçemez (Soğutucu havanın ortalama sıcaklığı 24 saat sürekli ölçümlerle saptanabilir. Soğutucu ortam dışındaki hava sıcaklığı günlük maksimum ve minimum sıcaklıkların ortalaması olarak alınır).

Normal ömür tahmini için transformatörlerde izin verilebilecek yükleme, özellikle transformatörün dizaynına, anma yükteki sıcaklık artışına, soğutma ortamının sıcaklığına, aşırı yüklenme süresine, yük faktörü ve eğer havalı soğutma kullanılırsa deniz seviyesinden yüksekliğine bağlıdır. Transformatörlerde etiketindeki ortalama sargı direnci ortam sıcaklığı 55 °C veya 65 °C lik artışı temel alarak dizayn edilmesiyle belirlenir. Bununla beraber gerçek çalışmada en sıcak nokta sıcaklığı ortalama sargı sıcaklık artışından daha çok sınırlandırıcı olarak kullanılmalıdır. Transformatörler, 55 °C için 95 °C ye kadar; 65 °C için 110 °C ye kadar en yüksek sıcak bölge ısılarında sürekli çalışırlar. Burada en sıcak nokta sıcaklığını belirleyen bir dedektör yoksa, istenildiği zaman belirlenmiyorsa, harmoniklerin var olması durumunda yük limitinin ne olacağı yaklaşık olarak önceden belirlenmesi gerekir.

Transformatörler, (55 °C değerindeki transformatörler için 95 °C , 65 °C değerindeki transformatörlerde 110 °C) ortalama en sıcak bölge sıcaklığında sürekli çalışabilirler. Bu nedenle termik yaşlanma işletme peryotlarının üst üste toplanması işlemidir. bir toplama işlemidir. Ancak harmoniklerin etkisi ile sınır sıcaklıklar aşıldığından termik yaşlanma süreci de değişmiş olacaktır.

4.10. Aşırı Yük Durumunda Sistem Güvenliği

Aşırı yük durumunda sistem güvenliğini korumak için, güç sistem güvenlikleri belirli transformatörlerin belirli sürede sistemde çalışmaları kritiktir, aşırı yüklenmesi durumunda güç sisteminin güvenliği olmalıdır. Bir bilgi olarak herhangi bir acil durumda aşırı yüklenme sonucunda yalıtım ömründe % 5 lik bir azalma düşünülebilir. Bu tip kritik transformatörler, anahtarlama diyagramlarına göre dizayn edilmelidirler ve devreden çıkma yerine yüksek bir sıcaklıkta alarm verecek röle bağlantıları yapılmalıdır. Harmonik genlikleri ve yüklenme süreleri transformatörde (sistem yükleme grafikleri ve transformatörde okunan maksimum sıcaklıklar kullanılarak) dikkatli bir şekilde tahmin edilmelidir ve transformatörün ömrünü gereksiz yere kısaltmadan çalışma sürdürülmelidir. Bununla sürekli aşırı yüklenmelerin söz konusu olduğu yerlerde, transformatörlerin bundan en az etkilenmesi yönünde gerekli önlemler alınmalıdır.

4.10.1. Aşırı yük sınırları

Yağlı gerilim kademe regülatörleri veya indüksiyon gerilim regülatörleri, güç transformatörlerinde olduğu gibi, kısa süreli aşırı yük kapasitelerine sahiptirler. Bununla beraber aşırı yükler, gerilim kademe regülatörlerinde kontakların yoğun bakımını gerektirebilir veya indüksiyon gerilim regülatörlerinde zıt momentlere veya aşırı titreşimlere neden olabilir. Bu yüzden, aşırı yüklü periyotlar esnasındaki çalışmaların sayısı ve süresi önemlidir. Kontakların bakımı ve kontak kısmındaki yağın kontrolü harmonik yüklü gerilim kademe regülatörlerinde normalde daha sık yapılmalıdır.

Cebri hava soğutmalı transformatörler için fansız çalışmada, sanki doğal soğutmalı transformatörmüş gibi doğal soğutmadaki yük miktarı uygulanır. Cebri soğutmalı transformatörlerdeki tüm pompalar veya fanlar veya hepsi beraber aşağıdaki şartlar altında çalışmadığında nadiren ve transformatörün bozulmadan çalışabilmesi için

- a) 30 °C ortam sıcaklığındaki etiket değerinde yaklaşık bir saatlik normal çalışma anma yük için sürdürülebilir.
- b) 30 °C ortam sıcaklığındaki sargı ve yağlarla yaklaşık iki saatlik anma yük altında çalışma sürdürülebilir.
- c) 30 °C lik ortam sıcaklığındaki soğutuculu çalışmada etiket değerinde sürekli çalışmada yüksüz etiket geriliminde 6 saat süre için çalışma

sürdürülebilir. Bu tanımlar dengeli sinüsoidal yüklenme içindir. Harmoniklerin bulunması halinde etikette verilen güç (akım) değerleri aşılabacağından, çalışma sürelerinin daha az olacağı açıktır.

4.10.2. Aşırı uyarma

Çok aşırı uyarma transformatörlere zarar verebilir. Fakat bu aşırı uyarma eğer çok kısa sürede gerçekleşirse transformatörde bir hasar görülmeyebilir. Uzun süreli aşırı uyarma ile transformatör kazanının dışındaki boya kabarması bunun belirtisi olabilir. Bu da transformatörün çok yüksek bir sıcaklığa eriştiğinin bir belirtisidir. Bununla birlikte içerideki yüksek sıcaklık transformatörün yalıtımına zarar verebilir.

Uygunsuz bir kademe seçimi veya diğer bir olay sonucu, çalışmadaki gerilim çok yükselirse kaçak akı transformatörde ısınmaya neden olabilir. Transformatör çelik çekirdeğinin aşırı doyması sargı iletkenlerine doğru kaçak akı akışına neden olur. Fuko akımları sıcak noktalar meydana getirmişlerdir ve hatta transformatörün diğer demir parçalarında da sıcak noktalar oluşturmuşlardır. Aşırı ısınma transformatörün yalıtımında bozulmaya neden olur. Yazın sıcaklarda aşırı yüklü, yüksek ortam sıcaklıkları ile birlikte aşırı uyarmalar daha sık arızalar meydana getirirler. Bu nedenle özellikle sıcak bölgelerde aşırı uyarmaya yol açmayan kademeler dikkatle seçilmelidir.

Aşırı uyarma aşağıdaki birçok noktaya dikkat edilerek önlenabilir. Bir transformatör %80 veya daha yüksek güç katsayılı kVA değerinde güç verirken sekonder geriliminin %105 değerinde çalışabilmelidir. Yüksüz sekonder gerilimi % 110 değerinde olmalıdır. Bu sınırlar sadece sekonder anma gerilimi veya anma gerilimi ve gücü ile anma frekansında çalışırken uygulanır.

Transformatörün % 100 lük uyarma sınırını aşmayacak şekilde yapıldığı düşünülür. Gerilim kademesini ayarlamak için mühendisin, yüksüz durumda kVA olarak. transformatör anma gücüne, transformatör sekonder anma gerilimindeki empedansına, yapımının deney raporu veya transformatör etiketinden mevcut primer kademelerinin listesine ve transformatörün yüksek gerilim tarafında kaydedilen maksimum ve minimum gerilim dalgalanmaları bilgilerine ihtiyacı vardır.

5. TRANSFORMATÖRÜN LİNEER OLMAYAN PARAMETRELERİNİN ELDE EDİLMESİ

5.1. Transformatör Parametrelerinin Analitik Yoldan Hesaplanması

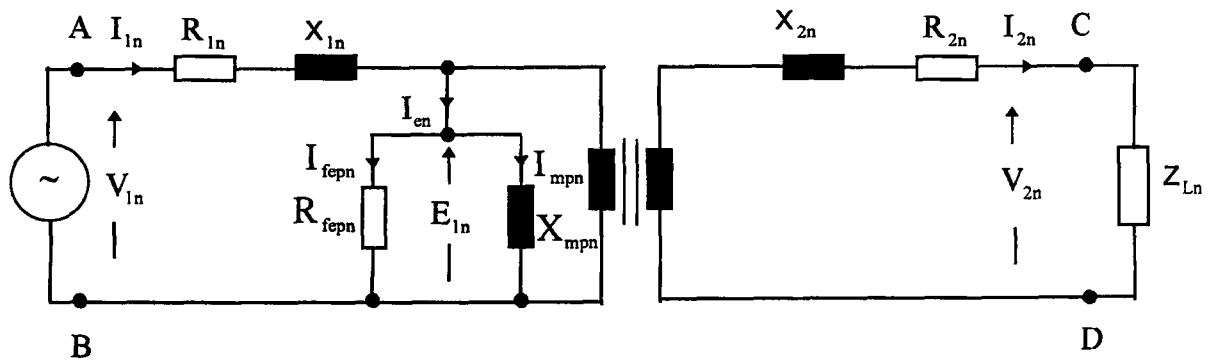
Transformatörlerin, primer ve sekonder sargı parametrelerinden yararlanarak her harmonik frekans için çeşitli kaynak ve yük türleri için lineer olmayan parametrelerinin (R_{fepn} ve X_{mpn}) elde edilmesi mümkündür.

Primer ve sekonder sargı dirençleri (R_{1n}, R'_{2n}) ile kaçak reaktansları (X_{1n}, X'_{2n}) harmonik frekanslarla değişiklik göstermektedir (Hwang, vd., 1987).

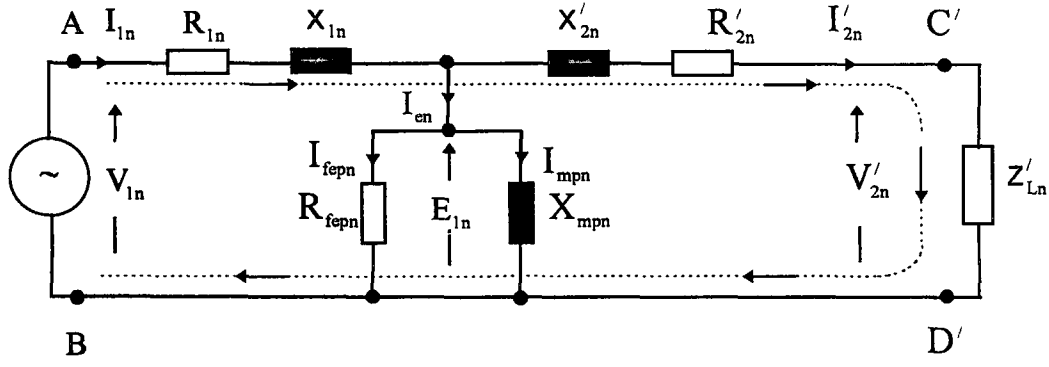
Ölçme ve analitik hesap yönteminin bir arada kullanılması amacıyla, $R_{1n}, X_{1n}; R'_{2n}, X'_{2n}$ parametrelerinin her frekans için bilindiği ya da belirlenebildiği kabul edilir.

Transformatörün analitik hesap ve ölçme yöntemi ile bulunan parametreleri yardımıyla;

1. Her harmonik frekans için bulunacak $R_{fep,n}$ ile $\frac{\sum \left(\frac{E_n^2}{R_{fep,n}} \right)}{\left(\frac{E_1^2}{R_{fep,1}} \right)}$ oranı yani “ demir kayıplarındaki bağıl artış ” hesaplanabilir.



Şekil 5.1 Transformatörün harmonik eşdeğer devresi



Şekil 5.2 Transformatorün primere indirgenmiş harmonik eşdeğer devresi

2. Hwang 'ın makalesinde belirtilen R_n (sargı direncinin n. harmonikteki değeri) yardımıyla

$$\frac{\sum (R_n \cdot I_n^2)}{(R_1 \cdot I_1^2)} \text{ yani oranı " bakır kayıplarındaki bağıl artış " hesaplanabilir.}$$

Şekil 5.1. 'de, bir transformatorün primer, sekonder ve yük devre sabitlerinin bir arada gösterildiği eşdeğer devresi görülmektedir. Burada A-B ve C-D noktaları ölçmelerin yapılacağı uç noktalarını göstermektedir. Şekil 5.2'de ise transformatorün primere indirgenmiş harmonik eşdeğer devresi verilmiştir. Transformatorün primer sargısına bağlı kaynağın empedansı $\bar{Z}_{hn}$, yük empedansı $\bar{Z}_{Ln}$, primer akımı $\bar{I}_{1n}$ ve sekonder akımı $\bar{I}_{2n}$ kompleks olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\bar{Z}_{hn} = R_{hn} + jX_{hn} \quad (5.1)$$

$$\bar{Z}_{Ln} = R_{Ln} + jX_{Ln} \quad (5.2)$$

$$\bar{I}_{1n} = I_{1m} + jI_{1in} \quad (5.3)$$

$$\bar{I}_{2n} = I_{2m} + jI_{2in} \quad (5.4)$$

Yukarıdaki ifadelerde, m indisi gerçel, in indisi sanal bileşenleri göstermektedir. Transformatorün çevirme oranı $\bar{u}_n$ ile gösterilecektir. Şekil 5.2 'deki devrede, kesikli çizgi ile gösterilen çevre dikkate alınarak Kirschoff denklemleri yazılırsa,

Devreye ($R_{Ln} + jX_{Ln}$) empedanslı değişik yükler değerleri bağlandığında, $\ddot{u}_n$ çevirme oranı olmak üzere

$$(R_{hn} + jX_{hn}) \cdot (I_{1m} + jI_{1in}) = (R_{ln} + jX_{ln}) \cdot (I_{1m} + jI_{1in}) + \quad (5.5)$$

$$(R_{2n} \cdot \ddot{u}_n^2 + jX_{2n} \cdot \ddot{u}_n^2) \cdot (I_{2m} + jI_{2in}) / \ddot{u}_n + (R_{Ln} \cdot \ddot{u}_n^2 + jX_{Ln} \cdot \ddot{u}_n^2) \cdot (I_{2m} + jI_{2in}) / \ddot{u}_n$$

yazılabilir. (5-5) ifadesinde gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$(R_{hn} + jX_{hn}) \cdot (I_{1m} + jI_{1in}) - (R_{ln} + jX_{ln}) \cdot (I_{1m} + jI_{1in}) = \quad (5.6)$$

$$(R_{2n} \cdot \ddot{u}_n^2 + jX_{2n} \cdot \ddot{u}_n^2) \cdot (I_{2m} + jI_{2in}) / \ddot{u}_n + (R_{Ln} \cdot \ddot{u}_n^2 + jX_{Ln} \cdot \ddot{u}_n^2) \cdot (I_{2m} + jI_{2in}) / \ddot{u}_n$$

$$((R_{hn} + jX_{hn}) - (R_{ln} + jX_{ln})) \cdot (I_{1m} + jI_{1in}) = \quad (5.7)$$

$$((R_{2n} + jX_{2n}) + (R_{Ln} + jX_{Ln})) \cdot (I_{2m} + jI_{2in}) \cdot \ddot{u}_n$$

$$(I_{2m} + jI_{2in}) \cdot \ddot{u}_n = \frac{((R_{hn} + jX_{hn}) - (R_{ln} + jX_{ln})) \cdot (I_{1m} + jI_{1in})}{((R_{2n} + jX_{2n}) + (R_{Ln} + jX_{Ln}))} \quad (5.8)$$

Yukarıdaki ifadelerde $(I_{2m} + jI_{2in}) \cdot \ddot{u}_n = \bar{I}_{2n} \cdot \ddot{u}_n$ 'ye eşit olduğundan

$$\bar{I}_{2n} \cdot \ddot{u}_n = \frac{[(R_{hn} - R_{ln}) + j(X_{hn} - X_{ln})] \cdot (I_{1m} + jI_{1in})}{((R_{2n} + R_{Ln}) + j(X_{2n} + X_{Ln}))} \quad (5.9)$$

Gerekli işlemler yapılarak

$$SS_n = (R_{hn} - R_{ln}) \times I_{1m} - (X_{hn} - X_{ln}) \times I_{1in} \quad (5.10)$$

$$TT_n = (X_{hn} - X_{ln}) \times I_{1m} + (R_{hn} - R_{ln}) \times I_{1in} \quad (5.11)$$

$$PP_n = SS_n \times (R_{2n} + R_{Ln}) + SS_n \times (X_{2n} + X_{Ln}) \quad (5.12)$$

$$RR_n = TT_n \times (R_{2n} + R_{Ln}) - SS_n \times (X_{2n} + X_{Ln}) \quad (5.13)$$

$$\bar{u}_n \cdot \bar{I}_{2n} = \left[\left(\frac{PP_n}{(R_{2n} + R_{Ln})^2 + (X_{2n} + X_{Ln})^2} \right)^2 + \left(\frac{RR_n}{(R_{2n} + R_{Ln})^2 + (X_{2n} + X_{Ln})^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.14)$$

ifadesi elde edilir. Böylece $\bar{u}_n \cdot \bar{I}_{2n}$ bulunmuş olur. Burada sekonder sargılarından geçen akımın açısı, $\bar{u}_n$ 'den bağımsızdır ve aynı zamanda mutlak değeri de bilinir ve analitik yolla elde edilen $\bar{u}_n \cdot \bar{I}_{2n}$ değeri sekonderden ölçülen $\bar{I}_{2n}$ akıma bölüldüğünde, herhangi bir yükteki $\bar{u}_n$ değeri hesaplanabilir.

$$\bar{u}_n = \left[\left(\frac{PP_n}{(R_{2n} + R_{Ln})^2 + (X_{2n} + X_{Ln})^2} \right)^2 + \left(\frac{RR_n}{(R_{2n} + R_{Ln})^2 + (X_{2n} + X_{Ln})^2} \right)^2 \right]^{1/2} / I_{2n} \quad (5.15)$$

$$I_{Lm} = \left(\frac{PP_n}{(R_{2n} + R_{Ln})^2 + (X_{2n} + X_{Ln})^2} \right) / \bar{u}_n \quad (5.16)$$

$$I_{Lin} = \left(\frac{RR_n}{(R_{2n} + R_{Ln})^2 + (X_{2n} + X_{Ln})^2} \right)^{1/2} \ddot{u}_n \quad (5.17)$$

şeklinde yazılabilir. Diğer taraftan, transformatörün kayıpları ile yükten alınan gücün toplamı transformatöre verilen güce eşittir. Buna göre transformatörün temel güç dengesi denklemi,

$$R_{fesn} = \left((R_{hn} + R_{ln}) \times I_{1n}^2 - (R_{2n} + R_{Ln}) \times I_{2n}^2 \right) \times Z_{yn} \quad (5.18)$$

$$X_{msn} = \left((X_{hn} + X_{ln}) \times I_{1n}^2 - (X_{2n} + X_{Ln}) \times I_{2n}^2 \right) \times Z_{yn} \quad (5.19)$$

$$Z_{yn} = \frac{(Y_n^2 + Z_n^2)^{1/2}}{(Y_n^2 + Z_n^2)} \quad (5.20)$$

$$Y_n = E_n^2 + F_n^2 \quad (5.21)$$

$$Z_n = 2 \times E_n \times F_n \quad (5.22)$$

$$E_n = \left(I_{lm} \times \ddot{u}_n - I_{Lm} \right) / \ddot{u}_n \quad (5.23)$$

$$F_n = \left(I_{lm} \times \ddot{u}_n - I_{Lm} \right) / \ddot{u}_n \quad (5.24)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu ifadelerde R_{fesn} demir direnci ve X_{msn} mıknatıslanma reaktansdır.

Hesaplanan R_{fesn} ve X_{msn} seri bağlantı ifadeleri olduğundan, paralel bağlantı için,

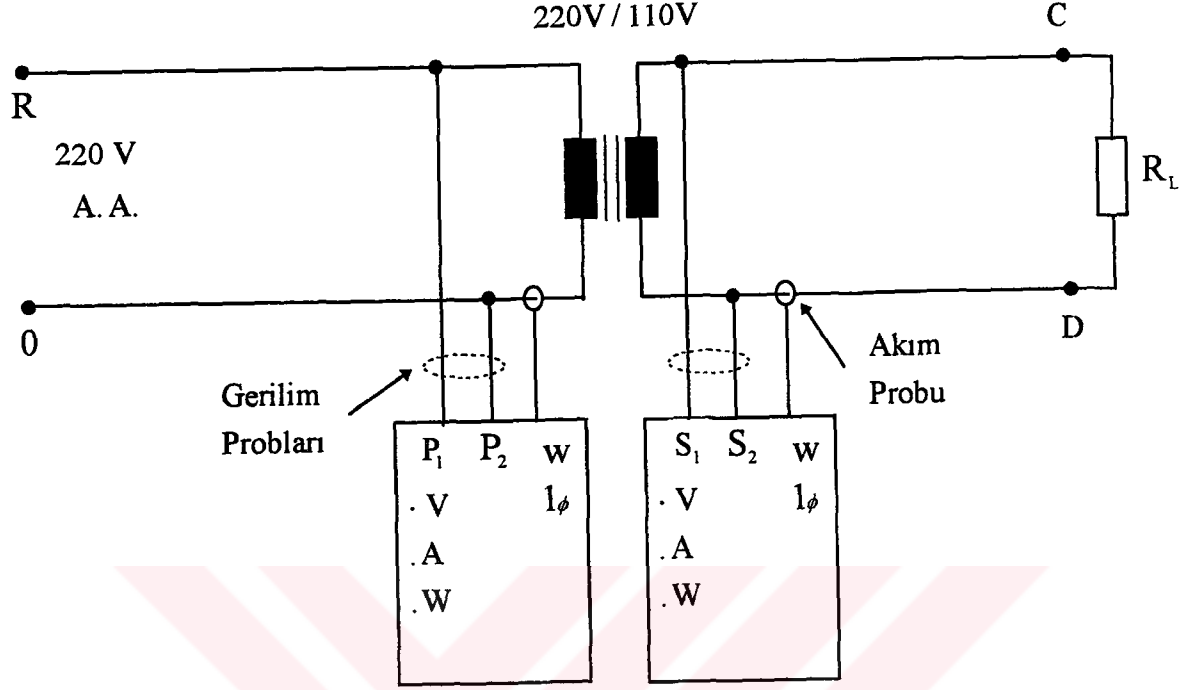
$$R_{fepn} = \frac{(R_{fesn}^2 + X_{msn}^2)}{R_{fesn}} \quad (5.25)$$

$$X_{mpn} = \frac{(R_{fesn}^2 + X_{msn}^2)}{X_{msn}} \quad (5.26)$$

ifadeleri elde edilir. Bulunan bu bağıntılarla transformatöre değişik değerlerde yük bağlandığında ve değişik kaynaklar uygulandığında $\bar{u}_n$, R_{fepn} ve X_{mpn} değerlerinin hesaplanabileceği görülür.

5.2 DENEY DEVRELERİ BAĞLANTI ŞEMALARI ve TABLOLARI (Deneysel Bulgular ve Hesaplama Sonuçları)





Şekil 5.3 Sinusoidal kaynaktan beslenen ve lineer yüklü transformatörün primer ve sekonder tarafındaki harmonik akım, gerilim ve güç ölçümü deney devresi bağlantı şeması

Tablo 5.1
Sinüsoidal Kaynaktan Beslenen ve Lineer Yüklü Transformatörün
Temel ve Harmonik Bileşenlerine ait
Primer Gerilim, Akım ve Empedans Değerleri

Harmonik Katsayıları		1	2	3	4	5	6	7	8
Frekans (Hz)		49.97	99.94	149.91	199.88	249.85	299.82	349.79	399.76
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	99.95	0.11	0.6	0	1.9	0	1.23	0
	Her bir Harmonik için V _{ETKİN} değerleri (V)	220.59	0.25	1.33	0.08	4.19	0.09	2.72	0.06
	Harmonik Açıları (derece)	0	61	158	-110	-165	-54	-11	3
	V _{reel} (V)	220.59	0.1212	-1.233	-0.027	-4.047	0.053	2.67	0.0599
	V _{imajiner} (V)	0	0.2186	0.498	-0.075	-1.084	-0.075	-0.519	0.0031
A K İ M	Harmonik Değerleri (%)	99.95	0.39	1.05	0	1.95	0	1.2	0
	Her bir Harmonik için I _{ETKİN} değerleri (A)	7.33	0.03	0.08	0	0.14	0	0.09	0
	Harmonik Açıları (derece)	-4	-88	-132	105	-162	-89	-32	20
	I _{Reel} (A)	7.312	0.001	-0.0535	-0.0051	-0.133	0	0.0763	0
	I _{Imajiner} (A)	-0.511	-0.0289	-0.0594	-0.0193	-0.0432	0	-0.0477	0
E M P E D A N S	R _H (Ω)	30.02	-7.14	5.686	3.98	29.887	∞	28.21	∞
	X _H (Ω)	2.1	0.39	-15.62	-0.348	-1.566	∞	10.83	∞

Tablo 5.1 devamı

Harmonik Mertebeleleri		9	10	11	12	13	14	15	16
Frekans (Hz)		449.73	499.70	549.67	599.42	649.61	699.58	749.55	799.52
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	0.3	0	0.05	0	0.18	0	0.19	0
	Her bir Harmonik için V _{ETKİN} değerleri (V)	0.66	0.03	0.11	0.05	0.41	0.02	0.42	0.02
	Harmonik Açıları (derece)	-153	122	91	-150	19	112	-143	82
	V _{reel} (A)	-0.588	-0.016	-0.0019	-0.043	0.3876	-0.007	-0.335	0.0028
	V _{imajiner} (V)	-0.3	0.025	0.11	-0.025	0.133	0.0185	-0.252	0.198
A K I M	Harmonik Değerleri (%)	0.19	0	0.10	0	0.2	0	0.15	0
	Her bir Harmonik için I _{ETKİN} değerleri (A)	0.01	0	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0
	Harmonik Açıları (derece)	-167	96	-18	180	-32	-155	-160	-32
	I _{reel} (A)	-0.0097	0	0.0095	0	0.3876	0	-0.0099	0
	I _{imajiner} (A)	-0.0022	0	-0.0031	0	0.0848	0	-0.0034	0
E M P E D A N S	R _H (Ω)	64.04	0	-3.58	∞	25.8	0	40.16	∞
	X _H (Ω)	15.97	0	10.4	∞	31.86	0	12.28	∞

Tablo 5.2
Sinüsoidal Kaynaktan Beslenen ve Lineer Yüklü Transformatörün
Primer Akım, Gerilim ve Güç Değerleri

G E R İ L İ M	$V_{ETKİN}$ (V)	220.7
	V_{TEPE} (V)	304.7
	$V_{D.A.}$ (V)	-0.2
	% THD _v	2.38

A K I M	$I_{ETKİN}$ (A)	7.34
	I_{TEPE} (A)	10.6
	$I_{D.A.}$ (A)	-0.2
	% THD _i	2.58
	TEPE FAKTÖRÜ	1.02

G Ü Ç	P (W)	1620
	S (VA)	1622
	Q (VAR)	120
	GÜÇ FAKTÖRÜ	1

Tablo 5.3
Sinüsoidal Kaynaktan Beslenen ve Lineer Yüklü Transformatörün
Temel ve Harmonik Bileşenlerine ait
Sekonder Gerilim, Akım ve Empedans Değerleri

Harmonik Katsayıları		1	2	3	4	5	6	7	8
Frekans (Hz)		49.97	99.94	149.91	199.88	249.85	299.82	349.79	399.76
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	100	0	0.6	0	1.9	0	1.2	0
	Her bir Harmonik için V _{ETKİN} değerleri (V)	103.3	0	0.6	0	1.9	0	1.3	0
	Harmonik Açıları (derece)	0	0	150	0	-166	0	-11	0
	V _{reel} (V)	103.3	0	-0.519	0	-1.843	0	1.276	0
	V _{imajiner} (V)	0	0	0.3	0	-0.46	0	0.294	0
A K İ M	Harmonik Değerleri (%)	100	0	0.9	0	1	0	1.8	0
	Her bir Harmonik için I _{ETKİN} değerleri (A)	14.3	0	0.1	0	0.1	0	0.3	0
	Harmonik Açıları (derece)	-1	0	69	0	-169	0	-11	0
	I _{reel} (A)	14.297	0	0.0358	0	-0.098	0	0.294	0
	I _{imajiner} (A)	0.249	0	0.0933	0	-0.019	0	-0.057	0
E M P E D A N S	R _L (Ω)	7.013	0	0.939	0	18.974	0	4.33	0
	X _L (Ω)	0.122	0	5.926	0	0.994	0	0	0

Tablo 5.3 devamı

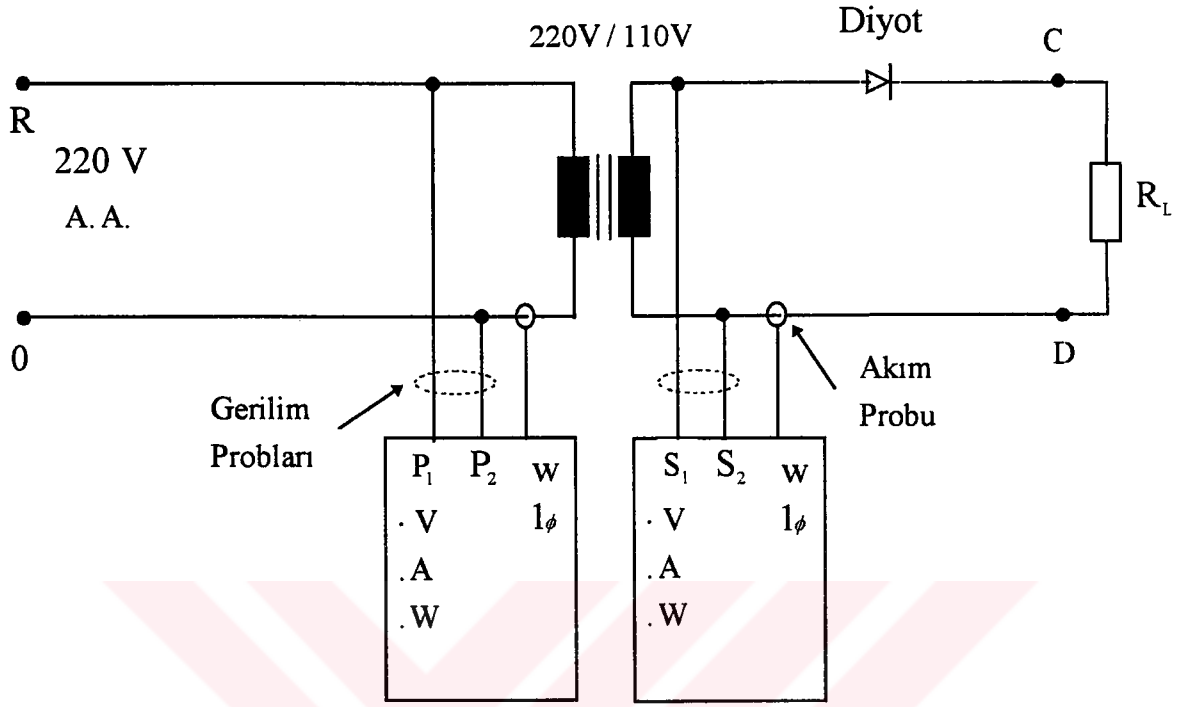
Harmonik Katsayıları		9	10	11	12	13	14	15	16
Frekans (Hz)		449.73	499.70	549.67	599.64	649.61	699.58	749.55	799.52
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	0.2	0	0.1	0	0.2	0	0.2	0
	Her bir Harmonik için $V_{ETKİN}$ değeri (V)	0.2	0	0.1	0	0.2	0	0.2	0
	Harmonik Açıları (derece)	-150	0	91	0	11	0	-138	0
	V_{reel} (V)	-0.173	0	0.0017	0	0.196	0	-0.148	0
	$V_{imajiner}$ (V)	-0.1	0	0.0999	0	0.038	0	-0.133	0
A K I M	Harmonik Değerleri (%)	0.3	0	0.5	0	0.5	0	0.2	0
	Her bir Harmonik için $I_{ETKİN}$ değeri (A)	0	0	0.1	0	0.1	0	0	0
	Harmonik Açıları (derece)	9	0	11	0	4	0	-9	0
	I_{reel} (A)	0	0	0.098	0	0.099	0	0	0
	$I_{imajiner}$ (A)	0	0	0.019	0	0.0697	0	0	0
E M P E D A N S	R_L (Ω)	∞	0	0.1736	0	1.985	0	∞	0
	X_L (Ω)	∞	0	0.984	0	0.244	0	∞	0

Tablo 5.4
Sinüsoidal Kaynaktan Beslenen ve Lineer Yüklü Transformatörün
Sekonder Akım, Gerilim ve Güç Değerleri

G E R İ L İ M	$V_{ETKİN}$ (V)	103.1
	V_{TEPE} (V)	142.3
	$V_{D.A.}$ (V)	0
	% THD _V	2.4

A K I M	$I_{ETKİN}$ (A)	14.3
	I_{TEPE} (A)	19.8
	$I_{D.A.}$ (A)	-0.2
	% THD _I	2.5
	TEPE FAKTÖRÜ	1.38

G Ü Ç	P (W)	1480
	S (VA)	1480
	Q (VAR)	20
	GÜÇ FAKTÖRÜ	1



Şekil 5.4 Sinusoidal kaynaktan beslenen ve lineer olmayan yüklü transformatörün primer ve sekonder tarafındaki harmonik akım, gerilim ve güç ölçümü deney devresi bağlantı şeması

Tablo 5.5
Sinüsoidal Kaynaktan Beslenen ve Lineer Olmayan Yüklü Transformatörün
Temel ve Harmonik Bileşenlerine ait
Primer Gerilim, Akım ve Empedans Değerleri

Harmonik Katsayıları		1	2	3	4	5	6	7	8
Frekans (Hz)		49.81	99.62	149.43	199.24	249.05	298.86	348.67	398.48
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	99.98	1.54	0.96	0.16	1.90	0.11	1.08	0.07
	Her bir Harmonik için V _{ETKİN} değerleri (V)	219.13	3.38	2.11	0.36	4.16	0.23	2.36	0.16
	Harmonik Açıları (derece)	0	-74	152	-98	-162	114	-27	-64
	V _{reel} (V)	219.13	0.93	-1.863	-0.05	-3.956	-0.093	2.102	0.07
	V _{imajiner} (V)	0	-3.25	0.99	-0.356	-1.285	0.21	-1.071	-0.143
A K I M	Harmonik Değerleri (%)	82.89	53.94	12.84	6.44	1.2	1.09	0.99	1.09
	Her bir Harmonik için I _{ETKİN} değerleri (A)	9.97	6.49	1.54	0.78	0.14	0.13	0.12	0.13
	Harmonik Açıları (derece)	-42	89	-77	89	75	-58	15	45
	I _{reel} (A)	7.409	0.113	0.346	0.0136	0.0362	0.0688	0.1159	0.0919
	I _{imajiner} (A)	-6.671	6.469	-1.5	0.7798	0.135	-0.11	0.031	0.919
E M P E D A N S	R _H (Ω)	16.33	-0.498	-0.898	-0.458	-16.18	-1.75	14.615	-0.4
	X _H (Ω)	14.706	-0.1527	-1.034	0.0562	24.92	0.246	-13.16	-1.163

Tablo 5.5 devamı

Harmonik Katsayıları		9	10	11	12	13	14	15	16
Frekans (Hz)		448.29	498.1	547.91	597.72	647.53	697.34	747.15	796.96
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	0.36	0.06	0.13	0.01	0.14	0.01	0.26	0.03
	Her bir Harmonik için $V_{ETKİN}$ değerleri (V)	0.78	0.13	0.28	0.02	0.31	0.03	0.56	0.06
	Harmonik Açıları (derece)	-156	-68	55	-62	1	-122	-148	-84
	V_{reel} (V)	-0.712	0.0486	0.16	0.0094	0.31	-0.015	-0.475	0.006
	$V_{imajiner}$ (V)	-0.317	-0.12	0.23	-0.0176	0.005	-0.025	-0.296	-0.059
A K I M	Harmonik Değerleri (%)	0.83	0.42	0.73	0.36	0.47	0.62	0.31	0.36
	Her bir Harmonik için $I_{ETKİN}$ değerleri (I)	0.10	0.05	0.09	0.04	0.06	0.08	0.04	0.04
	Harmonik Açıları (derece)	-39	52	-15	22	-50	-22	0	-70
	I_{reel} (A)	0.077	0.0307	0.0869	0.037	0.0385	0.074	0.04	0.0136
	$I_{imajiner}$ (A)	-0.063	0.0394	-0.023	0.015	-0.046	0.03	0	-0.0375
E M P E D A N S	R_H (Ω)	-3.54	-1.3	1.064	0.052	3.25	-0.065	-11.87	1.455
	X_H (Ω)	-6.95	-2.25	2.923	-0.497	4.015	-0.37	-7.418	-0.362

Tablo 5.6
Sinüsoidal Kaynaktan Beslenen ve Lineer Olmayan Yüklü Transformatörün
Primer Akım, Gerilim ve Güç Değerleri

G E R İ L İ M	$V_{ETKİN}$ (V)	219.2
	V_{TEPE} (V)	304
	$V_{D.A.}$ (V)	-0.4
	% THD _V	2.89

A K I M	$I_{ETKİN}$ (A)	12.3
	I_{TEPE} (A)	20.39
	$I_{D.A.}$ (A)	-0.14
	% THD _I	55.91
	TEPE FAKTÖRÜ	2.18

G Ü Ç	P (W)	1600
	S (VA)	2640
	Q (VAR)	1470
	GÜÇ FAKTÖRÜ	0.61

Tablo 5.7
Sinüsoidal Kaynaktan Beslenen ve Lineer Olmayan Yüklü Transformatörün
Temel ve Harmonik Bileşenlerine ait
Sekonder Gerilim, Akım ve Empedans Değerleri

Harmonik Katsayıları		1	2	3	4	5	6	7	8
Frekans (Hz)		49.81	99.62	149.43	199.24	249.05	298.86	348.67	398.48
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	99.6	7.6	3.1	1.6	1.90	0.2	1.2	0.7
	Her bir Harmonik için $V_{ETKİN}$ değerleri (V)	101	7.8	3.1	1.6	1.9	0.2	1.2	0.7
	Harmonik Açıları (derece)	0	139	167	163	-158	-32	-39	139
	V_{reel} (V)	100	-5.8869	-3.02	-1.53	-1.76	0.1696	0.932	-0.528
	$V_{imajiner}$ (V)	0	5.117	0.697	0.4678	-0.711	-0.106	-0.755	0.459
A K İ M	Harmonik Değerleri (%)	92.1	38.1	2.2	7.4	0.6	2.1	1.2	2.3
	Her bir Harmonik için $I_{ETKİN}$ değerleri (I)	12.4	5.1	0.3	1	0.1	0.3	0.1	0.3
	Harmonik Açıları (derece)	-2	-100	70	-98	82	-98	-45	-126
	I_{reel} (A)	12.392	-0.885	0.1026	-0.139	0.0139	-0.041	0.0707	-0.176
	$I_{imajiner}$ (A)	-0.432	-5.022	0.2819	-0.99	0.099	-0.297	-0.0707	-0.242
E M P E D A N S	R_L (Ω)	8.059	-0.787	-1.259	-0.25	-9.5	0.27	11.934	-0.203
	X_L (Ω)	0.28	-1.31	10.256	-1.58	16.454	0.609	1.254	-2.324

Tablo 5.7 devamı

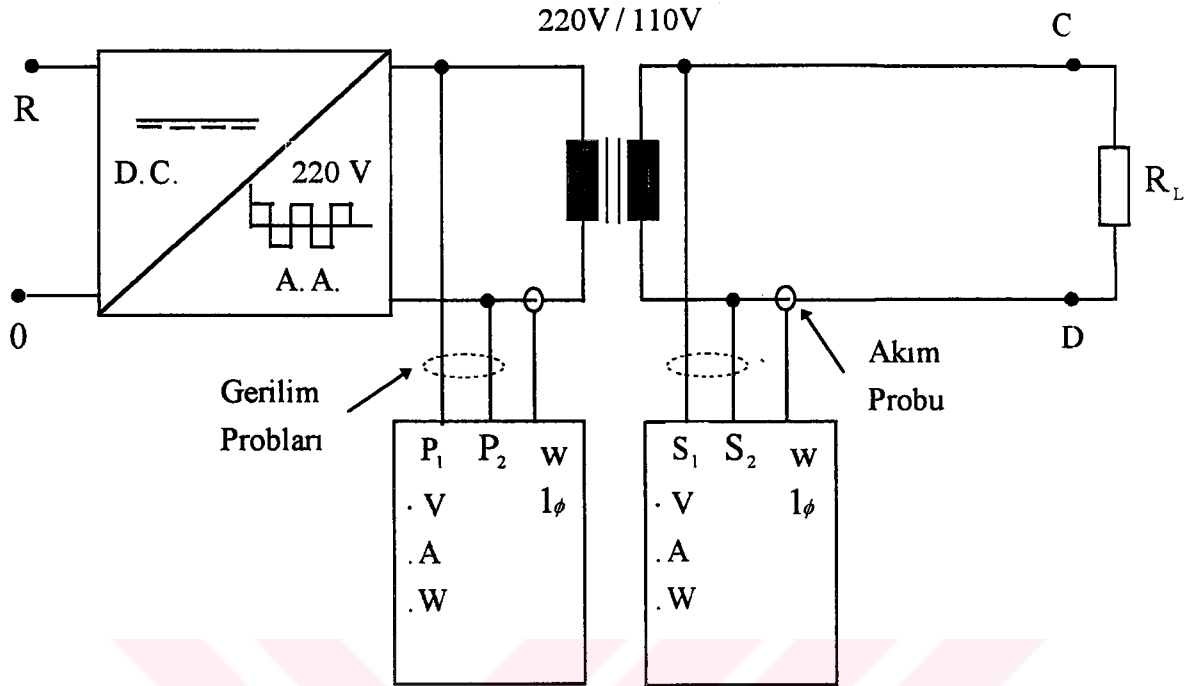
Harmonik Katsayıları		9	10	11	12	13	14	15	16
Frekans (Hz)		448.29	498.1	547.91	597.72	647.53	697.34	747.15	796.96
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	0.5	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1
	Her bir Harmonik için $V_{ETKİN}$ değerleri (V)	0.5	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1
	Harmonik Açıları (derece)	-164	124	-45	120	-52	128	-151	80
	V_{reel} (V)	-0.48	-0.111	0.1414	-0.05	0.0615	-0.123	-0.349	0.0173
	$V_{imajiner}$ (V)	-0.1378	0.165	-0.1414	0.0866	-0.0788	0.1576	-0.1939	0.0984
A K İ M	Harmonik Değerleri (%)	0.4	0.6	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	0.3
	Her bir Harmonik için $I_{ETKİN}$ değerleri (I)	0	0.1	0	0.1	0	0	0	0
	Harmonik Açıları (derece)	91	-140	44	-131	17	-77	174	75
	I_{reel} (A)	0	-0.0766	0	-0.0656	0	0	0	0
	$I_{imajiner}$ (A)	0	-0.0642	0	0.0754	0	0	0	0
E M P E D A N S	R_S (Ω)	∞	-0.209	∞	-0.325	∞	∞	∞	∞
	X_S (Ω)	∞	-1.989	∞	-0.9455	∞	∞	∞	∞

Tablo 5.8
Sinüsoidal Kaynaktan Beslenen ve Lineer Olmayan Yüklü Transformatörün
Sekonder Akım, Gerilim ve Güç Değerleri

G E R İ L İ M	$V_{ETKİN}$ (V)	101.5
	V_{TEPE} (V)	143.5
	$V_{D.A.}$ (V)	-1.6
	% THD _v	8.7

A K I M	$I_{ETKİN}$ (A)	13.4
	I_{TEPE} (A)	17.7
	$I_{D.A.}$ (A)	-0.3
	% THD _i	39
	TEPE FAKTÖRÜ	1.32

G Ü Ç	P (W)	1230
	S (VA)	1233
	Q (VAR)	90
	GÜÇ FAKTÖRÜ	1



Şekil 5.5 Sinusoidal olmayan kaynaktan beslenen ve lineer yüklü transformatörün primer ve sekonder tarafındaki harmonik akım, gerilim ve güç ölçümü deney devresi bağlantı şeması

Tablo 5.9
Sinüsoidal Olmayan Kaynaktan Beslenen ve Lineer Yüklü Transformatörün
Temel ve Harmonik Bileşenlerine ait
Primer Gerilim, Akım ve Empedans Değerleri

Harmonik Katsayıları		1	2	3	4	5	6	7	8
Frekans (Hz)		51.04	102.09	153.13	204.18	255.22	306.27	357.31	408.35
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	90.43	0.08	30.34	0.04	18.03	0.03	12.88	0.01
	Her bir Harmonik için V _{ETKİN} değerleri (V)	204.34	0.17	68.55	0.09	40.75	0.06	29.09	0.03
	Harmonik Açıları (derece)	0	167	-1	-174	-1	148	0	-79
	V _{reel} (V)	204.34	-0.165	68.54	-0.089	40.743	-0.0509	29.09	0.0057
	V _{imajiner} (V)	0	0.038	-1.196	-0.0094	-0.711	0.0318	0	-0.0294
A K I M	Harmonik Değerleri (%)	91.91	0.39	29.78	0.24	17.05	0.16	11.64	0
	Her bir Harmonik için I _{ETKİN} değerleri (I)	6.84	0.03	2.22	0.02	1.27	0.01	0.87	0
	Harmonik Açıları (derece)	-4	100	-13	93	-19	86	-23	72
	I _{reel} (A)	6.823	-0.0052	2.163	-0.001	1.2	0.0007	0.8	0
	I _{imajiner} (A)	-0.477	0.0295	-0.5	0.2	-0.413	0.0097	-0.34	0
E M P E D A N S	R _s (Ω)	29.8	2.21	30.2	-0.235	30.51	2.816	30.778	∞
	X _s (Ω)	2.083	5.216	6.42	4.493	9.915	5.297	13.065	∞

Tablo 5.9 devamı

Harmonik Katsayıları		9	10	11	12	13	14	15	16
Frekans (Hz)		459.4	510.44	561.49	612.53	663.57	714.62	765.66	816.71
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	10.01	0.01	8.20	0.01	6.95	0.02	5.99	0.02
	Her bir Harmonik için $V_{ETKİN}$ değerleri (V)	22.63	0.03	18.53	0.02	15.70	0.037	13.53	0.05
	Harmonik Açıları (derece)	-1	-180	-1	165	-1	139	-1	138
	V_{reel} (V)	22.626	-0.03	18.527	-0.0194	15.697	-0.0377	13.521	-0.012
	$V_{imajiner}$ (V)	-0.395	0	-0.323	0.005	-0.274	0.0328	-0.236	0.0485
A K I M	Harmonik Değerleri (%)	8.67	0.05	6.84	0.04	5.55	0.05	4.61	0.04
	Her bir Harmonik için $I_{ETKİN}$ değerleri (I)	0.65	0.00	0.51	0.00	0.41	0.00	0.34	0.00
	Harmonik Açıları (derece)	-27	81	-30	68	-34	68	-37	70
	I_{reel} (A)	0.579	0	0.44	0	0.34	0	0.271	0
	$I_{imajiner}$ (A)	-0.295	0	-0.255	0	-0.229	0	-0.204	0
E M P E D A N S	R_H (Ω)	31.29	∞	31.77	∞	32.115	∞	30.92	∞
	X_H (Ω)	15.262	∞	17.617	∞	20.855	∞	23.39	∞

Tablo 5.10
Sinüsoidal Olmayan Kaynaktan Beslenen ve Lineer Yüklü Transformatörün
Primer Akım, Gerilim ve Güç Değerleri

G E R İ L İ M	$V_{ETKİN}$ (V)	226
	V_{TEPE} (V)	266.6
	$V_{D.A.}$ (V)	-0.2
	% THD _v	42.32

A K I M	$I_{ETKİN}$ (A)	7.44
	I_{TEPE} (A)	8.2
	$I_{D.A.}$ (A)	-0.03
	% THD _i	39.29
	TEPE FAKTÖRÜ	1.10

G Ü Ç	P (W)	1660
	S (VA)	1680
	Q (VAR)	100
	GÜÇ FAKTÖRÜ	0.99

Tablo 5.11
Sinüsoidal Olmayan Kaynaktan Beslenen ve Lineer Yüklü Transformatörün
Temel ve Harmonik Bileşenlerine ait
Sekonder Gerilim, Akım ve Empedans Değerleri

Harmonik Katsayıları		1	2	3	4	5	6	7	8
Frekans (Hz)		51.04	102.08	153.12	204.16	255.2	306.24	357.28	408.32
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	91.2	0.1	30.3	0.1	17.7	0.1	12.5	0.1
	Her bir Harmonik için V _{ETKİN} değerleri (V)	95.1	0.1	31.6	0.1	18.5	0.1	13	0.1
	Harmonik Açıları (derece)	0	186	-1	111	-1	107	-1	123
	V _{reel} (V)	95.1	-0.099	31.595	-0.036	18.497	-0.029	12.998	-0.0544
	V _{imajiner} (V)	0	-0.01	-0.551	0.093	-0.322	0.0956	-0.226	0.083
A K İ M	Harmonik Değerleri (%)	92	0.1	29.7	0.1	17	0.1	11.7	0.1
	Her bir Harmonik için I _{ETKİN} değerleri (I)	13.16	0.02	4.25	0.01	2.43	0.01	1.67	0.01
	Harmonik Açıları (derece)	1	143	-5	184	-7	95	-9	112
	I _{reel} (A)	13.158	-0.016	4.233	-0.0099	2.411	-0.0009	1.65	-0.0037
	I _{imajiner} (A)	0.23	0.012	-0.37	-0.0007	-0.296	0.00996	-0.26	0.0093
E M P E D A N S	R _L (Ω)	7.225	3.656	7.417	2.92	7.57	9.781	7.71	9.81
	X _L (Ω)	-0.126	3.41	0.518	-9.563	0.795	2.079	1.083	1.908

Tablo 5.11 devamı

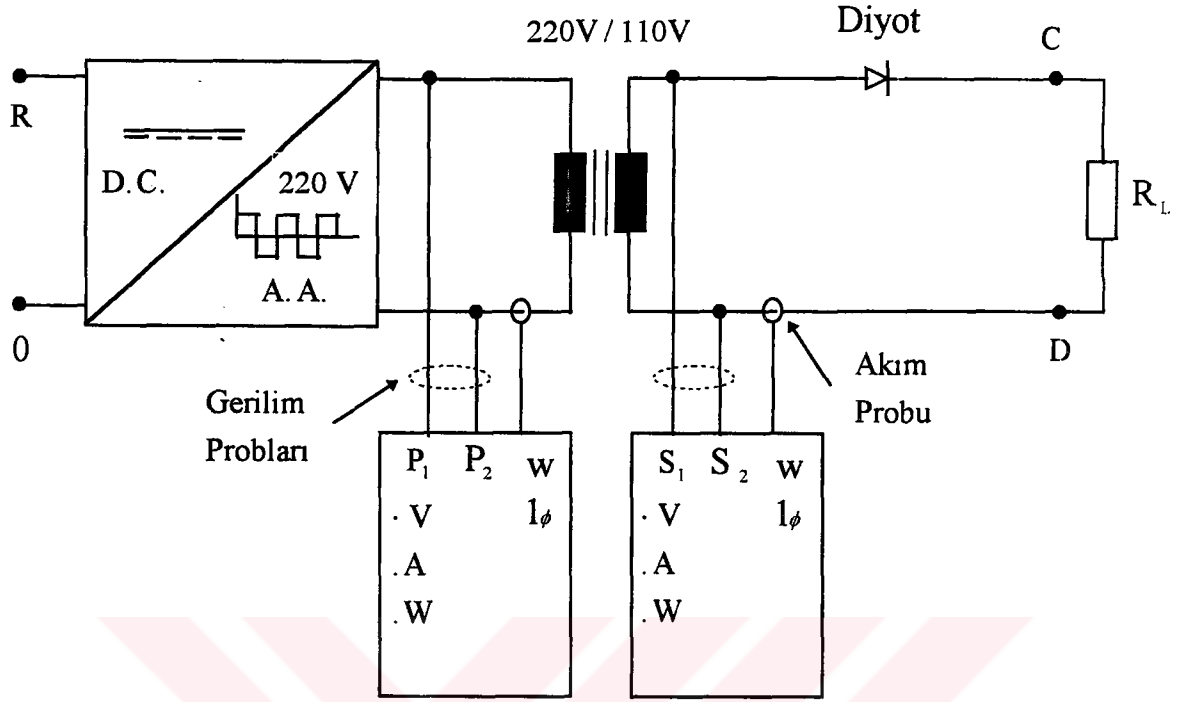
Harmonik Katsayıları		9	10	11	12	13	14	15	16
Frekans (Hz)		459.36	510.4	561.44	612.48	663.52	714.56	765.6	816.64
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	9.5	0.1	7.6	0.1	6.3	0.1	5.3	0.1
	Her bir Harmonik için V _{ETKİN} değerleri (V)	9.9	0.1	7.6	0.1	6.5	0.1	5.5	0.1
	Harmonik Açıları (derece)	-1	85	1	102	1	103	2	104
	V _{reel} (V)	9.898	0.0087	7.5988	-0.0208	6.5	-0.0224	5.4966	-0.0241
	V _{imajiner} (V)	-0.173	0.00996	0.1326	0.0978	0.1134	0.097	0.1919	0.097
A K İ M	Harmonik Değerleri (%)	8.7	0.1	6.9	0.1	5.6	0.1	4.6	0.1
	Her bir Harmonik için I _{ETKİN} değerleri (I)	1.25	0.01	0.98	0.01	0.8	0.01	0.66	0.01
	Harmonik Açıları (derece)	-10	89	-11	95	-11	96	-12	91
	I _{reel} (A)	1.23	0.00017	0.962	-0.00087	0.785	-0.001	0.645	-0.00017
	I _{imajiner} (A)	-0.217	0.00999	-0.187	0.00996	-0.152	0.01	-0.137	0.01
E M P E D A N S	R _L (Ω)	7.82	9.975	7.585	9.925	7.947	9.925	8.085	9.74
	X _L (Ω)	1.238	-0.697	1.61	1.21	1.689	1.218	2.016	2.25

Tablo 5.12
Sinüsoidal Kaynaktan Beslenen ve Lineer Yüklü Transformatörün
Sekonder Akım, Gerilim ve Güç Değerleri

G E R İ L İ M	$V_{ETKİN}$ (V)	104.5
	V_{TEPE} (V)	115.6
	$V_{D.A.}$ (V)	0.1
	% THD _V	41

A K I M	$I_{ETKİN}$ (A)	14.33
	I_{TEPE} (A)	15.39
	$I_{D.A.}$ (A)	-0.03
	% THD _I	39.2
	TEPE FAKTÖRÜ	1.07

G Ü Ç	P (W)	1490
	S (VA)	1500
	Q (VAR)	1
	GÜÇ FAKTÖRÜ	1



Şekil 5.6 Sinusoidal olmayan kaynaktan beslenen ve lineer olmayan yüklü transformatörün primer ve sekonder tarafındaki harmonik akım, gerilim ve güç ölçümü deney devresi bağlantı şeması

Tablo 5.13
Sinüsoidal Olmayan Kaynaktan Beslenen ve Lineer Olmayan Yüklü
Transformatörün Temel ve Harmonik Bileşenlerine ait
Primer Gerilim, Akım ve Empedans Değerleri

Harmonik Katsayıları		1	2	3	4	5	6	7	8
Frekans (Hz)		51.2	102.4	153.6	204.8	256	307.2	358.4	409.6
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	91.6	1.8	29.2	0.4	16.9	0.5	11.9	0.5
	Her bir Harmonik için V _{ETKİN} değerleri (V)	222	4	71	1	41	1	29	1
	Harmonik Açıları (derece)	0	-131	-4	-32	-6	4	-8	3
	V _{reel} (V)	222	-2.62	70.827	0.84	40.775	0.9975	28.717	0.9986
	V _{imajiner} (V)	0	-3.018	-4.9527	-0.53	-4.285	0.0697	-4.036	0.0523
A K İ M	Harmonik Değerleri (%)	76.9	47	32.8	19.6	14.3	7.6	6.1	4.6
	Her bir Harmonik için I _{ETKİN} değerleri (I)	8.4	5.1	3.6	2.1	1.6	0.8	0.7	0.5
	Harmonik Açıları (derece)	-60	96	-72	84	-75	79	-65	65
	I _{reel} (A)	4.2	-0.533	1.112	0.2195	0.4141	0.1526	0.2958	0.21131
	I _{imajiner} (A)	-7.274	5.072	-3.423	2.088	-1.545	0.7853	-0.634	0.453
E M P E D A N S	R _H (Ω)	13.21	-0.534	7.388	-0.208	9.183	0.323	22.56	0.939
	X _H (Ω)	22.887	0.573	18.286	-0.428	23.923	-1.207	34.745	-1.765

Tablo 5.13 devamı

Harmonik Katsayıları		9	10	11	12	13	14	15	16
Frekans (Hz)		460.8	512	563.2	614.4	665.6	716.8	768	819.2
GERİLİM	Harmonik Değerleri (%)	9.2	0.4	7.6	0.4	6.4	0.3	5.6	0.3
	Her bir Harmonik için V _{ETKİN} değerleri (V)	22	1	18	1	16	1	14	1
	Harmonik Açıları (derece)	-11	-6	-12	-12	-14	-2	-17	-4
	V _{reel} (V)	21.595	0.994	17.606	0.978	15.524	0.9994	13.388	0.9975
	V _{imajiner} (V)	-4.1978	-0.104	-3.742	-0.208	-3.87	-0.0349	-4.093	-0.07
AKIM	Harmonik Değerleri (%)	5.4	3.3	3.5	2.6	3.3	2	2.2	1.7
	Her bir Harmonik için I _{ETKİN} değerleri (I)	0.6	0.4	0.4	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2
	Harmonik Açıları (derece)	-71	77	-68	56	-76	67	-79	36
	I _{reel} (A)	0.195	0.09	0.15	0.167	0.0967	0.078	0.038	0.16
	I _{imajiner} (A)	-0.567	0.389	-0.37	0.248	-0.388	0.184	-0.196	-0.117
EMPEDANS	R _H (Ω)	18.333	0.304	25.163	1.248	18.778	1.792	32.863	3.83
	X _H (Ω)	31.754	-2.48	37.306	-3.09	35.318	-4.668	61.81	-3.214

Tablo 5.14
Sinüsoidal Olmayan Kaynaktan Beslenen ve Lineer Olmayan Yüklü
Transformatörün Primer Akım, Gerilim ve Güç Değerleri

G E R İ L İ M	$V_{ETKİN}$ (V)	242
	V_{TEPE} (V)	269
	$V_{D.A.}$ (V)	1
	% THD _v	40.1

A K I M	$I_{ETKİN}$ (A)	10.9
	I_{TEPE} (A)	22.5
	$I_{D.A.}$ (A)	-0.4
	% THD _i	63.9
	TEPE FAKTÖRÜ	2.06

G Ü Ç	P (W)	1100
	S (VA)	2600
	Q (VAR)	1600
	GÜÇ FAKTÖRÜ	0.40

Tablo 5.15
Sinüsoidal Olmayan Kaynaktan Beslenen ve Lineer Olmayan Yüklü
Transformatörün Temel ve Harmonik Bileşenlerine ait
Sekonder Gerilim, Akım ve Empedans Değerleri

Harmonik Katsayıları		1	2	3	4	5	6	7	8
Frekans (Hz)		51.2	102.4	153.6	204.8	256	307.2	358.4	409.6
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	93.3	4.4	26	4	14.7	2.7	10.5	2.3
	Her bir Harmonik için $V_{ETKİN}$ değerleri (V)	103.9	4.9	28.9	4.5	16.4	3	11.7	2.6
	Harmonik Açıları (derece)	0	134	-8	161	-14	160	-20	155
	V_{reel} (V)	103.9	-3.4038	28.618	-4.254	15.918	-2.819	10.944	-2.356
	$V_{imajiner}$ (V)	0	3.5247	-4.022	1.465	-3.967	1.026	-4	1.0988
A K İ M	Harmonik Değerleri (%)	92.4	5.6	28	3.8	15.7	2.5	11.1	2.4
	Her bir Harmonik için $I_{ETKİN}$ değerleri (I)	7.24	0.44	2.19	0.3	1.23	0.2	0.87	0.19
	Harmonik Açıları (derece)	-2	-94	-17	-141	-22	-155	-29	-164
	I_{reel} (A)	7.235	-0.0307	2.094	-0.233	1.14	-0.18	0.76	-0.1826
	$I_{imajiner}$ (A)	-0.2526	-0.4389	-0.64	-0.188	-0.46	-0.084	-0.421	-0.052
E M P E D A N S	R_L (Ω)	14.342	-7.45	13.03	7.948	13.2	14.99	13.282	10.327
	X_L (Ω)	0.5	-8.276	2.064	-12.72	0.465	0.523	2.103	-8.977

Tablo 5.15 devamı

Harmonik Katsayıları		9	10	11	12	13	14	15	16
Frekans (Hz)		46.8	512	563.2	614.4	665.6	716.8	768	819.2
G E R İ L İ M	Harmonik Değerleri (%)	7.7	2.2	6.3	1.8	5.4	1.5	4.6	1.4
	Her bir Harmonik için V _{ETKİN} değerleri (V)	8.6	2.4	7	2	6	1.7	5.1	1.5
	Harmonik Açıları (derece)	-25	150	-30	143	-35	136	-41	131
	V _{reel} (V)	7.794	-2.078	6.062	-1.597	4.915	-1.223	3.849	-0.984
	V _{imajiner} (V)	-3.634	1.2	-3.5	1.203	-3.44	1.18	-3.345	1.132
A K I M	Harmonik Değerleri (%)	8.1	2.1	6.4	1.7	5.5	1.4	4.6	1.4
	Her bir Harmonik için I _{ETKİN} değerleri (A)	0.63	0.17	0.5	0.13	0.43	0.11	0.36	0.11
	Harmonik Açıları (derece)	-34	-179	-39	172	-44	167	-50	160
	I _{reel} (A)	0.522	-0.17	0.388	-0.128	0.309	-0.107	0.231	-0.103
	I _{imajiner} (A)	-0.352	-0.03	-0.314	0.018	-0.298	0.024	-0.275	0.037
E M P E D A N S	R _L (Ω)	13.48	12.1	13.827	13.455	13.781	13.247	13.992	11.926
	X _L (Ω)	0.476	-7.27	2.19	-7.458	2.182	-7.96	2.216	-6.611

Tablo 5.16
Sinüsoidal Olmayan Kaynaktan Beslenen ve Lineer Olmayan Yüklü
Transformatörün Sekonder Akım, Gerilim ve Güç Değerleri

G E R İ L İ M	$V_{ETKİN}$ (V)	111.4
	V_{TEPE} (V)	131.6
	$V_{D.A.}$ (V)	-1.1
	% THD _v	35.9

A K I M	$I_{ETKİN}$ (A)	7.84
	I_{TEPE} (A)	9.5
	$I_{D.A.}$ (A)	-0.03
	% THD _i	38.1
	TEPE FAKTÖRÜ	1.21

G Ü Ç	P (W)	870
	S (VA)	870
	Q (VAR)	30
	GÜÇ FAKTÖRÜ	0.99

5.3. Deney Cismi Özellikleri

- 1) Şebeke gerilimi 220 V, 50 Hz, bir fazlı şebeke sinüsoidal dalga şekline sahiptir.
- 2) Yarım dalga doğrultucu
- 3) İnverter (Evirici) 1 Fazlı kare dalga inverter 220 V, 10 A, 50 Hz
- 4) 2 kVA 'lık transformatör / Mantel tipi
- 5) Kademeli yük direnci
- 6) Harmonik analizör cihazı (Fluke tipi)
- 7) Oto transformatörü (Kısa devre deneyleri için)

5.4. Deneylerde Kullanılan Harmonik Analizörün Özellikleri

Freakans değeri , Temel bileşeni:

6-65 HZ ve dc

Minimum giriş seviyeleri :

5 V veya 1 A efektif

Gerilim ölçmeleri (gerçek efektif):

Giriş kademesi: 5.0 V dan 600 V (ac+dc)

5.0 V dan +/-933 V tepe değeri

Temel hassaslığı rms (ac+dc): +/-(% 0.5 +2 dijital)

tepe,dc: +/-(%2 +3 dijital)

<15 V efektif

Giriş empedansı: 1 M Ω

Tepe faktörü>300 V 'dan küçük değerde 3 , 1.56 @ 600 V

Akım ölçmeleri (gerçek efektif):**(1 mV/A) izoleli giriş**

Giriş kademesi: 1.00 mV(A)den 1000 mV efektif (A) (ac+dc)

1.0 mV'dan (A) +/-2000 mV (A) tepe değeri

Temel hassaslığı rms (ac+dc): +/-(% 0.5 +3 dijit)

tepe,dc: +/-(%2 +4 dijit)

Giriş empedansı: 1 M , 47 pF

Tepe faktörü 600 mV'dan küçük değerde 3 den büyük, 2.0 @ 1000 mV

Güç ölçümleri (Volt-Amper):**(1 mV/A) İzoleli çıkış**

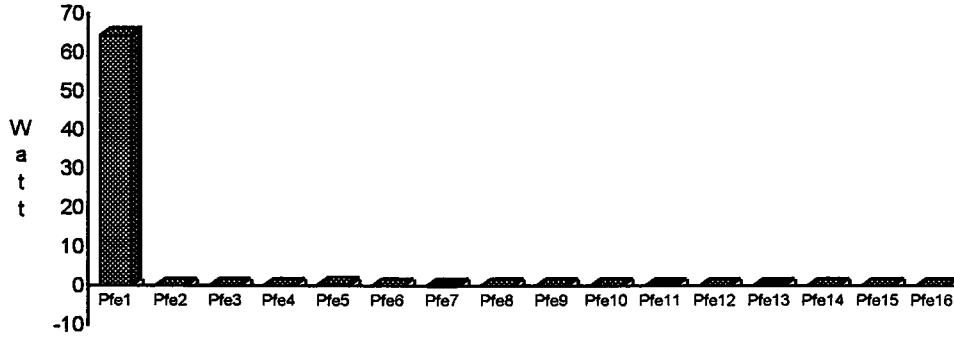
Kademesi 0 W (VA)'dan 600 kW (kVA) ortalama

0 W (VA)'dan 2000 kW (kVA) tepe

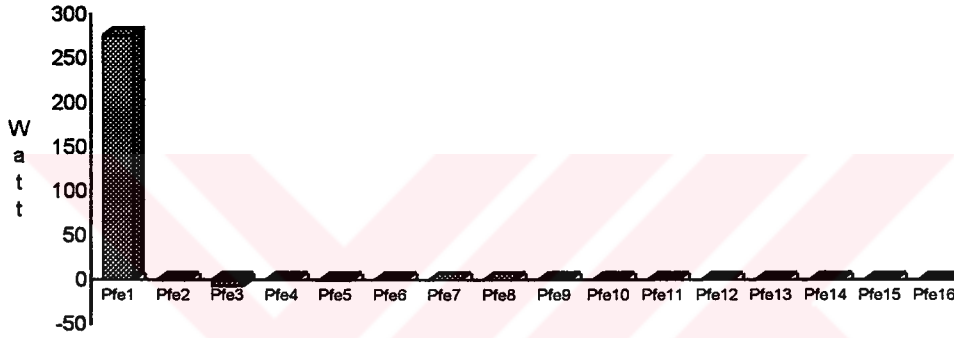
Hassasiyet (ac+dc): Aktif W (VA): +/- (%1 +4 dijit) +probe özelliği

5.5 Çeşitli Kaynaktan Beslenen ve Çeşitli Yüklü Transformatörün Demir Direncinde Oluşan Aktif Kayıplar

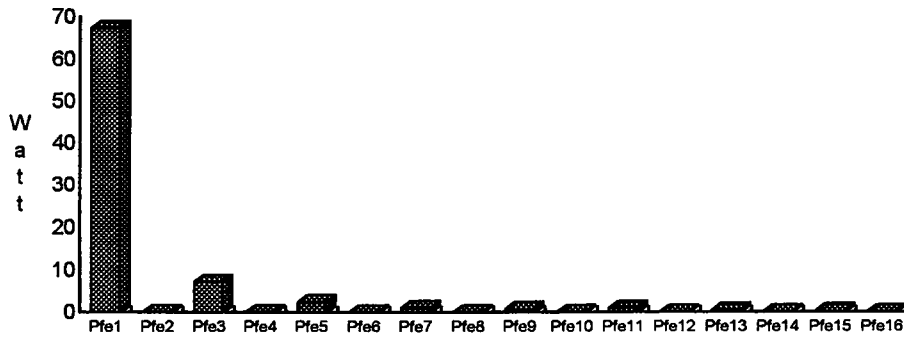




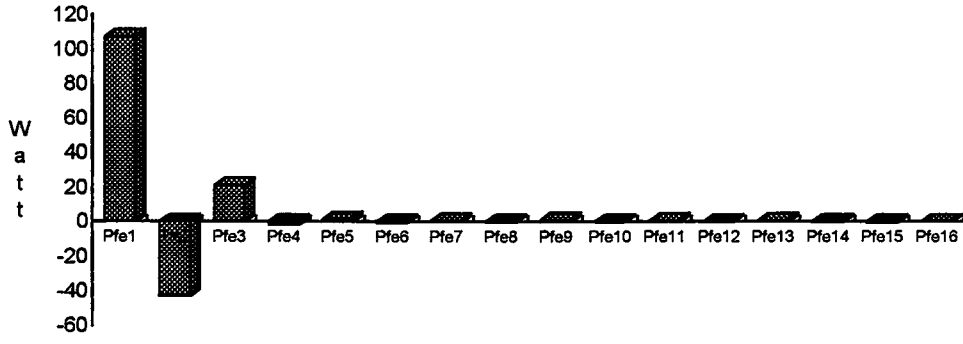
SİNÜSOİDAL KAYNAKTAN BESLENEN VE LİNEER YÜKLÜ
TRANSFORMATÖRÜN
DEMİR DİRENCİNDE OLUŞAN AKTİF KAYIPLAR



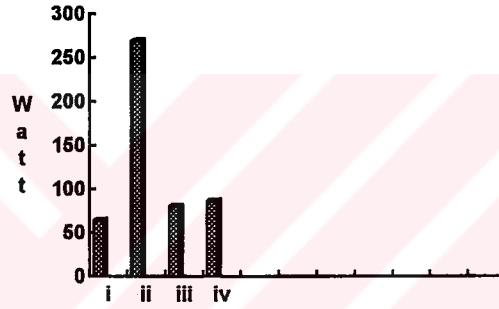
SİNÜSOİDAL KAYNAKTAN BESLENEN VE LİNEER OLMAYAN YÜKLÜ
TRANSFORMATÖRÜN
DEMİR DİRENCİNDE OLUŞAN AKTİF KAYIPLAR



SİNÜSOİDAL OLMAYAN KAYNAKTAN BESLENEN VE LİNEER YÜKLÜ
TRANSFORMATÖRÜN
DEMİR DİRENCİNDE OLUŞAN AKTİF KAYIPLAR



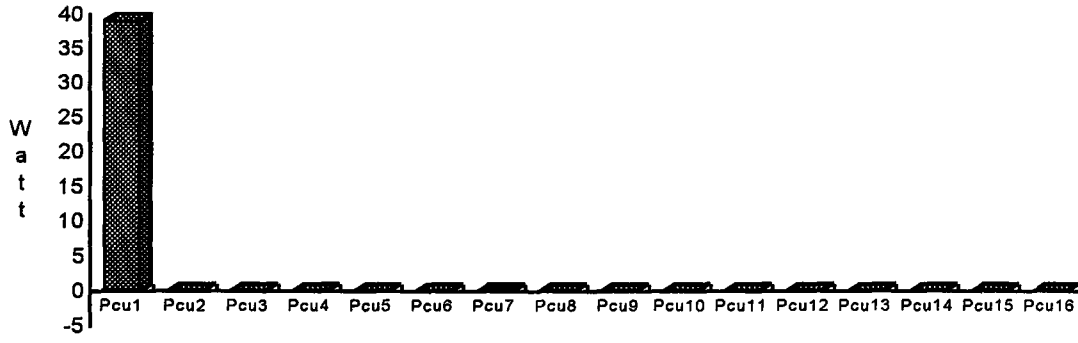
**SİNÜSOİDAL OLMAYAN KAYNAKTAN BESLENEN VE
LİNEER OLMAYAN YÜKLÜ TRANSFORMATÖRÜN
DEMİR DİRENCİNDE OLUŞAN AKTİF KAYIPLAR**



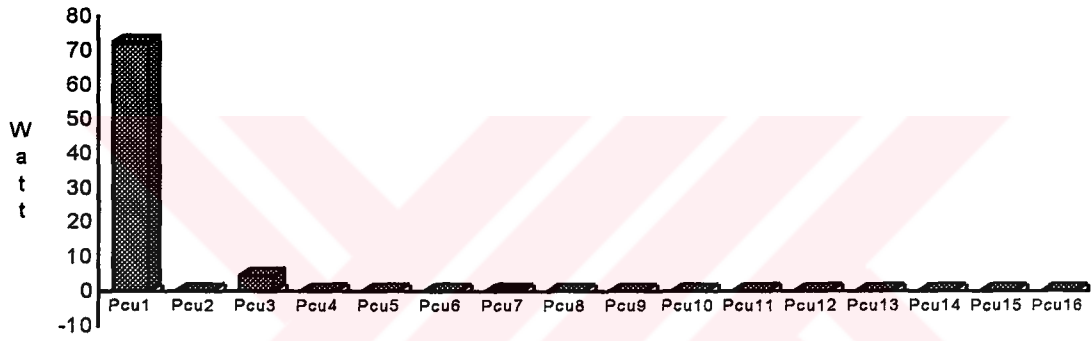
**DÖRT FARKLI DURUM İÇİN
TRANSFORMATÖRÜN DEMİR DİRENCİNDE OLUŞAN
EK AKTİF KAYIPLAR**

5.6 Çeşitli Kaynaktan Beslenen ve Çeşitli Yüklü Transformatörün Primer ve Sekonder Sargılarında Oluşan Aktif Kayıplar

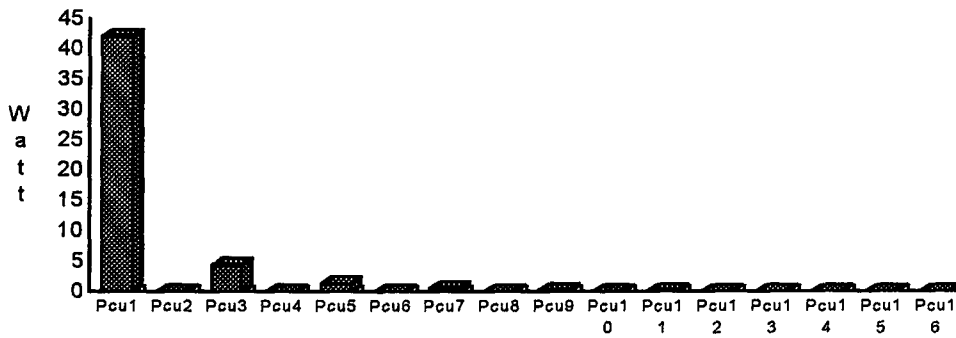




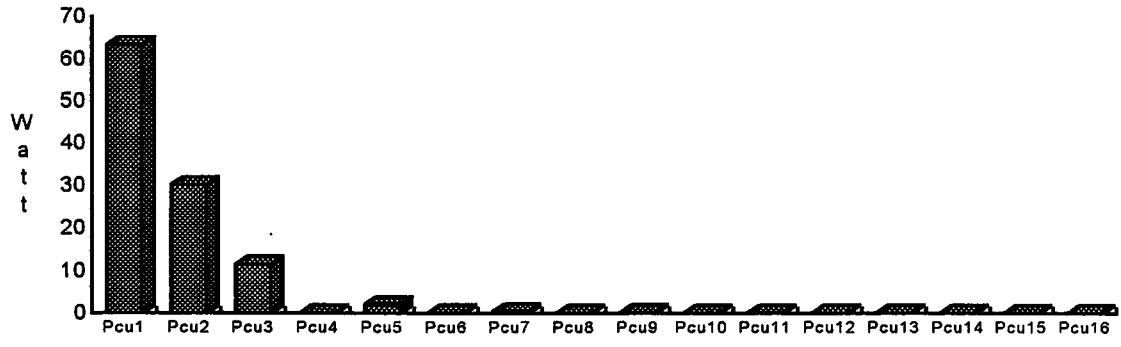
SİNÜSOİDAL KAYNAKTAN BESLENEN VE LİNEER YÜKLÜ
TRANSFORMATÖRÜN
PRİMER SARGISINDA (P_{cu1}) OLUŞAN AKTİF KAYIPLAR



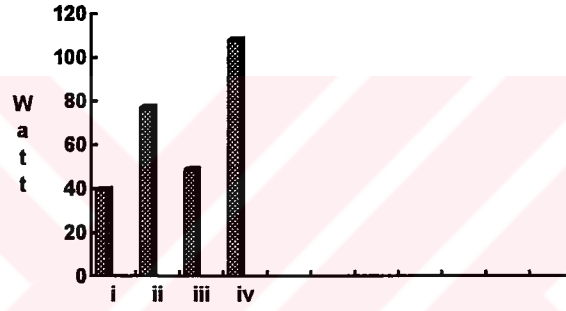
SİNÜSOİDAL KAYNAKTAN BESLENEN VE LİNEER OLMAYAN YÜKLÜ
TRANSFORMATÖRÜN
PRİMER SARGISINDA (P_{cu1}) OLUŞAN AKTİF KAYIPLAR



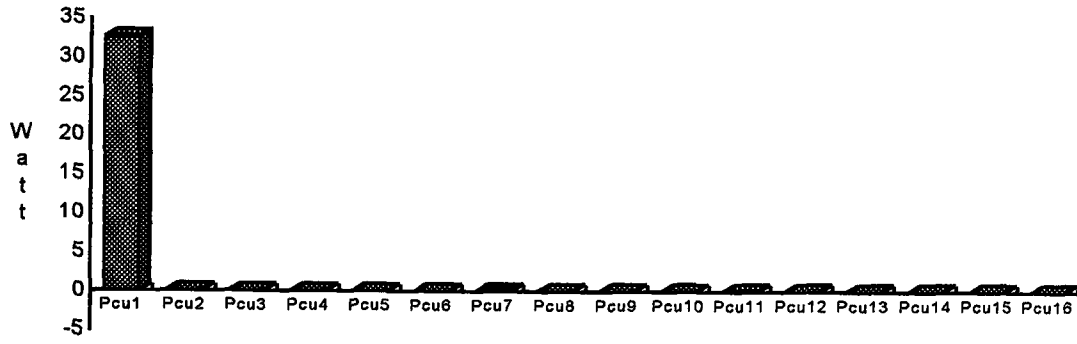
SİNÜSOİDAL OLMAYAN KAYNAKTAN BESLENEN VE LİNEER YÜKLÜ
TRANSFORMATÖRÜN
PRİMER SARGISINDA (P_{cu1}) OLUŞAN AKTİF KAYIPLAR



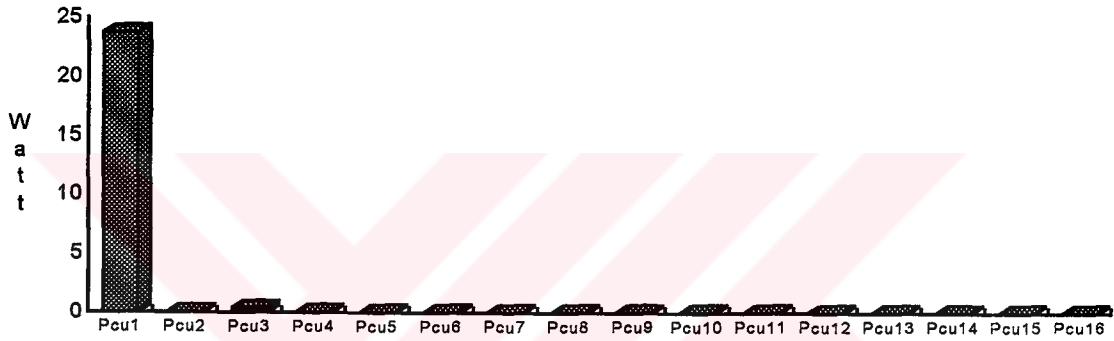
SİNÜSİDAL OLMAYAN KAYNAKTAN BESLENEN VE
LİNEER OLMAYAN YÜKLÜ TRANSFORMATÖRÜN
PRİMER SARGISINDA (P_{cu1}) OLUŞAN AKTİF KAYIPLAR



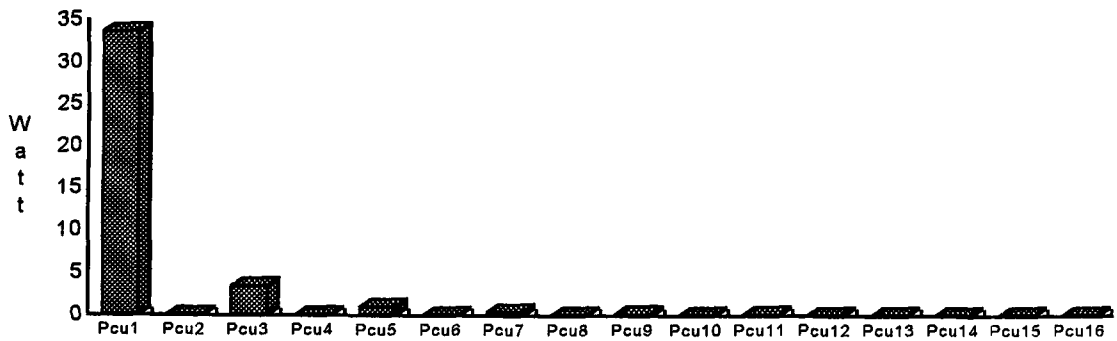
DÖRT FARKLI DURUM İÇİN
TRANSFORMATÖRÜN PRİMER SARGISINDA
OLUŞAN (P_{cu1}) EK AKTİF KAYIPLAR



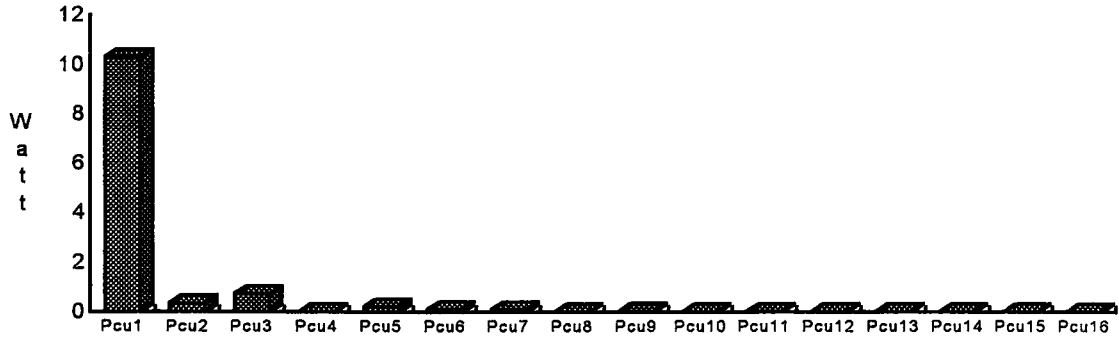
SİNÜSİDAL KAYNAKTAN BESLENEN VE LİNEER YÜKLÜ
TRANSFORMATÖRÜN
SEKONDER SARGISINDA (P_{cu2}) OLUŞAN AKTİF KAYIPLAR



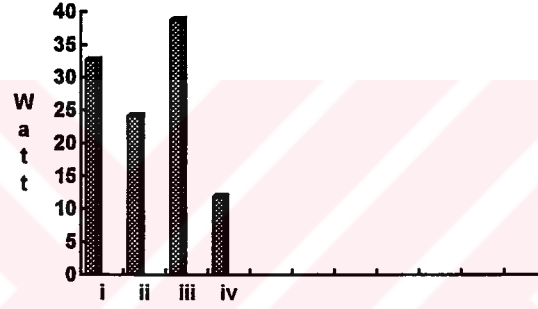
SİNÜSİDAL KAYNAKTAN BESLENEN VE LİNEER OLMAYAN YÜKLÜ
TRANSFORMATÖRÜN
SEKONDER SARGISINDA (P_{cu2}) OLUŞAN AKTİF KAYIPLAR



SİNÜSİDAL OLMAYAN KAYNAKTAN BESLENEN VE LİNEER YÜKLÜ
TRANSFORMATÖRÜN
SEKONDER SARGISINDA (P_{cu2}) OLUŞAN AKTİF KAYIPLAR



SİNÜSOİDAL OLMAYAN KAYNAKTAN BESLENEN VE NON-LİNEER YÜKLÜ
TRANSFORMATÖRÜN
SEKONDER SARGISINDA (P_{cu2}) OLUŞAN AKTİF KAYIPLAR



DÖRT FARKLI DURUM İÇİN
TRANSFORMATÖRÜN SEKONDER SARGISINDA
OLUŞAN (P_{cu2}) EK AKTİF KAYIPLAR

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Transformatörlerde primer (besleme) gerilimi ile yükün karakteristiklerine bağlı olarak, lineer olmayan “şönt devre elemanlarının (R_{fe} , X_{mn})” non-lineer biçimde elde edilmesine yönelik olan bu çalışmadan bulunan sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Bir transformatörde beslemenin sinüsoidal ya da non-sinüsoidal ve yükün de lineer veya non-lineer olması gibi tüm kombinasyonları içine alacak şekilde, harmonik eşdeğer devresi kullanılarak, R_{fep} ve X_{mp} şönt parametrelerinin analitik formülasyonu ((5.25) ve (5.26)) eşitliği yardımı ile verilmiştir.

Söz konusu formüller; transformatörde gerek demir direncinin, gerekse mıknatıslanma reaktansını primer ve sekonderden yapılan eşzamanlı ölçmeler yoluyla fiziksel (gerçek) değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır; bu yönüyle herhangi bir matematiksel dönüşüm ya da kabul olmaksızın (ohm cinsinden) gerçek değerler bulunmaktadır.

2. (5.1)’deki yaklaşım yardımıyla, analitik formülasyonun deneysel uygulanması amacıyla, (5.2)’deki deneysel bulgular ortaya konulmuştur. Burada besleme ve yük için farklı kombinasyonların öngörüldüğü dört ayrı durum incelenmiştir; (5.1)’deki yaklaşımın doğrultusunda hem primer taraftan hem de sekonder taraftan yapılan akım, gerilim ve güç ölçüm sonuçlarına (5.2.1)’de yer verilmiştir. Transformatörün demir direncinde oluşan aktif kayıpların; “sinüsoidal kaynaktan beslenen lineer olmayan yük” halinde en büyük değere ulaştığı, “sinüsoidal kaynaktan beslenen lineer yük”lü hal için ise minimum değerde kaldığı, primer sargısında ise aktif kayıpların ; “sinüsoidal kaynaktan beslenen lineer yük” halinde minimum değerde , “sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen lineer olmayan yüklü hal için ise maksimum değerde kaldığı ve sekonder sargısında ise aktif kayıpların; “sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen lineer olmayan yük” halinde minimum değerde, “sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen lineer yük”lü hal için ise maksimum değerde kaldığı gözlenmektedir. Deneylerde Fluke tipi harmonik analizör kullanılmıştır.

3. Deneysel bulgular ile analitik formülasyondan elde edilen bulguların karşılaştırılması ve bir arada değerlendirilmesi amacıyla, hesaplama yapan bir program yazılmıştır (Ek 1).

4. Öngörülen dört farklı durum için, R_{fe} parametresinde ortaya çıkan harmonik kayıplar ayrıık formda (5.5) 'de gösterilmiştir.

5. Gene çalışılan dört farklı durum için, transformatör sargılarında ortaya çıkan harmonik kayıplar ayrıık formda (5.6) 'da gösterilmiştir.

6. Transformatörün kayıplarını, dolayısıyla verimini ekonomik anlamda etkileyen ek aktif (harmoniklerden dolayı meydana gelen ilave kayıplar) kayıpların (hem R_{fe} hem de sargılardaki kayıpların) dört ayrı durum için

- i- Kaynak sinüsoidal ; yük lineer
- ii- Kaynak sinüsoidal ; yük non-lineer
- iii- Kaynak non-sinüsoidal ; yük lineer
- iv- Kaynak non-sinüsoidal ; yük non-lineer

değerlendirilmesi sonucu , geleneksel işletme türü olan i. nolu durum referans alınır, diğerleri de referans dışı işletme durumu olarak ele alınır,

Referans dışı İşletme Durumundaki kayıplar

$$\text{-----} = K_n \quad (n= \text{ii, iii, iv})$$

i no.lu İşletme Durumundaki Kayıplar

katsayısı bir ölçüt alınabilir. Kalan üç işletme için K katsayılarının arasında $K_{ii} \neq K_{iii} \neq K_{iv}$ eşitsizliğinin varlığı sayısal bulgulardan açıkça görülmektedir.

7. İşletmedeki transformatörler harmoniklerin mertebe ve sıklık bakımından etkin olması halinde, ek aktif kayıpların da artacağı ve dinamik aktif enerji tutarında bundan etkileneceği bilinmektedir. Harmoniklerin azaltılması ya da yok edilmesi kapsamında alınacak önlemlerin (aktif ya da pasif filtre / filtreler kullanımının) - ekonomik - maliyeti ile bu çalışmada ortaya konan “ek” aktif kayıpların maliyetinin karşılaştırılması, optimum işletmenin bir gereğidir. Ek aktif kayıpların en aza indirilmesi (ya da tamamen yok edilmesi) kapsamında öngörülecek filtre devrelerinin maliyeti ile söz konusu ek kayıpların getireceği maliyetin dönemlik (örneğin bir yıllık) karşılaştırılması önem kazanacaktır. Filtre devrelerinin maliyetlerini

amorte etme süresinin çok uzun olması, ek kayıp minimizasyonu için sağlayacağı katkının fazlaca önemli olmadığına bir göstergesi olacaktır; bu durumda filtre devrelerinin yerleştirilmesi optimum işletme yönünden uygun olmayacaktır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda, transformatörlerin çeşitli besleme-yük karakteristiklerinde işletilmesi sırasında, ekonomik değerlendirme bakımından, aşağıdaki önerilere yer verilmiştir:

1. Transformatörün aylık işletme süresi içinde, bu çalışmada öngörülen dört farklı işletme durumunun olup olmadığı tespit edilmelidir. T toplam aylık işletme süresi olmak üzere

$$T = t_i + t_{ii} + t_{iii} + t_{iv} \quad (\text{saat / ay})$$

belirlenmelidir.

2. Kaynağın non-sinüsoidal olması durumu (iii. ve iv. no.lu işletme durumu) için gerilim harmoniklerinin spektral değişimi belirlenmelidir. Burada Toplam Harmonik Distorsiyonu 'nın THD_v yanı sıra maksimum genlikli gerilim harmoniğinin temel bileşene göre % si ile maksimum gerilim harmonik mertebesi bir kriterdir.

3. Yükün non-sinüsoidal olması durumu (ii ve iv no.lu işletme modu) için akım harmoniklerinin spektral değişimi belirlenmelidir. Burada Toplam Harmonik Distorsiyonu 'nın $(THD)_I$ yanı sıra maksimum genlikli akım harmoniğinin temel bileşen cinsinden % si ile maksimum harmonik mertebesi bir kriterdir.

4. R_{fe} ve sargı direncinde i. no.lu işletme (geleneksel işletme durumu) için oluşan aktif kayıplar (W) belirlendikten sonra, kalan üç işletme durumu için, hem R_{fe} 'de hem de sargılarda ortaya çıkacak "kayıplar" hesap edilir; burada "yüklenme faktörü-eş zamanlılık katsayısı" gözden uzak bulundurulmamalıdır.

5. Ay boyunca t_i , t_{ii} , t_{iii} ve t_{iv} işletme süreleri yardımıyla "Kayıp Enerji" miktarları elde edilir. İşletmenin dönemlik yüklenme karakteristiği ya dönemlik yüklenme katsayılarının bilinmesi

halinde, belirli bir dönem için, tanımlanan dört varsayıma (i, ii, iii, iv) ilişkin kayıp enerji değerleri bulunabilir; burada her zaman dilimi için enerji = güç $\times$ zaman eşitliği geçerlidir.

6. Bu kayıp enerjiden hareketle, geçerli enerji tarifi üzerinden (TL / kWh) “Kayıp Enerji Tutarı” bulunur.

7. i. no.lu işletmedeki kayıp (M_i) referans alınarak, $[M_i - M_{ii}]$, $[M_i - M_{iii}]$ ve $[M_i - M_{iv}]$ farkları hesap edilir.

8. Gerekli besleme (primer) tarafındaki gerilim harmoniklerinin gerekse yük tarafındaki akım harmoniklerinin süzülmesine karşılık düşecek önlemlerin tutarı “filtrelerin maliyeti” belirlenir.

9. Transformatörün gücüne bağlı olarak kullanılan saç malzemesini ve çekirdek geometrisinin özelliği önem kazanmaktadır; sargı dirençlerinin ve demir direncinin imalat aşamasında olabildiğince düşük tutulmasının yanısıra, harmonik akım ve gerilim bileşenlerinin mertebesi (n) ile temel bileşenlere olan oranları ek kayıp güç dolayısıyla enerji üzerinde doğrudan etki yapacaktır. Elektrik idaresinin TL / kWh tarifesine yapacağı aylık fiyat artışları, işletmenin günlük çalışma süresi, işletme gücü ve harmonikler bir bütün olarak alındığında, ek kayıp enerjinin tutarının önemi artacaktır. Bir dönem boyunca ek kayıp enerjiye ödenen toplam paranın bugüne indirgenmiş değerinin ekonomik bir anlam taşıyacağı söylenebilir.

KAYNAKLAR

Alan, J., Forrest, C., (1991), " Harmonic Load Losses in HVDC Converter Transformers ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, 153-157.

Alexandrow, N., v.d., (1987), " Amorphous Alloys for Distribution Transformers: Design Considerations and Economic Impact ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 2, 420-424.

Aquilino, J.M., (1983), " Report of Transformer Reliability Survey-Industrial Plants and Commercial Buildings ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-19, No. 5, 858-866.

Arkadan, A.A., (1992), " Finite Element Modelling of a Transformer Feeding a Rectifier Load: the Coupled Power Electronics and Nonlinear Magnetic Field Problem ", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 6, 5217-5219.

Arkadan, A.A., (1992), " Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Modelling of a Voltage Source Excited Transformer Feeding a Rectifier Load ", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 5, 2265-2267.

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

Arrillaga, J., (1982), " Harmonic Monitoring ", Int.J.Elect.Enging.Educ., Vol. 19, 169-173.

Arsenau, R., v.d., (1995), " A Survey of North American Electric Utility Concerns Regarding Nonsinusoidal Waveforms ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 73-78.

Arsenau, R., v.d., (1996), " Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 79-101.

Arsenau, R., v.d., (1997), " Application of IEEE Standart 519-1992 Harmonic Limits for Revenue Billing Meters ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, 346-353.

Aspnes, J.D., v.d., (1981), " Harmonic Generation in Transformers Related to DC Excitation and System Loading ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, 1845-1851.

Baghzouz, Y., Gong, X.D. (1992), " Voltage-Dependent Model for Teaching Transformer Core Nonlinearity ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, 746-752.

Barker, P.P, v.d., (1994), " Power Quality Monitoring of a Distribution System ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, 1136-1142.

Bejot, J.P., (1992), " Transformer Behaviour In Disturbed Power Systems ", GEC Alstom Technical Review, No: 9, 3-10.

Bishop, M.T., v.d., (1991), " PC-Controlled Hand-Held Meter Measures Power System Harmonics ", IEEE Computer Applications in Power, 17-21.

Bishop, M.T., Gilker, C. (1992), " Portable Harmonics Meter Evaluates Transformer Heating ", IEEE Computer Applications in Power, 41-44.

Bishop, M.T., Baranowski, J.F., Heath, D., Benna, S.J., (1996), " Evaluating Harmonic-Induced Transformer Heating ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No.1, 305-310.

Bonner, A., v.d., (1996), " Modelling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks ", Part I: Concepts, Models, and Simulation Techniques, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 452-465, Part II: Sample Systems and Examples, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 465-474.

Cameron, M.M., (1993), " Trends in Power Factor Correction with Harmonic Filtering ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 1, 60-65.

Chen, X., (1996), " A Three-Phase Multi-Legged Transformer Model in ATP Using the Directly-Formed Inverse Inductance Matrix ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, 1554-1562.

Chua, L.O., Stromsmoe, K.A., (1970), " Lumped-Circuit Models for Nonlinear Inductors Exhibiting Hysteresis Loops ", IEEE Transactions on Circuit Theory, Vol. CT-17, No. 4, 564-574.

Crepaz, S., (1970), " Eddy-Current Losses in Rectifier Transformers ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 7, 1651-1656.

Crepaz, S., (1975), " For an Improved Evaluation of Conventional Losses of Transformers for Converters ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-11, No.2, 165-171.

Czarnecki, L.S., (1993), " Physical Reasons of Currents RMS Value Increase in Power Systems with Nonsinusoidal Voltage ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, 437-447.

Czarnecki, L.S., (1996), " Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Asymmetry ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, 1244-1250.

Çetin, I., (1987), " Transformatör , Çözümlü Problemlerle 1. Kısım ", İ.T.Ü. Matbaası.

Diseko, N.L., Bickford, J.P., (1980), " A Method of Simulating Linear and Nonlinear Resonant Phenomena Associated with Transformer Feeders ", IEE Proc., Vol. 127, Pt. C. No: 3, 169-177

Domijan, A., v.d., (1993), " Directions of Research on Electric Power Quality ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, 429-436.

Dommel, H.W., v.d., (1986), " Harmonics from Transformer saturation ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRD-1, No. 2, 209-215.

Dormer, R.L., (1973), " Designing Class C Dry-type Transformers for Maximum Efficiency ", Electrical Review, 313-317.

Douglas, D.H., v.d., (1985), " Factory Overload Testing of a Large Power Transformer ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 9, 2492-2500.

Dowell, P.L., (1966), " Effects of Eddy Currents in Transformer windings ", IEE Proc., Vol. 113, No. 8, 1387-1394.

Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Beaty, H.W., (1996), " Electrical Power system Quality ", McGraw-Hill Company.

Ell, L.K., Councill, M.E., (1989), " Distribution Transformer Excitation Harmonics ", Electric Power Systems Research, Vol. 17, 13-19.

Emanuel, A.E., Wang, X., (1985) " Estimation of Loss Life of Power Transformers supplying Nonlinear Loads ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 3, 628-635.

Ewart, D.N., (1986), " Digital Computer Simulation Model of a Steel-Core Transformer ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 3, 174-181.

Frank, J.M., (1970), " Understanding Electrical Insulation Life ", Machine Design, 94-95.

Frank, J.M., (1997), " Origin, Development, and Design of K-Factor Transformers ", IEEE Industry Applications Magazine, 67-69.

Fuchs, E.F., Fei, R., (1996), " A New Computer-Aided Method for the Efficiency Measurement of Low-Loss Transformers and Inductors Under Nonsinusoidal Operation ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 292-304.

Gilker, C., Flinn, D.G., (1990), " A Measurement Technique for Power System Harmonics ", IEEE Computer Applications in Power, 17-20.

Girgis, A.A., v.d., (1990), "Evaluation of Temperature Rise of Distribution Transformers in the Presence of Harmonics and Distortion", Electric Power Systems Research, Vol. 20, 15-22.

Golub, G.J., (1990), " Specifying Bar Codes for Distribution Transformers: A Guideline ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, 233-238.

Grady, W.M., v.d., (1992), " A PC-Based Computer Program for Teaching the Design and Analysis of Dry-Type Transformers ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, 709-716.

Greene, J.D., A. Gross, C., (1988), " Nonlinear Modelling of Transformers ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.-24, No. 4, 434-438.

Gruzs, T.M., (1991), "Uncertainties in Compliance with Harmonic Current Distortion Limits in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.-27, No. 4, 680-685.

Guerin, C., Meunier, G., (1996), "Surface Impedance for 3D Non-linear Eddy Current Problems - Application to Loss Computation in Transformers", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 3, 808-811.

Güney, İ., Tarkan, N., (1989), "Transformatörün Sinüsoidal Olmayan Büyüklüklere Göre Modellenmesi", İ.T.Ü. Dergisi, Cilt 47, Sayı 2, 49-55.

Haggerty, N.K., Malone, T.M., ve Crouse, J., (1998), "Applying High Efficiency Transformers", IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 50-56.

Henderson, R.D., Rose, P.J., (1994), "Harmonic: The Effects on Power Quality and Transformers", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.-30, No. 3, 528-532.

Heydt, G.T., (1998), "Electric Power Quality: A Tutorial Introduction", IEEE Computer Applications in Power, 15-19.

Hopkins, M.H., Skutt, H.R., (1972), "Introduction to Electrical Engineering", The Ronald Press Company, New York.

Hu, C.H., v.d., (1997), "Survey of Harmonic Voltage and Current at Distribution Substation in Northern Taiwan", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, 1275-1284.

Hwang, M.S., v.d., (1988), "Distribution Transformer Winding Losses due to Nonsinusoidal Currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 1, 140-46.

Hwang, M.D., v.d., (1988), "Calculation of Winding Temperatures in Distribution Transformers Subjected to Harmonic Currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, 1074-1079.

IEEE Transformers Committee, (1981), "Progress Report on a Guide For Loading Oil-Immersed Power Transformers Rated in Excess of 100 MVA", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 8, 4020-4032.

Jewell, W.T., (1990), "Transformer Design in the Undergraduate Power Engineering Laboratory", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 2, 499-505.

Kazibwe, W.E., Ringlee, R.J. Woodzell, G.W. ve Sendaula, H.M., (1990), "Power Quality: A Review", IEEE Computer Applications in Power, 39-42.

Kazibwe, W.E., Sendaula H.M., (1992), "Expert System Targets Power Quality Issues", IEEE Computer Applications in Power, 29-33.

Kerszenbaum, I., v.d., (1991), "Specifying Dry-Type Distribution Transformers for Solid-State Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.-27, No. 1173-176.

- Keyhani, A., v.d., (1986), " Parameter Estimation for Power Transformer Models from Time-Domain Data ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.1, No.3, 140-146.
- Kovacs, J.P., (1980), " Economic Considerations of Power Transformer Selection and Operation ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-16, No. 5, 595-599.
- Lahoti, B.D., v.d., (1981), " Evaluation Of Transformer Loading Above Nameplate Rating ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PAS-100, No. 4, 1989-1998, 11-21.
- Leibfried, T., (1998), " Online Monitors Keep Transformers in Service ", IEEE Computer Applications in Power, 36-42.
- Leon, F.de., Semlyen, A., (1995), " A Simple Representation of Dynamic Hysteresis Losses in Power Transformers ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, 315-320.
- Li, J.C., Wu, Y-P., (1990), " FFT Algorithms for the Harmonic Analysis of Three-Phase Transformer Banks with Magnetic Saturation ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, 158-165.
- Lin, D., v.d., (1997), " Computer-Aided Testing of Electrical Apparatus Supplying Nonlinear Loads ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, 11-21.
- Lindell, L.C., (1993), " Software Predicts Harmonic Problems and Simulates Alternative Solutions ", IEEE Computer Applications in Power, 52-57.
- Liwschitz-garik, M., Whipple, C.C., (1961), " Alternating Current Machines ", D. Van Nostrand Company, Inc. Princeton, New Serjey.
- Lucas, J.R., McLaren, P.G., (1991), " B-H Loop Representation for Transient Studies ", Int.J.Elect.Enging.Educ., 261-270.
- Lucas, J.R., (1992), " Inclusion of Frequency Dependent Losses in Transformer Flux-Current Excursions ", Int.J.Elect.Enging.Educ., Vol. 29, 321-327.
- Makram, E.B., v.d., (1998), " A New Laboratory Experiment for Transformer Modeling in the Presence of Harmonic Distortion Using a Computer Controlled Harmonic Generator ", IEEE Transactions on Power System, Vol. 3, No. 4, 1857-1863.
- Mancini, R., v.d., (1996), " An Area Substation Load Model in the Presence of Harmonics ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, 2013-2019.
- Massey, G.W., (1994), " Estimation Methods for Power System Harmonic Effects on Power Distribution Transformers Distortion ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.-30, No. 2, 485-489.
- Mceachern, A., v.d., (1995), " Revenue and Harmonics: An Evaluation of Some Proposed Rate Structures ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, 474-482.

McLyman, Colonel Wm.T., (1978), "Transformer and Inductor Design Handbook", Marcer Dekker, Inc., New York.

McNutt, W.J., Patel, M.R., (1976), "The Combined Effects of Thermal Aging and Short-Circuit Stresses on Transformer Life", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No. 4, 1275-1283

McNutt, v.d., (1984), "Direct Measurement of Transformer Winding Hot Spot Temperature", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 6, 1155-1162.

Micheals, K.M., (1997), "Sensible Approaches to Diagnosing Power Quality Problems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, 1124-1130.

Neves, W.L.A., Dommel, H.W., (1993), "On Modelling Iron Core Nonlinearities", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, 417-425.

Neves, W.L.A., v.d., (1995), "Practical Distribution Transformer Models for Harmonic Studies", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, 906-912.

Newbury, A.R., (1978), "Prediction of Loss in Silicon Steel from Distorted Waveforms", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-14, No. 4, 263-268.

Nims, J.W., v.d., (1996), "Application of a Generic Algorithm to Power Transformer Design", Electric Machines and Power Systems, Taylor & Francis, 669-680.

Pierce, L.W., (1994), "Predicting Liquid Filled Transformer Loading Capability", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 1, 170-178.

Pierce, L.W., (1994), "Thermal Considerations in Specifying Dry-Type Transformers", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, 1090-1098.

Pierce, L.W., (1996), "Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 3, 633-645.

Poloujadoff, M., Findlay, R.D., "A Procedure for Illustrating the Effect of Various of Parameters on Optimal Transformer Design", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No. 4, 202-205.

Prousalidis, J.M., v.d., B.C., (1996), "Representation of Hysteresis in Three-Phase Transformer Models for Electromagnetic Transient", IEE Proc-Elect. Power Appl. Vol. 143, No. 4, 331-338.

Prusty, S., Rao, M.V.S., (1980), "A Direct Piecewise Linearized Approach to Convert rms Saturation Characteristic to Instantaneous Saturation Curve", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-16, No. 1, 156-160.

Puri, I.K. (1975), "Harmonic Analysis of a Triductor", Part I", Int.J.Elect. Enging Educ., Vol. 12, 129-133, Part II", Int. J. Elect. Enging Educ., Vol. 12, 147-157.

Purkayastha, I., Savoie P.J., (1994), "Effect of Harmonics on Power Measurement ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 5, 944-946.

Ram, B.S., (1988), "Effect of Harmonics on Converter Transformer Load Losses ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, 1059-1065.

Ray, R., (1988), "Digital Simulation of B/H Excursions for Power System Studies ", IEE Proceedings-C. Vol. 135, No.3, 229-235.

Reason, J. (1994), "Power Transformers: Performance Improves in Many Small Steps " Electrical World, 48-62.

Reid, W.E., (1996), "Power Quality Issues-Standarts and Guidilines ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 3, 625-632.

Rubaai, A., (1994), "Computer Aided Instruction of Power Transformer Design in the Undergratuete Power Engineering Class " IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, 1174-1181.

Rusch, R.J., Good, M.L., "Wyes and Wye Nots of Three-Phase Distribution Transformer Connections ", IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 26, No. 4, 683-688.

Simpson, R.H., (1998), "Instrumentation, Measurement Techniques, and Analytical Tools in Power Quality Studies ", Distortion", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.-34, No. 3, 534-548.

Slemon, G.R., Straughen, A., (1980), "Electric Machines ", Addison-Wesley Publishing Company.

Spreen, J.H., (1990), "Electrical Terminal Representation of Conductor Loss in Transformers ", IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 5, No. 4, 424-429.

Srinivasan, K.(1996), "On Seperating Customer and Supply Side Harmonic Contributions ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, 1003-1012.

Stensland, T., v.d., "Modelling of Magnetizing and Core-Loss Currents in Single -Phase Transformers with Voltage Harmonics for Use in Power Flow ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, 768-773.

Szabados, B., Lee, J., (1981), "Harmonic Impedance Measurements on Transformers ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 12, 5020-5025.

Subjak, JR., J.J., Mcquillkin, J.S., (1990), "Harmonics-Causes, Effects, Measurements, and Analysis:An Uptade", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 6, 1034-1042.

Sueker, K.H., (1995), "Comment on Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 3, 405-406.

Swift, G.W., (1970), " Power Transformer Core Behavior Under Transient Conditions ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS, 2206-2209.

Takach, D.S., Boggavarapu, R.L., (1985), " Distribution Transformer No-Load Losses ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PAS-104, No. 1, 181-193.

Wu, C.J., Chang, W.N., (1997), " Developing a Harmonics Education Facility in a Power System Simulator for Power Engineering Education ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, 22-29.

Yacimini, R., de Oliveira, J.C., (1978) " Harmonics Produced by Direct Current in Converter Transformers ", IEE Proc., Vol. 125, No.9, 873-878.

Yacimini,R., (1982), " Harmonic Caused by the Various Types of Transformer Saturation ", Int.J.Elect.Enging. Educ., Vol. 19, 157-167.



EK 1
PROGRAM YAZILIMI



CLS

DIM V1(16), ACV1(16), I1(16), ACI1(16), VIR(16), VII(16), IIR(16), III(16), ACF1(16), ZH(16), RH(16), XH(16)

DIM V2(16), ACV2(16), I2(16), ACI2(16), V2R(16), V2I(16), I2R(16), I2I(16), ACF2(16), ZL(16), RL(16), XL(16)

DIM VK1(16), ACVK1(16), IK1(16), ACIK1(16), VK1R(16), VK1I(16), IK1R(16), IK1I(16), ACKF1(16)

DIM ZK1(16), RK(16), XK(16), RK1(16), R1(16), XK1(16), X1(16), P1(16), Q1(16), U(16)

DIM ZK2(16), RK2(16), R2(16), XK2(16), X2(16), P2(16), Q2(16), G(16), H(16)

DIM SS(16), TT(16), PP(16), RR(16)

DIM UIHLR(16), UIHLI(16), KOKUIL(16), UH(16), IHLR(16), IHLI(16)

DIM E(16), F(16), KOKUEFI(16), EFI(16), Y(16), Z(16), ZY(16)

DIM RFE(16), XM(16), RFEP(16), XMP(16)

DIM IRFEP(16), IXMP(16), IP(16), PFEP(16), QXMP(16)

DIM SCU1(16), PCU1(16), QCU1(16), SCU2(16), PCU2(16), QCU2(16)

FOR I = 1 TO 16: READ V1(I): NEXT

FOR I = 1 TO 16: READ ACV1(I): NEXT

FOR I = 1 TO 16: READ I1(I): NEXT

FOR I = 1 TO 16: READ ACI1(I): NEXT

FOR I = 1 TO 16: READ V2(I): NEXT

FOR I = 1 TO 16: READ ACV2(I): NEXT

FOR I = 1 TO 16: READ I2(I): NEXT

FOR I = 1 TO 16: READ ACI2(I): NEXT

FOR I = 1 TO 16: READ VK1(I): NEXT

FOR I = 1 TO 16: READ ACVK1(I): NEXT

FOR I = 1 TO 16: READ IK1(I): NEXT

FOR I = 1 TO 16: READ ACIK1(I): NEXT

DATA 222.4,71.1,41.1,29.1,22.1,18.1,16.1,14.1

DATA 0,-131,-4,-32,-6,4,-8,3,-11,-6,-12,-12,-14,-2,-17,-4

DATA 8.4,5.1,3.6,2.1,1.6,0.8,0.7,0.5,0.6,0.4,0.4,0.3,0.4,0.2,0.2,0.2

DATA -60.96,-72.84,-75.79,-65.65,-71.77,-68.56,-76.67,-79.36

DATA 103.9,4.9,28.9,4.5,16.4,3.1,7.2,6.8,6.2,4.7,2.6,1.7,5.1,1.5

DATA 0,134,-8,161,-14,160,-20,155,-25,150,-30,143,-35,136,-41,131

DATA 7.24,0.44,2.19,0.3,1.23,0.2,0.87,0.19,0.63,0.17,0.5,0.13,0.43,0.11,0.36,0.11

DATA -2,-94,-17,-141,-22,-155,-29,-164,-34,-179,-39,172,-44,167,-50,160

DATA 14.1,0.2,5.8,0.3,6.0,1.2,7.0,2.1,0.1,7.0,1.4,0.1,2.0

DATA 0,-76,-18,-22,-44,-61,-64,-116,-83,-117,-105,175,-126,-160,-146,161

DATA 7,0.06,1.68,0.01,0.69,0.01,0.38,0.01,0.22,0.0,0.15,0.0,0.11,0.0,0.08,0

DATA -27,-122,-77,-75,-116,-148,-143,-180,-167,156,169,144,144,180,124,99

CONST PI = 3.141592654#

RADYAN = PI / 180

FOR I = 1 TO 16

VIR(I) = V1(I) * (COS(ACV1(I) * RADYAN))

VII(I) = V1(I) * (SIN(ACV1(I) * RADYAN))

IIR(I) = I1(I) * (COS(ACI1(I) * RADYAN))

III(I) = I1(I) * (SIN(ACI1(I) * RADYAN))

NEXT I

FOR I = 1 TO 16

ACF1(I) = ACV1(I) - ACI1(I)

NEXT I

FOR I = 1 TO 16

ZH(I) = V1(I) / I1(I)

NEXT I

```

FOR I = 1 TO 16
  RH(I) = ZH(I) * (COS(ACF1(I) * RADYAN))
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
  XH(I) = ZH(I) * (SIN(ACF1(I) * RADYAN))
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
  V2R(I) = V2(I) * (COS(ACV2(I) * RADYAN))
  V2I(I) = V2(I) * (SIN(ACV2(I) * RADYAN))
  I2R(I) = I2(I) * (COS(ACI2(I) * RADYAN))
  I2I(I) = I2(I) * (SIN(ACI2(I) * RADYAN))
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
  ACF2(I) = ACV2(I) - ACI2(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
  ZL(I) = V2(I) / I2(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
  RL(I) = ZL(I) * (COS(ACF2(I) * RADYAN))
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
  XL(I) = ZL(I) * (SIN(ACF2(I) * RADYAN))
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
  VK1R(I) = VK1(I) * (COS(ACVK1(I) * RADYAN))
  VK1I(I) = VK1(I) * (SIN(ACVK1(I) * RADYAN))
  IK1R(I) = IK1(I) * (COS(ACIK1(I) * RADYAN))
  IK1I(I) = IK1(I) * (SIN(ACIK1(I) * RADYAN))
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
  ACKF1(I) = ACVK1(I) - ACIK1(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
  IF IK1(I) <> 0 THEN ZK1(I) = VK1(I) / IK1(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
  RK(I) = ZK1(I) * (COS(ACKF1(I) * RADYAN))
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
  XK(I) = ZK1(I) * (SIN(ACKF1(I) * RADYAN))
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
  RK1(I) = RK(I) / 2
  RI(I) = RK1(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
XK1(I) = XK(I) / 2
X1(I) = XK1(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
U(I) = V1(I) / V2(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
RK2(I) = RK1(I) / U(I) ^ 2
R2(I) = RK2(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
XK2(I) = XK1(I) / U(I) ^ 2
X2(I) = XK2(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
G(I) = R2(I) + RL(I)
H(I) = X2(I) + XL(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
SS(I) = (RH(I) - R1(I)) * (I1R(I)) - (XH(I) - X1(I)) * (I1I(I))
TT(I) = (XH(I) - X1(I)) * (I1R(I)) + (RH(I) - R1(I)) * (I1I(I))
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
PP(I) = SS(I) * G(I) + TT(I) * H(I)
RR(I) = G(I) * TT(I) - H(I) * SS(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
UIHLR(I) = (PP(I) / (G(I) ^ 2 + H(I) ^ 2))
UIHLI(I) = (RR(I) / (G(I) ^ 2 + H(I) ^ 2))
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
KOKUIL(I) = (UIHLR(I) ^ 2) + (UIHLI(I) ^ 2)
UH(I) = SQR(KOKUIL(I)) / I2(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
IHLR(I) = UIHLR(I) / UH(I)
IHLI(I) = UIHLI(I) / UH(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
E(I) = (I1R(I) * UH(I) - IHLR(I)) / UH(I)
F(I) = (I1I(I) * UH(I) - IHLI(I)) / UH(I)
NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO 16
KOKUEFI(I) = (E(I) ^ 2) + (F(I) ^ 2)
EFI(I) = SQR(KOKUEFI(I))
NEXT I

```

```
FOR I = 1 TO 16
Y(I) = E(I) ^ 2 - F(I) ^ 2
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 16
Z(I) = 2 * E(I) * F(I)
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 16
ZY(I) = SQR(Y(I) ^ 2 + Z(I) ^ 2) / (Y(I) ^ 2 + Z(I) ^ 2)
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 16
RFE(I) = ((RH(I) - R1(I)) * I1(I) ^ 2 - (R2(I) + RL(I)) * I2(I) ^ 2) * ZY(I)
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 16
XM(I) = ((XH(I) - X1(I)) * I1(I) ^ 2 - (X2(I) + XL(I)) * I2(I) ^ 2) * ZY(I)
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 16
RFEP(I) = (RFE(I) ^ 2 + XM(I) ^ 2) / RFE(I)
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 16
XMP(I) = (RFE(I) ^ 2 + XM(I) ^ 2) / XM(I)
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 16
IRFEP(I) = (XMP(I) / (RFEP(I) ^ 2 + XMP(I) ^ 2)) * SQR((RFEP(I) * E(I) - XMP(I) * F(I)) ^ 2 +
(RFEP(I) * F(I) + XMP(I) * E(I)) ^ 2)
IXMP(I) = (RFEP(I) / (RFEP(I) ^ 2 + XMP(I) ^ 2)) * SQR((RFEP(I) * E(I) - XMP(I) * F(I)) ^ 2 +
(RFEP(I) * F(I) + XMP(I) * E(I)) ^ 2)
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 16
PFEP(I) = RFEP(I) * IRFEP(I) ^ 2
QXMP(I) = XMP(I) * IXMP(I) ^ 2
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 16
PCU1(I) = R1(I) * I1(I) ^ 2
QCU1(I) = X1(I) * I1(I) ^ 2
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 16
PCU2(I) = R2(I) * I2(I) ^ 2
QCU2(I) = X2(I) * I2(I) ^ 2
NEXT I
```

```
CLS
COLOR 14
10 : LOCATE 16, 1
REM 16 'U AZALT
PRINT
```

```
PRINT "V1(I) ICIN A'YA BASIN",
PRINT "I1(I) ICIN B'YE BASIN",
PRINT "V2(I) ICIN C'YE BASIN",
PRINT "I2(I) ICIN D'YE BASIN",
```

```

PRINT "UH(I) ICIN E'YE BASIN",
PRINT "RFE(I) ICIN F'YE BASIN",
PRINT "XM(I) ICIN G'YE BASIN",
PRINT "RFEP(I) ICIN H'YE BASIN",
PRINT "XMP(I) ICIN J'YE BASIN",
PRINT "SP(I) ICIN K'YA BASIN",
PRINT "Z1(I) ICIN L'YE BASIN",
PRINT "Z2(I) ICIN M'YE BASIN",
PRINT "SCU1(I) ICIN N'YE BASIN",
PRINT "SCU2(I) ICIN O'YA BASIN",
REM
REM
PRINT "CIKMAK ICIN S'YE BASIN"

```

15 :

```

TUS$ = INPUT$(1)
IF TUS$ = "A" THEN 20
IF TUS$ = "B" THEN 30
IF TUS$ = "C" THEN 40
IF TUS$ = "D" THEN 50
IF TUS$ = "E" THEN 60
IF TUS$ = "F" THEN 70
IF TUS$ = "G" THEN 80
IF TUS$ = "H" THEN 90
IF TUS$ = "J" THEN 100
IF TUS$ = "K" THEN 110
IF TUS$ = "L" THEN 120
IF TUS$ = "M" THEN 130
IF TUS$ = "N" THEN 140
IF TUS$ = "O" THEN 150

```

```

IF TUS$ = "S" THEN 330

```

GOTO 15

20 : CLS

```

FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "",
PRINT "V1("; I; ")"; TAB(33); "=";
PRINT USING "####.##### "; VIR(I);
PRINT USING "####.##### "; V1I(I);
PRINT "J"
NEXT I
GOTO 10

```

30 : CLS

```

COLOR 14
FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "",
PRINT "I1("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; I1R(I);
PRINT USING "####.##### "; I1I(I);
PRINT "J"
NEXT I
GOTO 10

```

40 : CLS

```

FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "",
PRINT "V2("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; V2R(I);

```

```

PRINT USING "####.##### "; V2I(I);
PRINT "J"
NEXT I
GOTO 10

```

```

50 : CLS
COLOR 14
FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "";
PRINT "I2("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; I2R(I);
PRINT USING "####.##### "; I2I(I);
PRINT "J"
NEXT I
GOTO 10

```

```

60 : CLS
COLOR 14
FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "";
PRINT "UH("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; UH(I);
NEXT I
GOTO 10

```

```

70 : CLS
COLOR 14
FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "";
PRINT "RFE("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; RFE(I);
NEXT I
GOTO 10

```

```

80 : CLS
COLOR 14
FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "";
PRINT "XM("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; XM(I);
NEXT I
GOTO 10

```

```

90 : CLS
COLOR 14
FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "";
PRINT "RFEP("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; RFEP(I);
NEXT I
GOTO 10

```

```

100 : CLS
COLOR 14
FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "";
PRINT "XMP("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; XMP(I);
NEXT I
GOTO 10

```

```

110 : CLS
COLOR 14
FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "";
PRINT "SP("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; PFEP(I);
PRINT USING "####.##### "; QXMP(I);
PRINT "J"
NEXT I
GOTO 10

```

```

120 : CLS
COLOR 14
FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "";
PRINT "Z1("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; R1(I);
PRINT USING "####.##### "; X1(I);
PRINT "J"
NEXT I
GOTO 10

```

```

130 : CLS
COLOR 14
FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "";
PRINT "Z2("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; R2(I);
PRINT USING "####.##### "; X2(I);
PRINT "J"
NEXT I
GOTO 10

```

```

140 : CLS
COLOR 14
FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "";
PRINT "SCU1("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; PCU1(I);
PRINT USING "####.##### "; QCU1(I);
PRINT "J"
NEXT I
GOTO 10

```

```

150 : CLS
COLOR 14
FOR I = 1 TO 16
PRINT TAB(24); "";
PRINT "SCU2("; I; ")"; TAB(34); "=";
PRINT USING "####.##### "; PCU2(I);
PRINT USING "####.##### "; QCU2(I);
PRINT "J"
NEXT I
GOTO 10

```

```

330 :

```

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	01.06.1959	
Doğum Yeri		İstanbul
Lise	1978	Zeytinburnu İhsan Mermerci Lisesi
Lisans	1980-1985	İstanbul Teknik Üniversitesi Sakarya Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1990-1992	Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Programı
Çalıştığı Kurumlar		
	1986-1990	İstanbul Teknik Üniversitesi Sakarya Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi
	1990-Devam Ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ