

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

harmonikler akım transformatörü..

Yüksek Lisans Tezi

taner çağlar

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİKLERİN AKIM TRANSFORMATÖRÜ
PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Elektrik Mühendisi Taner ÇAĞLAR

FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Prof. Dr. Hakan Ürdü
Hakan Ürdü

Prof. Dr. Hüseyin ÇATIK
Hüseyin Çatik

İSTANBUL, 2009

SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. AKIM TRANSFORMATÖRLERİ	3
2.1 Akım Transformatörleri Hakkında Temel Bilgiler	3
2.2 Akım Transformatörleri Standartları	3
2.3 Akım Transformatörlerine Dair Genel Tarifler	4
2.3.1 Primer Sargı	4
2.3.2 Sekonder Sargı	4
2.3.3 Sekonder Devre	4
2.3.4 Beyan Primer Akımı	4
2.3.5 Beyan Sekonder Akımı	4
2.3.6 Gerçek Dönüştürme Oranı	5
2.3.7 Beyan Dönüştürme Oranı	5
2.3.8 Akım Hatası (Dönüştürme Oran Hatası)	5
2.3.9 Faz Kayması	5
2.3.10 Doğruluk Sınıfı	5
2.3.11 Yük	6
2.3.12 Beyan Kısa Süreli Isıl Akımı (I_{th})	6
2.3.13 Beyan Dinamik Akımı (I_{dyn})	6
2.3.14 Uyarma Akımı	6
2.3.15 Bileşik Hata	6
2.3.16 Beyan Primer Kısa Devre Akımı (I_{psc})	7
2.3.17 Ani Hata Akımı (i_E)	7
2.3.18 Ani Tepe Akımı (Toplam) Hatası (ϵ)	7
2.3.19 Ani Tepe Alternatif Akım Bileşeni Hatası (ϵ_{aa})	7
2.4 Koruma Akım Transformatörlerinin Sınıfları	7
2.5 Akım Transformatörleri için Hata Sınırları	8
2.5.1 Ölçü Akım Transformatörleri için Akım Hatası ve Faz Kayması Sınırları	8
2.5.2 Koruma Akım Transformatörleri için Hata Sınırları	9
2.5.3 PR Akım Transformatörleri için Hata Sınırları	10
2.5.4 TPS Akım Transformatörleri için Hata Sınırları	11

2.5.5	TPX, TPY ve TPZ Akım Transformatörleri için Hata Sınırları	11
2.6	Akım Transformatörlerine Uygulanan Deneyler	12
2.6.1	Tip ve Rutin Deneyler	13
2.6.1.1	Sarımların Dönüştürme Oranı Hatası	13
2.6.1.2	Kararlı Durum Dönüştürme Oranı ve Faz Kayması	14
2.6.1.3	Sekonder Sargı Direncinin (R_{ct}) Belirlenmesi	14
2.6.1.4	Sekonder Uyarma Karakteristiğinin Belirlenmesi	14
2.6.1.5	Artık Faktörün (K_r) Belirlenmesi	15
2.6.1.6	Sekonder Devre Zaman Sabitinin (T_s) Hesaplanması	15
2.6.2	Tip Deneyleri	15
2.6.2.1	Genel	15
2.6.2.2	Tepe Ani Hata Akımının Ölçülmesi	16
2.6.2.3	Yapılış Faktörünün (F_c) Belirlenmesi	16
2.6.3	Düşük Kaçak Akı Tasarımını Doğrulamak için Özel Deneyler	16
3.	HARMONİK KAYNAKLARI	17
3.1	Harmoniklerin Tanımı	17
3.2	Harmoniklerin Tarihçesi	18
3.3	Harmonik Kaynakları	20
3.3.1	Transformatörler	21
3.3.2	Konverterler	24
3.3.3	Ark Fırınları	26
3.3.4	Statik VAr Generatörleri	27
3.3.5	Döner Makineler	28
3.3.6	Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları	28
3.3.7	Kesintisiz Güç Kaynakları	29
3.3.8	Elektronik Balastlar	30
3.4	Harmoniklerin Enerji Sistemine Etkileri	30
3.5	Türkiye’de ve Dünyada Kullanılan Harmonik Standartları	31
4.	HARMONİKLERİN AKIM TRANSFORMATÖRLERİNE ETKİLERİ	35
4.1	Teorik İnceleme	35
4.1.1	Akım Transformatörlerinin Lineer Modeli	35
4.1.2	Akım Transformatörlerinin Nonlineer Modeli	38
4.2	Sistemde Bulunan Harmoniklerin Ölçü ve Koruma Devrelerine Olası Etkileri	40
4.2.1	Harmoniklerin Ölçü Devresi Üzerine Etkileri	40
4.2.2	Harmoniklerin Koruma Devresi Üzerine Etkileri	41
5.	EMTP-ATP PAKET PROGRAMI	42
5.1	Temel Bilgiler	42
5.2	Simülasyon Çalıştırma Prensipleri	43
5.3	Kullanılan Bileşenler	44
5.4	Tanımlanmış Simülasyon Modelleri	44
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve SİMÜLASYON	46
6.1	Kullanılan Akım Transformatörüne ait Bilgiler	46
6.2	Akım Transformatörüne Uygulanan Testler	48
6.2.1	Akım Transformatörü Dönüştürme Oranı Testi	48
6.2.2	Akım Transformatörü Uyartım Eğrisi (Excitation) Testi	49
6.2.3	Akım Transformatörü Sekonder Sargı Direnci Testi	50
6.3	Akım Transformatörünün Modellenmesi	51
6.4	Akım Transformatörü Performansının İncelenmesi	58

6.4.1	Sinüsoidal Şartlardaki Performans İncelemesi	60
6.4.2	Sinüsoidal Olmayan Şartlardaki Performans İncelemesi	61
6.5	Deney ile Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	73
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	76
KAYNAKLAR.....		78
EKLER		81
Ek 1 Akım transformatörü oran test raporu.....		82
Ek 2 Akım transformatörü uyartım eğrisi test raporu.....		83
Ek 3 Akım transformatörü sekonder sargı direnci test raporu.....		86
Ek 4 EMTP saturasyon modeli simülasyon verileri		87
Ek 5 EMTP oran modeli simülasyon verileri		88
ÖZGEÇMİŞ.....		89

SİMGE LİSTESİ

A_c	Kesit alanı
B	Manyetik akı yoğunluğu
E	Sekonderde endüklenen gerilim
F	Vektörel hata akımı
F_c	Yapılış faktörü
f	Frekans
H	Manyetik alan
I_{diz}	Diz noktası akımı
I_{dyn}	Beyan dinamik akım
I_e	Çekirdek uyarma akımı
i_{mag}	Manyetizasyon akımı
I_n	Nominal akım
I_0	Manyetik kol akımı
I_p	Primer akım
I_{psc}	Beyan primer kısa devre akımı
I_s	Sekonder akım
I_{th}	Beyan kısa süreli ısı akım
I_e	Ani hata akımı
K_n	Beyan değiştirme oranı
K_r	Artık faktör
l_c	Manyetik çekirdek yol uzunluğu
L_p	Primer sargı endüktansı
L_m	Manyetizasyon endüktansı
N_p	Primer sarım sayısı
N_s	Sekonder sarım sayısı
q_E	Nüve kesiti
R_{ct}	Sekonder sargı direnci
R_m	Manyetizasyon direnci
R_p	Primer sargı direnci
R_s	Sekonder devre direnci
T	Çevrim süresi
T_s	Sekonder zaman sabiti

U	Faz arası gerilim
V_{diz}	Diz noktası gerilim
V_s	Sekonder gerilim
Z	Empedans
w	Açısal hız
β	Faz açısı
θ	Akım-gerilim arası faz açısı
C_c	Bileşik hata
ϵ	Ani tepe akımı hatası
μ_g	Nüve geçirgenliği
ΔP_{Fe}	Manyetik çekirdekteki akım kayıpları

KISALTMA LİSTESİ

ATP	Alternative Transient Program
BPA	Bonneville Power Administration
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
DC	Direct Current
DCG	Development Coordination Group
EMK	Elektromotor Kuvveti
EMTP	Electromagnetic Transient Program
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EPRI	Electric Power Research Institute
HVDC	Yüksek Doğru Gerilim
IEEE	Institute of Electrical and Electronical Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
MB	Manyetik Branş
RCF	Ratio Correction Factor
TOP	The Output Processor
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
Y/Y	Yıldız – Yıldız Bağlantı
Y/Δ	Yıldız – Üçgen Bağlantı
WCS	Worst Case Scenario

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Akım transformatörünün basitleştirilmiş eş değer devresi.....	14
Şekil 2.2 Kaçak kapasiteli akım transformatörünün basitleştirilmiş eş değer devresi	14
Şekil 3.1 Temel dalga, 3. ve 5. harmoniklerle bileşke dalga (Erkan,1996).....	18
Şekil 3.2 Y/Y ve Y/ Δ bağlı transformatörlerde üç ve üçün katı harmonik akım yönleri	24
Şekil 3.3 Üç fazlı 6 darbeli konverter (Yarı kontrollü doğrultucu)	25
Şekil 3.4 Üç fazlı 12 darbeli konverter (Yarı kontrollü doğrultucu)	26
Şekil 3.5 Kesintisiz güç kaynağının prensip şeması.....	30
Şekil 4.1 Akım transformatörü bağlantı diyagramı	36
Şekil 4.2 Akım transformatörü eşdeğer devresi (lineer model).....	36
Şekil 4.3 Akım transformatörü fazör diyagramı.....	37
Şekil 4.4 Akım transformatörü modeli – nonlinear manyetizasyon endüktansı.....	38
Şekil 6.1 Kullanılan akım transformatörü ve etiket bilgileri	47
Şekil 6.2 Laboratuarda kullanılan primer test cihazı (Omicron,2002)	48
Şekil 6.3 Oran testi devre şeması (Omicron,2002).....	49
Şekil 6.4 Uyarım eğrisi testi devre şeması (Omicron,2002)	49
Şekil 6.5 Akım transformatörü uyarım eğrisi.....	50
Şekil 6.6 Sargı direnci testi devre şeması (Omicron,2002)	51
Şekil 6.7 Akım transformatörü eşdeğer devresi (ATP, RB-04E).....	51
Şekil 6.8 Transformatör modelinin gösterilimi	52
Şekil 6.9 ATPDraw akım transformatörü veri giriş ekranı	52
Şekil 6.10 Akım transformatörü saturasyon eğrisi atp dosyası verileri.....	55
Şekil 6.11 Akım transformatörü saturasyon eğrisi punch dosyası verileri.....	55
Şekil 6.12 Akım transformatörü ATPDraw test devresi.....	56
Şekil 6.13 Akım transformatörü saturasyon eğrileri karşılaştırması	57
Şekil 6.14 Akım transformatörü hata tespiti simülasyon modeli	59
Şekil 6.15 Akım transformatörü deneyinde kullanılan test devresi.....	59
Şekil 6.16 Oran hatasının frekansa bağlı değişimi	60
Şekil 6.17 Açık hatasının frekansa bağlı değişimi	61
Şekil 6.18 Test 1-Test 5 için kullanılan simülasyon devresi	62
Şekil 6.19 Simülasyon 1 sonuçları	63
Şekil 6.20 Deney 1 sonuçları	63
Şekil 6.21 Simülasyon 2 sonuçları	64
Şekil 6.22 Deney 2 sonuçları	64

Şekil 6.23 Simülasyon 3 sonuçları	65
Şekil 6.24 Deney 3 sonuçları	65
Şekil 6.25 Simülasyon 4 sonuçları	66
Şekil 6.26 Deney 4 sonuçları	66
Şekil 6.27 Simülasyon 5 sonuçları	67
Şekil 6.28 Deney 5 sonuçları	67
Şekil 6.29 Test 6 simülasyon devresi	68
Şekil 6.30 Test 7 simülasyon devresi	68
Şekil 6.31 Simülasyon 6 sonuçları	69
Şekil 6.32 Simülasyon 7 sonuçları	69
Şekil 6.33 Farklı akım değerlerindeki dönüştürme oranı hatası değişimi	75

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Ölçü akım transformatörleri akım hatası ve faz kayması sınırları (Sınıf 0,1- 1) ..	10
Çizelge 2.2 Özel uygulamalar için akım hatası ve faz kayması sınırları.....	10
Çizelge 2.3 Ölçü akım transformatörleri için akım hatası sınırları (Sınıf 3 ve Sınıf 5)	10
Çizelge 2.4 Koruma akım transformatörleri için hata sınırları.....	10
Çizelge 2.5 PR sınıfı koruma akım transformatörleri için hata sınırları	11
Çizelge 2.6 TPX, TPY, TPZ akım transformatörleri hata sınırları.....	12
Çizelge 2.7 Deney Programı.....	12
Çizelge 3.1 Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu.....	22
Çizelge 3.2 Magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu	29
Çizelge 3.3 Çeşitli ülkelerin harmonik standartlar	32
Çizelge 3.4 380 kV iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri	33
Çizelge 3.5 20–154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri .	33
Çizelge 3.6 Kabul edilebilir akım harmonik limitleri.....	34
Çizelge 6.1 Akım transformatörüne ait etiket bilgileri.....	46
Çizelge 6.2 Saturable transformatör ATPDraw verileri	54
Çizelge 6.3 Saturasyon eğrisi akım-gerilim verileri.....	54
Çizelge 6.4 Akım transformatörü saturasyon eğrisi noktaları	57
Çizelge 6.5 Akım transformatörüne uygulanan akımların harmonik içerikleri.....	62
Çizelge 6.6 Dönüştürme oranı hatası değişimi (0,15In).....	70
Çizelge 6.7 Dönüştürme oranı hatası değişimi (0,5In).....	70
Çizelge 6.8 Dönüştürme oranı hatası değişimi (1 In).....	71
Çizelge 6.9 Dönüştürme oranı hatası değişimi (1,3In).....	71
Çizelge 6.10 Dönüştürme oranı hatası değişimi (1,5In).....	71
Çizelge 6.11 Dönüştürme oranı hatası değişimi (2In).....	72
Çizelge 6.12 Dönüştürme oranı hatası değişimi (6In).....	72
Çizelge 6.13 Dönüştürme oranı hatası değişimi (10In).....	72
Çizelge 6.14 Dönüştürme oranı hatası değişimi (20In).....	73
Çizelge 6.15 Test 1-Test 5 sonuçları karşılaştırma tablosu	73
Çizelge 6.16 Test 6 ve Test 7 sonuçları karşılaştırma tablosu.....	74
Çizelge 6.17 Farklı akım değerlerinde dönüştürme oranı hatası sonuçları	74

ÖNSÖZ

Son yıllarda teknolojide ve özellikle güç elektroniği alanındaki gelişmelerle birlikte, akım ve gerilimin dalga şekillerinin sinüsoidal durumdan uzaklaştığı görülmektedir. Akım ve gerilimdeki bu bozulmalar, elektrik enerji sistemindeki güç kalitesinin de bozulmasına sebebiyet vermektedir.

Güç kalitesinin bozulmasında en büyük rollerden birini oynayan harmonikler, akım- gerilim karakteristiği doğrusal olmayan yükler nedeniyle ortaya çıkar. Güç sisteminde bu tip yüklerin sayısının gün geçtikçe artması sebebiyle, sistemdeki harmonik miktarı da önemli seviyelere ulaşmıştır. Akımda bulunan harmonik bileşenlerin, elektrik enerji sistemlerinin korunmasında ve ölçme devrelerinde önemli yeri olan akım transformatörlerinin performansına etkisinin incelenmesi güncel bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Bu tez çalışmasında, harmoniklerin akım transformatörlerine etkileri hem yapılan deneysel çalışmalarla hem de EMTP-ATP programı vasıtası ile hazırlanan simülasyonlarla incelenmiştir. Yapılan deney çalışmalarının ve gerçekleştirilen simülasyon sonuçları kullanılarak gerekli değerlendirmeler yapılmıştır.

Yapmış olduğum tez çalışmasında, ilk gününden son gününe kadar benden bilgi ve yardımını esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Recep YUMURTACI 'ya teşekkür ederim.

Bu tezin hazırlanmasında çok büyük emeği geçen, yapılan çalışmaya yön vermemizde en büyük katkıyı sağlayan, her aşamada yanımda olup hiçbir zaman yardımını esirgemeyen değerli kuzenim Elektrik Yüksek Mühendisi Melih GÜNERİ' ye teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı tamamlamak için gerekli zamanı ayırmamda yardımcı olan, her zaman desteğini hissettiğim yöneticim Hakkı Erdoğan TUNCAY' a teşekkür ederim.

Sürekli destekleri ve arkadaşlıklarından ötürü Emrah BİNAY, Ahmet GENÇ ve Şeref KILDIR 'a teşekkür ederim.

Tezim süresince ve tüm hayatım boyunca benden sevgilerini ve desteklerini eksik etmeyen çok değerli aileme özellikle teşekkür ederim.

Bu Yüksek Lisans Tezi, TÜBİTAK 105G129 nolu "Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Kalitesini İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi" konulu proje tarafından desteklenmektedir

ÖZET

Elektrik enerjisine duyulan talebin sürekli artması ve ilerleyen teknoloji ile sistemdeki yükler her geçen gün gelişmekte, sisteme farklı karakterdeki yükler ilave olmakta, yükler çeşitlilik kazanmaktadır. Sistemdeki yüklerin her zaman lineer olması istenir. Ancak son yıllarda ilerleyen yarı iletken teknolojisinin büyük etkisi ile sistemdeki lineer olmayan yüklerde artış görülmektedir. Lineer olmayan yükler, akım-gerilim karakteristiği doğrusal olmayan yüklerdir. Sistemdeki bu lineer olmayan yükler, harmonik akımları ve gerilimleri meydana getirirler. Oluşan bu harmonikler, öncelikle ideal olarak saf sinüsoidal formda olması gereken şebeke geriliminin dalga şeklini bozmakta, şebeke gerilimindeki harmonikler sebebiyle lineer yüklerin bile akımları saf sinüsoidal olmamakta, harmonik bileşenleri içermektedir. Sonuç olarak sistemdeki lineer olmayan yükler enerji kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır.

Elektrik enerji sistemlerinde ölçme ve koruma devrelerinin önemli bir elemanı olan akım transformatörlerinin, sistemde oluşan bu harmoniklerden ne şekilde etkilendiklerinin araştırıldığı bu tezde, akım transformatörünün matematiksel modeli oluşturulmuş EMTP-ATP vasıtası ile akım transformatörü modellenmiştir. Laboratuvar ortamında yapılan testler ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak harmoniklerin etkileri incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, akım transformatörünün oran hatasının nominal akımın iki katından itibaren arttığı; açısal hatanın ise akımın frekansı nominal frekansın altına düştüğünde önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akım transformatörü, oran hatası, harmonik, EMTP-ATP

ABSTRACT

Continuous increase in the demand for electrical energy and sense of progress with technology developing every day in the system loads, system loads in addition to the different characters, loads has led to diversity. It is always preferred loads to be linear, but since the solid state technology has been improving in recent years, nonlinear loads have got the tendency to rise. Non-linear loads, current-voltage characteristics are non-linear. In the system, this non-linear loads will bring harmonic currents and voltages. These harmonics occur primarily in the form ideally should be pure sinusoidal waveforms of mains voltage to disrupt the network voltage harmonics due to the pure sinusoidal currents are not even linear loads, harmonic components contains. As a result, non-linear loads in the system leads to deterioration of power quality.

In this thesis, the current transformers which has the biggest importance for power systems are mentioned about how effected by the system harmonics, it is modelled by mathematically and by the EMTP software. Simulation results with laboratory environment tests were investigated by comparing the effects of harmonics.

As a result of the studies, current transformer ratio error increased after twice the nominal current, the phase angle error to get under the nominal frequency has been found to significantly increase.

Keywords: Current transformer, ratio error, harmonic, EMTP-ATP

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisine duyulan talebin sürekli artması ve kullanılan teknolojinin gelişmesine paralel olarak, sistemdeki yükler çeşitlilik kazanmıştır. Sistemdeki bu yüklenmelerin her zaman lineer olması istenir. Ancak son yıllarda yarı iletken teknolojisindeki ilerlemelerin de büyük etkisiyle, sistemdeki nonlinear yüklerde ciddi bir artış görülmektedir.

Nonlinear olarak ifade ettiğimiz yükler, akım – gerilim karakteristiğinin doğrusal olmaması temeline dayanır. Yani, akım ve gerilimin dalga şeklinin sinüs eğrisinin dışına çıkması durumudur. Enerji kalitesini bozan etkenlerden biri olan bu durum, lineer yüklerin akım ve gerilim eğrilerindeki temel bileşene ilave olarak, frekansı temel bileşen frekansının katlarına eşit olan bileşenlerin toplamından oluşur. Temel dalga şekli dışındaki bileşenler “harmonik” olarak adlandırılır.

Harmonikler, elektrik enerji sistemlerinde enerji kalitesini önemli ölçüde etkilemektedirler. Kısaca gerilim ve akımın dalga şeklinin sinüs eğrisinden uzaklaşması sonucunda ortaya çıkan harmonikler, sinüsoidal dalga şekilli bir kaynağın doğrusal olmayan bir elemana uygulanması halinde ya da sinüsoidal olmayan bir kaynaktan beslenen doğrusal veya doğrusal olmayan elemanlar tarafından oluşturulmaktadır.

Harmonik üreten elemanlara baktığımızda; bunlar arasında enerji üretiminde, iletiminde ve dağıtımında kullanılan elemanları görebiliriz. Örneğin doyma bölgesinde çalışan transformatörler mıknatıslanma akımlarının sinüsoidal olmaması sebebiyle önemli bir harmonik kaynağıdır. Aynı şekilde henüz ülkemizde bulunmayan doğru akım enerji iletiminde kullanılan doğru akım enerji nakil hatları (HVDC), son yıllarda ülkemizde de kullanımı yaygınlaşan reaktif güç kompanzasyonu yapmak için kullanılan statik VAR kompanzatörleri, yapısında güç elektroniği elemanları bulunduran dönüştürücüler, eviriciler, frekans ve gerilim kontrolörleri, döner makineler, ark fırınları ve hatta hayatımızın önemli bir kısmında kullandığımız bilgisayarlar da harmonik kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Enerji sistemindeki harmoniklerden dolayı akım ve gerilimin dalga şeklinin bozulması, çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunlardan bazılarını sıralamak gerekirse; generatör ve şebeke geriliminin bozulması, gerilim düşümlerinin artması, sistemdeki elemanlarda ve yüklerdeki kayıpların artması, yalıtım malzemelerinin zarar görmesi, sayaçlarda yanlış ölçmeler ve koruma rölelerinin hatalı çalışması söylenebilir.

Sayaçlarda ve koruma elemanları olan rölelerde hatalı sonuçların ortaya çıkmasındaki etkenlerden biri de sistemde kullanılan ölçü transformatörlerinin harmoniklerden

etkilenmeleridir.

Bu tez çalışmasının amacı; sistemde bulunan harmoniklerin akım transformatörleri üzerine etkilerini, hem laboratuvar ortamındaki deneysel çalışmalar ile hem de Electromagnetic Transient Program (EMTP) simülasyonları ile inceleyip, elde edilen sonuçların, transformatörlerinin sekonderinde hangi oranda hataya sebep olduğunu ortaya koymaktır.

Tezin birinci bölümünde çalışmanın amaçları ve yapılan çalışma tanıtılmış olup ikinci bölümde, akım transformatörleri hakkında temel bilgiler verilmiştir. Akım transformatörlerinin yapısı, çeşitleri ve akım transformatörlerinde karşılaşılan hatalar ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, harmonikler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Harmonik üreten elemanlar ve harmoniklerin etkileri üzerinde durulmuştur.

Harmoniklerin akım transformatörlerine ve akım transformatörlerinin sekonderlerine bağlı sistemlere etkileri dördüncü bölümde işlenmiştir. En kötü hal senaryosunda (WCS) akım transformatörlerinin durumu değerlendirilmiştir. Akım transformatörlerinin sekonder devrelerinde kullanılan ekipmanlardan sayaç, ölçü aletleri ve koruma rölelerini, harmonikli sistemde nasıl davrandıkları incelenmiştir. WCS durumunda akım transformatörünün sekonder sargısına bağlı sistemlerin tepkisi, hataları ve performans değerlendirmesi yapılmıştır.

Beşinci bölümde, akım transformatörünün modellenmesi için kullanılan EMTP-ATP paket programına ait temel bilgiler verilmiş, kullanılan bileşenler ve modellerden bahsedilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar ile simülasyon çalışmaları hakkında detaylı bilgiler altıncı bölümde verilmiştir. Bu bölümde akım transformatörünün EMTP modeli verilmiş, simülasyonda kullanılan verilerden bahsedilmiştir. Aynı zamanda yapılan deneysel çalışmaya ait test sonuçlarından bahsedilmiştir. Yapılan her iki çalışmanın sonuçları karşılaştırılmıştır.

Sonuç bölümünde ise yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

2. AKIM TRANSFORMATÖRLERİ

2.1 Akım Transformatörleri Hakkında Temel Bilgiler

Akım transformatörleri, primer dediğimiz esas devreden geçen akımı, manyetik bir dönüşüm ile küçülterek, sekonder diye tanımladığımız ikincil devreye ve bu devreye bağlı cihazlara aktarırlar. Bu durum sonucunda;

Sekonder devrede kullanılan cihazların büyük akımlar sebebiyle aşırı zorlanması engellenmiş olur. Ayrıca yüksek gerilim tesislerinde akım transformatörlerinin sekonder taraflarındaki ölçü aleti ve koruma rölesi vb. elemanlar elektriksel olarak yüksek gerilimden yalıtılmış olur. Böylece bu cihazlar üzerinde çalışma yapan personelin can güvenliği sağlanmış olur.

Akım transformatörleri; bir demir nüve üzerine sarılmış olan primer sargı ve primer sargıya göre ters yönde sarılmış bir sekonder sargıdan oluşmaktadır. Ana devreye seri olarak bağlanmış primer sargıdan geçen akımın meydana getirdiği manyetik alan, demir nüvede manyetik akının oluşmasına neden olur.

Manyetik akı, sekonder sargı üzerinde bir gerilim indükler. Sekonder sargıya cihazların bağlanması sonucu, sekonder devreden geçen akım, sarım yönlerinin ters olması sebebiyle ters yönde bir manyetik alan ve demir nüvede ters bir manyetik akı oluşturur. Sonuç olarak demir nüvedeki manyetik akı dengelenmiş olur.

Sekonder devreye yük bağlanmaması durumunda (sekonder devre açık bırakıldığında), ters yönde bir manyetik akı oluşmayacağı için, primer tarafında oluşan manyetik akı, demir nüve doyuma erişinceye kadar artar ve nüve sıcaklığını arttırarak akım transformatörünün arızalanmasına neden olur. Ayrıca sekonder sargı uçlarındaki gerilim büyük değerlere ulaşarak, insan hayatı için tehlikeli durumlar meydana getirir.

Akım transformatörleri TS 620 EN 60044-1 Türk Standardı içerisinde;

“Normal şartlarda sekonder akımın, pratik olarak primer akım ile orantılı ve bu bağlantının uygun yönü için yaklaşık sıfır faz farkı açısının olduğu ölçü transformatörü” olarak tanımlanmıştır. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.2 Akım Transformatörleri Standartları

Akım transformatörleri ile ilgili ülkemizde ve dünyada yayınlanan standartlara bakıldığında; Institute of Electrical and Electronical Engineer (IEEE) tarafından yayınlanan “IEEE C57-13-

1993 Standart Requirements for Instrument Transformers”, International Electrotechnical Commission (IEC) tarafından yayınlanan “IEC 60044-1 Instrument Transformers-Part-1: Current Transformers” ve “IEC 60044-6 Instrument Transformers-Part-6: Requirement for Protective Current Transformers for Transient Performance” standartları bulunmaktadır. Ülkemizde Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından yayımlanan “TS 620 EN 60044-1 Ölçü Transformatörleri-Bölüm 1: Akım Transformatörleri” ve “TS EN 60044-6 Ölçü Transformatörleri-Bölüm 6: Geçici Durum Performansı için Koruma Akım Transformatörleri ile ilgili Özellikler” kullanılmaktadır.

2.3 Akım Transformatörlerine Dair Genel Tarifler

TS 620 EN 60044-1 Akım transformatörleri ve TS EN 60044-6 Geçici durum performansı için koruma akım transformatörleri ile ilgili standartlarda bulunan bazı tarifler aşağıda belirtilmiştir.

2.3.1 Primer Sargı

Dönüştürülmesi gereken akımın içinden geçtiği sargı.(TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.2 Sekonder Sargı

Ölçü aletleri, sayaçlar, röleler veya benzeri cihazların akım devrelerini besleyen sargı. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.3 Sekonder Devre

Transformatörün sekonder sargıları tarafından beslenen haricî devre. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.4 Beyan Primer Akımı

Transformatörün performansının esas alındığı, primer akımın değeri. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.5 Beyan Sekonder Akımı

Transformatörün performansının esas alındığı, sekonder akımın değeri. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.6 Gerçek Dönüştürme Oranı

Gerçek primer akımın, gerçek sekonder akıma oranı. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.7 Beyan Dönüştürme Oranı

Beyan primer akımın, beyan sekonder akıma oranı. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.8 Akım Hatası (Dönüştürme Oran Hatası)

Gerçek dönüştürme oranı, beyan dönüştürme oranına eşit olmadığında meydana gelen ve transformatörün, akımın ölçülmesinde ortaya çıkan, hata.

Yüzde olarak ifade edilen akım hatası, aşağıdaki formülle verilmiştir:

$$\% \text{ Akım hatası} = \frac{(KnIs - Ip) * 100}{Ip} \quad (2.1)$$

Burada;

K_n , beyan dönüştürme oranı,

I_p , gerçek primer akım,

I_s , ölçme şartlarında, primer sargıdan I_p akımı geçtiğinde, oluşan gerçek sekonder akımdır. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.9 Faz Kayması

Vektör yönlerinin, açının, ideal transformatör için sıfır olacak biçimde seçildiği, primer ve sekonder akım vektörleri arasındaki faz farkı “faz kayması” olarak tanımlanır.

Sekonder akım vektörü, primer akım vektörünün ilerisinde olduğunda, faz kayması pozitiftir.

Faz kayması genellikle, dakika veya santiradiyan cinsinden ifade edilir. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.10 Doğruluk Sınıfı

Öngörülen kullanım şartlarında, belirtilen sınırlar içinde kalan akım transformatörü hatalarına karşılık gelen değer. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

Akım transformatörleri için doğruluk sınıfı, ilgili doğruluk sınıfı için öngörülen beyan doğruluk sınıfı primer akımındaki en yüksek müsaade edilen yüzde bileşik hata ve bunu izleyen harf (FS, P v.b.) ile gösterilir.

2.3.11 Yük

Ohm ve güç faktörü cinsinden, sekonder devrenin empedansı.

Yük, genellikle belirtilen güç faktöründe ve beyan sekonder akımda çekilen VA cinsinden görünün güç olarak ifade edilir. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.12 Beyan Kısa Süreli Isıl Akımı (I_{th})

Transformatörün, kısa devre edilen sekonder sargısıyla, hasar verici etkilere maruz kalmaksızın bir saniye boyunca dayanacağı, primer akımın etken değeri. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.13 Beyan Dinamik Akımı (I_{dyn})

Transformatörün, kısa devre edilen sekonder sargısıyla, elektromanyetik kuvvetler tarafından elektriksel ve mekanik olarak zarar görmeksizin dayanacağı, primer akımın tepe değeri. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.14 Uyarma Akımı

Primer ve herhangi diğer sargılar açık devre iken, beyan frekansındaki sinüs biçimli gerilim, sekonder bağlantı uçlarına uygulandığında, akım transformatörünün sekonder sargıları tarafından alınan akımın etken değeri. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.15 Bileşik Hata

Kararlı durum şartlarda;

- a) Primer akımın anî değerleri ile,
- b) Bağlantı ucu işaretlemesiyle ilgili uygulamalara karşılık gelen primer ve sekonder akımların pozitif işaretleri, beyan dönüştürme oranı ile çarpılan gerçek sekonder akımın anî değerleri arasındaki farkın etken değeri.

Bileşik hata ϵ_c genellikle:

$$\epsilon_c = \frac{100}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_s - i_p)^2 dt} \quad (2.2)$$

Formülüne göre primer akımın etken değerlerinin yüzdesi olarak ifade edilir.

Burada;

K_n , beyan dönüştürme oranı,

I_p , primer akımın etken değeri,

i_p , primer akımın anlık değeri,

i_s , sekonder akımın anlık değeri,

T , bir çevrim süresidir. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.3.16 Beyan Primer Kısa Devre Akımı (I_{psc})

Akım transformatörünün beyan doğruluk performansını esas alan, primer simetrik kısa devre akımının etken değeri. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

2.3.17 Ani Hata Akımı (i_ϵ)

Beyan dönüştürme oranıyla (K_n) çarpılan sekonder akım (i_s) ile primer akım (i_p) arasındaki fark;

$$i_\epsilon = K_n i_s - i_p \quad (\text{TS 620 EN 60044-6, 2004}) \quad (2.3)$$

Alternatif akım ve doğru akım bileşenleri mevcut olduğunda, bütünü oluşturan bileşenler aşağıdaki gibi ayrı ayrı gösterilir;

$$i_\epsilon = i_{\epsilon aa} + i_{\epsilon da} = (K i_{saa} - i_{paa}) + (K_n i_{sda} - i_{pda}) \quad (\text{TS 620 EN 60044-6, 2004}) \quad (2.4)$$

2.3.18 Ani Tepe Akımı (Toplam) Hatası (ϵ)

Beyan primer kısa devre akımının anî tepe değerinin yüzdesi olarak ifade edilen, belirtilen kullanım çevrimiyle ilgili en büyük anî hata akımı;

$$\epsilon = 100 i_\epsilon / (\sqrt{2} I_{psc}) (\%) \quad (\text{TS 620 EN 60044-6, 2004}) \quad (2.5)$$

2.3.19 Ani Tepe Alternatif Akım Bileşeni Hatası (ϵ_{aa})

Beyan primer kısa devre akımının anî tepe değerinin yüzdesi olarak ifade edilen alternatif akım bileşeninin en büyük anî hatası;

$$\epsilon_{aa} = 100 i_{\epsilon aa} / (\sqrt{2} I_{psc}) (\%) \quad (\text{TS 620 EN 60044-6, 2004}) \quad (2.6)$$

2.4 Koruma Akım Transformatörlerinin Sınıfları

Koruma ile ilgili transformatörleri; fonksiyonel performansına göre aşağıda belirtildiği gibi

sınıflandırılır.

- **P Sınıfı:** Kararlı durum simetrik primer akımlı birleşik hata (ϵ) ile belirlenen doğruluk sınıfı. Artık akı için sınır yoktur. (TS 620 EN 60044-6, 2004)
- **TPS Sınıfı:** Performansı, sekonder uyarma karakteristikleri ve sargı dönüştürme hata sınırları ile belirlenen düşük kaçak akılı akım transformatörü. Artık akı için sınır yoktur. (TS 620 EN 60044-6, 2004)
- **TPX Sınıfı:** Belirtilen geçici durum kullanım çevrimi esnasındaki anî tepe akımı hatası (ϵ) ile belirlenen doğruluk sınırı. Artık akı için sınır yoktur. (TS 620 EN 60044-6, 2004)
- **TPY Sınıfı:** Belirtilen geçici durum kullanım çevrimi esnasında anî tepe akımı (ϵ) ile belirlenen doğruluk sınırı. Artık akı doyma akısının % 10'unu aşmaz. (TS 620 EN 60044-6, 2004)
- **TPZ Sınıfı:** Belirtilen sekonder devre zaman sabitinde oluşan en büyük d.a. sapmalı tek enerjileme esnasında anî alternatif akım bileşeninin hatası (ϵ_{aa}) ile belirlenen doğruluk sınırı. d.a. bileşeninin hata sınırı için bir kural yoktur. Artık akı, uygulamada ihmal edilebilir. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

2.5 Akım Transformatörleri için Hata Sınırları

Akım transformatörlerinin hata sınırları, akım transformatörlerinin çeşitlerine göre farklılıklar göstermektedir.

2.5.1 Ölçü Akım Transformatörleri için Akım Hatası ve Faz Kayması Sınırları

0,1 – 0,2 – 0,5 ve 1 sınıfları için beyan frekanstaki akım hatası ve faz kayması; sekonder yük, beyan yükün % 25 ile % 100'ü arasında herhangi bir değerde olduğunda, Çizelge 2,1'de verilen değerleri aşmamalıdır.

0,2 S ve 0,5 S sınıfları için beyan frekanstaki akım hatası ve faz kayması: sekonder yük, beyan yükün % 25 ile % 100'ü arasında herhangi bir değerde olduğunda, Çizelge 2,2'de verilen değerleri aşmamalıdır.

Beyan yükü, 15 VA'ı aşmayan ve 0,1 – 0,2 – 0,5 S doğruluk sınıfındaki akım transformatörleri için, yükün genişletilmiş aralığı, belirtilebilir. Akım hatası ve faz kayması;

sekonder yük, 1 VA ilâ beyan yükün % 100'ü arasındaki herhangi bir değerde olduğunda, Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2'de verilen değerleri aşmamalıdır.

Sınıf 3 ve Sınıf 5 için beyan frekansındaki akım hatası; sekonder yük, beyan yükün % 50 ile % 100'ü arasındaki herhangi bir değerde olduğunda, Çizelge 2.3'de verilen değerleri aşmamalıdır.

Deneyde kullanılan sekonder yük; yük, 5 VA'den daha az olduğunda, güç faktörünün 0,8 geri olması dışında, 1,0 güç faktörü, kullanılmalıdır. Hiçbir durumda, deney yükü 1 VA'den daha az olmamalıdır.

Not 1: Sekonder akım 1 A olan akım transformatörleri için, 1 VA'den daha küçük akım aralığı sınırı üzerinde anlaşılabilir.

Not 2: Bu kural, enerji ölçümü doğruluğunun belgelenmesi için istenebilir.

Not 3: Halen, daha küçük akım değerlerinde, doğru ölçmeler gerçekleştirme konusunda yeterli deneyim bulunmamaktadır (deney donanımı ve elde edilen sonuçların belirsizliği).

Not 4: Genelde, akım hatası ve faz kaymasının öngörülen sınırları; donanım için en yüksek geriliminde (Um) havadaki yalıtım için gerekli olandan daha az uzaklıkta bulunan haricî iletkenlerin verilen herhangi bir konumu için geçerlidir.

Sekonder sargıda kademelendirilmiş çok oranlı akım transformatörleri için başkaca belirtilmedikçe, doğruluk kuralları, en yüksek dönüştürme oranıyla ilgilidir. (TS 620 EN 60044-1, 2004)

2.5.2 Koruma Akım Transformatörleri için Hata Sınırları

Beyan yükteki beyan frekans akım hatası ile faz kayması ve bileşik hata, Çizelge 2.4 'de verilen değerleri aşmamalıdır.

Akım hatası ve faz kaymasının belirlendiği deneylerde; 5 VA'den daha az olan yükte, 1,0 güç faktörüne müsaade edilmesi dışında yük, 0,8 endüktif güç faktörüne sahip olmalıdır.

Bileşik hatayı belirlemek için yük, 0,8 endüktif güç faktörü ile imalatçının takdirindeki değer arasında olmalıdır.

Çizelge 2.1 Ölçü akım transformatörleri akım hatası ve faz kayması sınırları (Sınıf 0,1- 1)

Doğruluk sınıfı	Aşağıda gösterilen beyan akımın yüzdesi cinsinden $\pm$ akım (oran) hatası				Aşağıda gösterilen beyan akımın yüzdesi cinsinden $\pm$ faz kayması							
					Dakika				Santiradyan			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

Çizelge 2.2 Özel uygulamalar için akım hatası ve faz kayması sınırları

Doğruluk sınıfı	Aşağıda gösterilen beyan akımın yüzdesi cinsinden $\pm$ akım (oran) hatası					Aşağıda gösterilen beyan akımın yüzdesi cinsinden $\pm$ faz kayması									
						Dakika					Santiradyan				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2 S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5 S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

Çizelge 2.3 Ölçü akım transformatörleri için akım hatası sınırları (Sınıf 3 ve Sınıf 5)

Sınıf	Aşağıda gösterilen beyan akımın yüzdesi cinsinden $\pm$ akım (oran) hatası	
	50	120
3	3	3
5	5	5

Çizelge 2.4 Koruma akım transformatörleri için hata sınırları

Doğruluk sınıfı	Beyan primer akımında akım hatası	Beyan primer akımda faz kayması		Beyan doğruluk sınırı primer akımında bileşik hata %
		Dakika	Santiradyan	
5P	± 1	± 60	$\pm 1,8$	5
10P	± 3	-	-	10

2.5.3 PR Akım Transformatörleri için Hata Sınırları

Bu tip akım transformatörlerine ait hata sınırları, Çizelge 2.5'de verilmiştir.

Çizelge 2.5 PR sınıfı koruma akım transformatörleri için hata sınırları

Doğruluk sınıfı	Beyan primer akımında akım hatası %	Beyan primer akımda faz kayması		Beyan doğruluk sınırı primer akımında bileşik hata %
		Dakika	Santiradyan	
5PR	±1	±60	±1,8	5
10PR	±3	-	-	10

2.5.4 TPS Akım Transformatörleri için Hata Sınırları

TPS akım transformatörünün sarım dönüştürme oranı, sayısal olarak $1/K_n$ 'ye eşit olmalıdır. Söz konusu sarım dönüştürme oranındaki hata, $\pm\% 0,25$ 'i aşmamalıdır.

Doğruluk sınır şartları, mıknatıslanma karakteristiği ile belirlenir ve uyarma sınır sekonder gerilimi U_{al} , belirtilen değerden daha az olmamalıdır. Bu değer, büyüklükteki $\% 10$ 'luk bir artışın, karşılık gelen tepe anı uyarma akımında $\% 100$ 'ü aşan bir artışa sebebiyet vermeyecek biçimde olmalıdır.

Alıcı tarafından belirtildiğinde, uyarma sınır sekonder gerilimde tepe uyarma akımının ölçülen değeri, belirtilen değeri aşmamalıdır. Sınır belirtilmez ise uyarma akımı, herhangi bir durumda, sekonder tarafla ilgili I_{th} 'ın $\% 10$ 'una karşılık gelen değeri aşmamalıdır (TPX akım transformatörleri Çizelge 2.1).

Alıcı tarafından belirtilen uyarma sınır sekonder gerilimi, genelde aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$U_{al} / KK_{ssc} (R_{ct} + R_b) I_{sn}$$

Burada; K, alıcı tarafından tayin edilen boyutlandırma parametresidir. R_{ct} , bazı uygulamaların sınırlarının, diğer donanım ile koordinasyonu sağlamak için alıcı tarafından belirlenebilmesi dışında, imalatçının tasarımı tarafından belirlenir. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

2.5.5 TPX, TPY ve TPZ Akım Transformatörleri için Hata Sınırları

$R_s = R_{ct} + R_b$ değerine ayarlı sekonder devre direncinde hatalar, Çizelge 2.6'da verilen değerleri aşmamalıdır. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

2.6.1 Tip ve Rutin Deneyler

2.6.1.1 Sarımların Dönüştürme Oranı Hatası

Komple akım transformatöründeki sargı dönüştürme oran hatasının tam olarak belirlenmesinin basit doğrudan bir metodu yoktur. Gerçek dönüştürme oranı, aşağıda belirtilen üç kaynağın hatalarından etkilenir;

- a) Sargı dönüştürme oranı ile beyan dönüştürme oranı arasındaki fark,
- b) Çekirdek uyarma akımı (I_e),
- c) Sargıların ilgili kaçak kapasitanslarından akan akımlar.

Şekil 2.1, akım transformatörü rezistif ve reaktif bileşenleriyle ilgili basitleştirilmiş temel devreyi gösterir iken Şekil 2.2, büyük sarım sayılı (1000'den çok) akım transformatörleriyle ilgili geçerli olabilen kaçak kapasitansları göstermek için genişletilmiştir.

Dönüştürme oran hatası küçük (örneğin % 1) ise verilen sekonder sargı indüklenen e.m.k. (E_s) için kaçak kapasitans ve çekirdek mıknatıslanmasının sebep olduğu hata akımları, primer enerjileme akımının (I_p) değerine bakmaksızın sabit bir büyüklükte olacaktır.

Sekonder devre empedansının uygun biçimde ayarlanması koşuluyla, E_s teorik olarak, enerjileme akım aralığı için sabit bir değerde tutulabilir. Düşük kaçak akı tipinde (örneğin TPS sınıfı) tasarımılanan akım transformatörleri için sekonder kaçak reaktans, ihmal edilip yalnızca sekonder sargı direnci dikkate alınabilir. Böylece, herhangi iki I'_s ve I''_s akımı için deney kuralını tanımlayan basit denklem, aşağıda verilmiştir.

$$I'_s (R_{ct} + R'_b) = E_s = I''_s (R_{ct} + R''_b) \quad (2.7)$$

Ölçülen oran hatalarının, ϵ'_c ve ϵ''_c , sargı dönüştürme oran hatasının ϵ_t olarak gösterildiği ve mıknatıslanma ile kaçak akımların bileşiminin I_x ile verildiği farz edildiğinde, buna tekabül eden hata akımları yaklaşık olarak aşağıdaki gibi verilecektir.

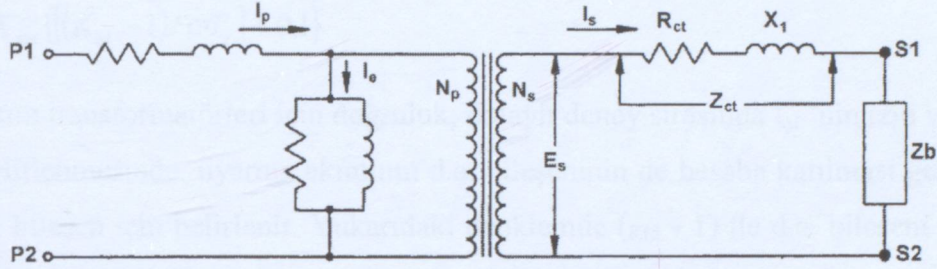
$$(\epsilon'_c - \epsilon_t) \frac{K_n I'_s}{100} = I_x = (\epsilon''_c - \epsilon_t) \frac{K_n I''_s}{100} \quad (2.8)$$

Bundan dolayı:

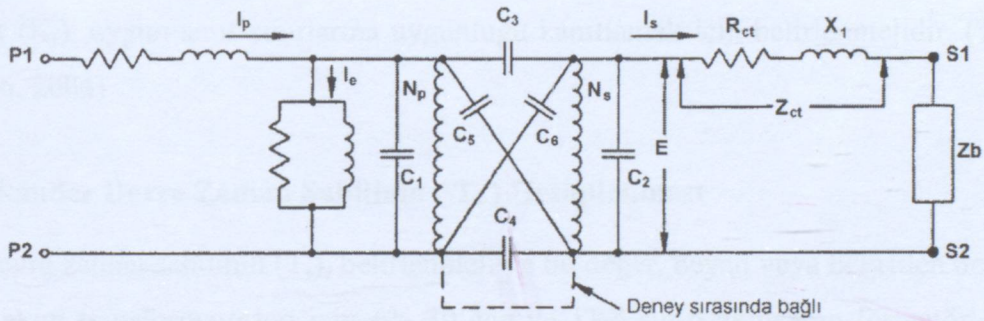
$$\epsilon_t = \frac{\epsilon'_c I'_s - \epsilon''_c I''_s}{(I'_s - I''_s)} \quad (2.9)$$

$I'_s = 2I''_s$ ise sargı dönüştürme oran hatası, yaklaşık olarak $2\varepsilon'_c - \varepsilon''_c$ ile verilir.

En küçük sekonder yüklü beyan akımdaki deneyi takip eden sekonder devre direncinin uygun biçimde artırıldığı yarı beyan akımındaki deney, genelde tatminkâr sonuçlar verir. (TS 620 EN 60044-6, 2004)



Şekil 2.1 Akım transformatörünün basitleştirilmiş eş değer devresi



Şekil 2.2 Kaçak kapasiteli akım transformatörünün basitleştirilmiş eş değer devresi

2.6.1.2 Kararlı Durum Dönüştürme Oranı ve Faz Kayması

$(R_s = R_{ct} + R_b)$ beyan değerine ayarlı sekonder devre direncinde, dönüştürme hatası ve faz kayması, beyan akımında (I_{pn}) ölçülmelidir. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

2.6.1.3 Sekonder Sargı Direncinin (R_{ct}) Belirlenmesi

Sekonder sargı direnci ölçülmeli ve 75°C veya belirtilmiş başka bir sıcaklıktan farklı bir sıcaklıkta ölçüm yapılmış ise gerekli düzeltme yapılmalıdır. Bu şekilde ayarlanan değer, R_{ct} için beyan değeridir. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

2.6.1.4 Sekonder Uyarma Karakteristiğinin Belirlenmesi

Tip deneyleri için doyma akısının 1,1 katından daha az olmayacak değerine kadar uyarma

eğrisi gereklidir. İmalatçı deney metodunu seçebilir.

TPX ve TPY akım transformatörleri ile ilgili rutin deneyler için, U_{al} 'deki uyarma akımı tepe değerinde ölçülür.

TPZ akım transformatörleri ile ilgili rutin deneyler için uyarma sekonder akımı I_{al} 'nin tepe değeri, aşağıda verilen ifadeden elde edilen değeri aşmamalıdır;

$$I_{al} \leq \sqrt{2} I_{sn} K_{ssc} \{ [(K_{td} - 1) / \omega T_s] + 0,1 \} \quad (2.10)$$

Not: TPZ akım transformatörleri için doğruluk; dolaylı deney sırasında I_{al} 'nin izin verilebilen değerinin belirlenmesinde, uyarma akımının d.a. bileşeninin de hesaba katılması gerekir iken yalnızca a.a. bileşen için belirlenir. Yukarıdaki denklemde $(K_{td} - 1)$ ile d.a. bileşeni ve 0,1 ile a.a. bileşende izin verilebilir hata gösterilir. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

2.6.1.5 Artık Faktörün (K_r) Belirlenmesi

Artık faktör (K_r), uygun sınıf sınırlarına uygunluğu kanıtlamak için belirlenmelidir. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

2.6.1.6 Sekonder Devre Zaman Sabitinin (T_s) Hesaplanması

Sekonder devre zaman sabitinin (T_s), belirlenmeli ve bu değer, beyan veya belirtilen değerden TPY sınıfı akım transformatörleri için $\pm\% 30$ 'dan ve TPZ sınıfı akım transformatörleri için $\pm\% 10$ 'dan daha farklı olmamalıdır. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

2.6.2 Tip Deneyleri

2.6.2.1 Genel

Belirtilen sınır parametreleri ve kullanım çevriminde yapılması tasarımlanmış doğrudan deneyler, tip deneylerdir. Tip deneylerinin amacı;

- Belirtilen kullanım çevrimine tabii tutulduğunda, akım transformatörünün tepe ani hata akımını ölçmek,
- Yapılış faktörünü (F_c) belirlemektir.

Bu deneyler, bütün metal muhafazanın içine monte edilen akım transformatörünün gerilim altındaki bölümlerinin tam ölçekli modeli üzerinde ancak azaltılmış yalıtım ile yapılabilir. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

2.6.2.2 Tepe Ani Hata Akımının Ölçülmesi

Anî hata akımı, birçok farklı metotla ölçülebilir. Her durumda, ölçü sisteminin hatası, bütün kullanma çevrimi sırasında, deney tâbi tutulan akım transformatörünün sınıfına karşılık gelen hata sınırının % 10'unu aşmamalıdır. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

2.6.2.3 Yapılış Faktörünün (F_c) Belirlenmesi

U_{alc}/E_{alc} oranından elde edilen yapılış faktörü, beyan şartlarında ve geçici durum boyutlandırma faktörünün (K_{td}) en büyük teorik değerinde yapılan akım transformatörü için geçerlidir.

Yapılış faktörü, sekonder uyarma karakteristiklerini yalnızca belirtilen şartlardaki akım transformatörü performansına sıkı bir biçimde ilişkilendirir. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

2.6.3 Düşük Kaçak Akı Tasarımını Doğrulamak için Özel Deneyler

Akım transformatörünün düşük kaçak akı tasarımının temel özelliklerini sağlayacağını doğrulamak için doğrudan deneyleri; teorik eş değer sekonder e.m.k ile ölçülen değer arasındaki sapmanın %10'u aşmamasının makul biçimde sağlanabildiği yeterince geniş miktarda enerjileme akımı, kullanım çevrimi ve yük kombinasyonlarında yapılmalıdır.

U_{al} değeri; etken değerindeki % 10 artışın, % 50'den daha az ve % 100'den daha fazla olmayan sekonder uyarma akımının tepe değerinde bir artışa sebebiyet vereceği değerdeki sekonder uyarma karakteristiklerinden belirlenir. (TS 620 EN 60044-6, 2004)

3. HARMONİK KAYNAKLARI

3.1 Harmoniklerin Tanımı

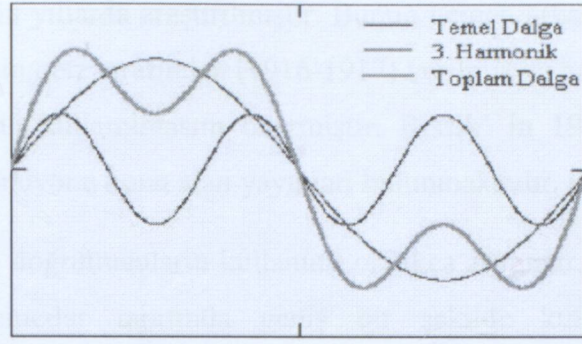
Güç sistemlerinin başlangıcından itibaren nonlinear elemanlar ve nonlinear yükler var olmuştur. Örneğin, transformatörler nominal çalışma koşulları dışına çıktıklarında nonlinear şebeke elemanı olarak davranırlar. Nonlinearlik etkisi ve nonlinear eleman sayısı, harmonik üreten elemanların güç sistemlerine bağlanmasıyla hızlı bir şekilde artmıştır. Bu artışın temel sebebi, yüksek güçlü yarı iletken anahtarlarının gelişimi ve onların doğrultucu, evirici ve çeşitli elektronik devrelerde uygulanmasıdır. (DC iletim konverter istasyonları, motor kontrol devreleri, statik VAr generatörleri, v.b.) (Kocatepe, 1994)

Yarı iletken elemanların tabiatı gereği ve sanayide kullanılan bazı yüklerin (transformatörler, ark fırınları, v.b.) etkisiyle, akım ve gerilim dalga biçimleri periyodik olmakla birlikte, frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalganın dışındaki sinüsoidal dalgalara “Harmonik” adı verilir. Temel dalga ile birlikte 3. ve 5. harmoniklerin bileşkesi aşağıda Şekil 3.1 de gösterilmiştir. (Erkan,1996)

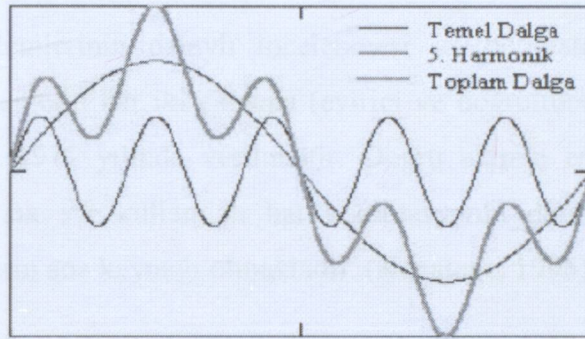
Güç sistemlerindeki harmonikler, sistemi gün geçtikçe artan bir oranda etkilemekte, tesislerde enerji kesintilerine ve zaman kaybına neden olmaktadır. Her ne kadar filtre devreleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmışsa da, filtreleme tesislerinin toplam maliyeti arttırması nedeniyle, maliyet optimizasyonuna ihtiyaç duyulmuştur. (Erkan,1996)

Sinüsoidal alternatif akım uygulanan bir alıcının şebekeden harmonikli bir akım çekmesi, alıcının yapısı gereğidir. Yani, alıcı nominal çalışması sırasında, harmonik meydana getirecek akım çekiyor demektir. Harmonik üreten bu alıcılardan başka, karakteristikleri itibariyle lineer oldukları halde harmonikli akımlara sebebiyet veren alıcılar da vardır. Bu durum ise, alıcıya uygulanan gerilimin nonsinüsoidal olmasından kaynaklanmaktadır. Alternatif akımın üretilmesi sırasında, alternatörlerde yapılan iyileştirmeler yardımıyla, elektrik enerjisinin dalga şekli mümkün olduğunca sinüsoidal forma yaklaştırılmakta olmasına rağmen, lineer bir alıcıya, aynı şebekeye bağlı diğer nonlinear yükler tarafından etki edilmektedir.

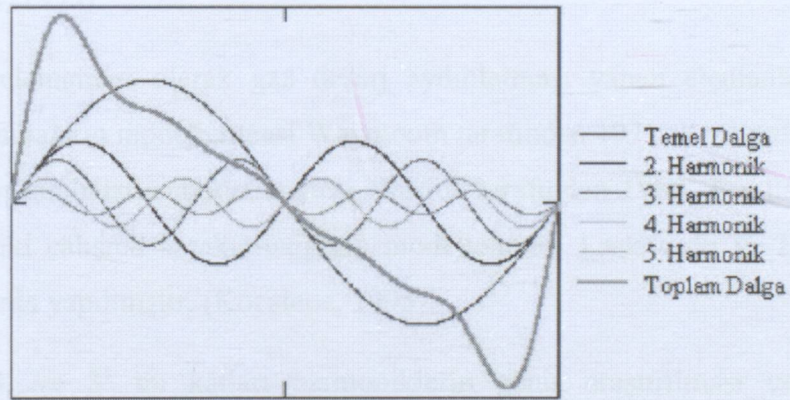
Uygulamalarda en çok 3., 5., 7., 11. ve 13. harmoniklerle karşılaşılır. Ancak 11. ve 13. harmoniklerin genlikleri temel bileşene göre daha küçük olduklarından, özel durumlar dışında dikkate alınmazlar. Elektrikli aygıtlara en büyük zararı 5 kHz’ den küçük harmoniklerin verildiği kabul edilmektedir. (Erkan,1996)



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.1 Temel dalga, 3. ve 5. harmoniklerle bileşke dalga (Erkan,1996)

a) 3. harmonik b) 5. harmonik c) toplam harmonik

3.2 Harmoniklerin Tarihçesi

Güç sistemlerindeki harmoniklerin araştırılması yeni bir konu olmayıp alternatif akımın ortaya çıktığı ilk günden itibaren güç mühendislerini ilgilendirmiştir. Transformatörlerin nonlineerliği, üretilen harmonikler ve Y/ Δ bağlamadaki 3. harmoniklerin oluşumu Clinker ve

Curtis tarafından 1914' lü yıllarda araştırılmıştır. Bunun hemen arkasından transformatörlere ilişkin dalga şekilleri Steinmetz tarafından (1916-1917) verilmiş ve harmonik distorsiyonunun azaltılması için filtrelerin kullanılmasını önermiştir. Rissik' in 1935 yılında cıva buharlı konverterlerle ilgili distorsiyonu konu alan yayınları bulunmaktadır. (Kocatepe, 1995)

II. Dünya Savaşı sonrası doğrultucuların kullanımı oldukça artmıştır. Günümüzde güç sistem mühendisleri ve tasarımcılar tarafında geniş bir şekilde kullanılmakta olan statik konverterlerin harmonik üretimi konusunda Read 1945'li yıllarda çalışmalarda bulunmuştur. (Kocatepe, 1995)

Doğru akım iletim sistemlerinin detaylı incelenmesi ve bu sistemlerde kullanılan hat komütasyonlu dönüştürücülerin her iki çalışma (evirici ve doğrultucu) için karakteristiği ilk kez Kimbark tarafından 1971 yılında verilmiştir. Doğru akımla enerji iletiminde akü ve fotovoltaiik sistemlerde sık sık kullanılan hat komütasyonlu dönüştürücüler, bugün güç sistemlerinde harmoniklerin ana kaynağı olmaktadır. (Kocatepe, 1995)

Reaktif gücü ayarlayarak bara gerilimini kontrol eden statik VAr generatörler de nonlinear bir eleman olarak davranırlar. Bu konu ile ilgili Gyugyi 1978 yıllarında çalışmalarda bulunmuştur. (Kocatepe, 1995)

Nonlinear aydınlatma elemanları olarak gaz deşarj aydınlatması yapan elemanlarla ilgili çalışmalar; flüoresan lambaların modellenmesi Waymouth tarafından 1971' li yıllarda, cıva ve yüksek basınçlı sodyum lambaların modellenmesi Herrick tarafından 1980' li yıllarda, cıva ark lambalarının elektriki çalışma karakteristiğinin modellenmesi Laskowski ve Donoghue tarafından 1981' li yıllarda yapılmıştır. (Kocatepe, 1995)

Transformatörlerdeki 3. ve 3' ün katları harmoniklerin geniş araştırılması ve 3 fazlı transformatörlerle ilişkisi Pender ve Delmar tarafından 1967 yılında ortaya atılmıştır. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışmasının, nüveyi daha çok doymaya götürmesi ve harmonik akımlarının hızlı bir şekilde artmasına sebep olduğu ifade edilmiş, bu durum Mc Graw tarafından 1980' de, Szabados ve Lee tarafından da 1981 yıllarında deneysel olarak ispatlanmıştır. (Kocatepe, 1995)

Güç sistemlerinde güç kalitesi konusuna giderek artan ilgi neticesi, uluslararası toplantı ve konferanslarda yoğun tartışmalar yapılmış ve geniş bir bibliyografya meydana gelmiştir. Örneğin; IEEE Power System Harmonic Working Group Report' da 1910 yılından 1983 yılına kadar güç sistemi harmoniklerinin bibliyografyası 1984 yılında verilmiştir. Bu tarihi perspektiften bakıldıktan sonra harmonik analizi için şunlar söylenebilir. Harmonik analizi

için en uygun yöntem güç akışının incelenmesidir. Güç akışının incelenmesi de, üretim ve talep seviyeleri için hat yüklenmesinin hesabından başka bir şey değildir. Dengesiz temel güç akışı analizi üzerindeki çalışmalar ilk olarak El-Abiad ve Tarsi tarafından 1967 yılında ortaya konmuştur. Daha sonra 1983' de Arrillage ve 1985 yılında Wortman tarafından birçok gelişme kaydedilmiştir. Modern güç sistem analizinde harmonik modellemenin 3 fazlı güç akışı analizi hakkında en önemli çalışmalar, Arrillage 1983 ve Xu' nun 1991 yılında yaptığı çalışmalar kabul edilir. (Kocatepe, 1995)

Harmonikli güç akış çözüm tekniği ilk kez Xia ve Heydt tarafından 1982 yılında yapılmıştır. Bu çerçevede bilinen HARMFLO programı, doğrultucuların, HVDC (High Voltage Direct Current) çeviricilerinin ve diğer nonlinear elemanların sebep olduğu harmonikli güç akış analizi için kullanılabilmektedir. Bundan farklı yaklaşımlar 1984 yılında Densem ve 1987 yılında Semlyen tarafından ortaya konulmuştur. (Kocatepe, 1995)

Bu güne kadarki hem dengeli hem dengesiz güç akış analizinde transformatörler lineer olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte literatürde anisotropik transformatörün nonlinear modeli Masoum ve Fuchs tarafından 1991 yılında ortaya konmuştur. Bu transformatörlerdeki ilave kayıplar ve nonlinear güç azalması ile bunlara nonlinear yüklerin etkisi Masoum tarafından 1990 ve 1991 yıllarında incelenmiştir. (Kocatepe, 1995)

3.3 Harmonik Kaynakları

Bilindiği gibi elektrik güç sistemlerinde gerilim ve akımın dalga şeklinin sinüs formundan sapmasına neden olan harmonik bileşenleri, harmonik kaynağı olarak nitelendirilen ve akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar tarafından üretilmektedir. Harmonik kaynakları, genel olarak ark oluşturarak çalışan sistemler, magnetik doyma özelliğine sahip elemanlar, güç elektroniği devreleri, fotovoltaiik sistemler ve gaz deşarjı prensibine göre çalışan aydınlatma elemanlarıdır. Ark fırınları, transformatörler, döner makineler, HVDC sistemleri, statik VAR sistemleri, motor kontrol devreleri, cıva ve sodyum buharlı lambalar ile floresant lambalar bunlara örnek olarak verilebilir (Kocatepe, 1995; Dugan vd., 1996).

Bir güç sisteminin harmonik simülasyonunun gerçekleştirilmesi bakımından sistemdeki harmonik kaynakları üç gruba ayrılabilir. (Arrillaga vd. 1997)

1. Sistem içerisine dağılmış çok sayıdaki küçük güçlü nonlinear elemanlar,
2. Büyük güçlü, karakteristiği sürekli ancak rastgele değişen nonlinear yükler,
3. Büyük güçlü statik konverterler ve iletim sistemlerindeki güç elektroniği düzenleri.

Birinci gruptaki harmonik kaynakları, çoğu alçak gerilim cihazının (TV, bilgisayar vb.) besleme kaynağı durumundaki bir fazlı köprü diyotlu doğrultuculardır. Gaz deşarjı prensibine göre çalışan lambalar da bir fazlı alçak gerilim ile çalışmaları ve düşük güçlü olmaları sebebiyle bu gruba dahil edilebilir. Tek tek ele alındığı zaman her birinin gücünün düşük olmasına rağmen bu elemanların bir fazlı olması ve sistemde çok sayıda olmaları göz önüne alındığında tümünün etkisi önemli olabilmektedir. (Yumurtacı, 2000)

İkinci gruptaki harmonik kaynaklarının başlıca örneği; yüksek gerilim iletim şebekesine direkt olarak bağlanan, anma gücü MW mertebesinde olan genellikle yeterli bir filtre sistemi ile donatılmamış bulunan ark fırınlarıdır. Bu fırınların empedansı dengesiz olup, zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rastgele değişimine sebep olmakta ve simülasyonu güçleştirmektedir. (Yumurtacı, 2000)

Üçüncü gruptaki büyük güçlü konverterlerin ve güç elektroniği düzenlerinin gerek kontrol sistemlerinin çok karmaşık olması ve gerekse güçlerinin büyük olması nedeniyle simülasyonu zordur. Ayrıca konverterin çalışması sırasında üretilen harmonik bileşenleri güç kaynağına olumsuz etki yapmaktadır. Bu nedenle konverterin problemsiz çalışması için güç sisteminin harmonik simülasyonuna önem verilmelidir. (Yumurtacı, 2000)

Bu bölümde yukarıda bahsedilen harmonik kaynaklarından bazıları incelenecektir.

3.3.1 Transformatörler

Enerji sistemlerinde transformatörler gibi bir demir çekirdek üzerine yerleştirilmiş bobinlerden meydana gelen elemanlar, doyma özelliğine sahip demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle harmonikler üretirler. (Dommel vd., 1986; Dugan vd., 1996).

Bilindiği gibi transformatörlerin mıknatıslanma akımının dalga şekli sinüs formundan oldukça uzaktır. Bu nedenle mıknatıslanma akımı yüksek genlikli harmonik akım bileşenleri içerir. Ancak transformatörün mıknatıslanma akımı, anma akımının %1'i seviyesindedir (McPherson ve Laramore, 1990). Elektronik güç konverterleri ve ark fırınları gibi nominal akımlarının %20' sine varan oranlarda harmonik akımları üreten diğer harmonik kaynakları ile güç transformatörleri karşılaştırılırsa, güç transformatörleri sistemde büyük harmonik kaynakları olarak dikkate alınmayabilir (Dugan vd., 1996). Bu nedenle harmonik yük akış çalışmalarının bir kısmında transformatörlerin lineer devre elemanları olarak modellendiği

görülmektedir (Xia and Heydt, 1982; Grady, 1983). Ancak bir dağıtım sisteminde yüzlerce transformatörün olduğu göz önüne alınırsa, bir bütün olarak transformatörler harmonik kaynağı olarak ele alınabilir. Çizelge 3.1’ de bir dağıtım transformatörünün harmonik akım bileşenleri transformatörün mıknatıslanma akımının yüzdesi olarak verilmiştir (McGranaghan vd., 1984). Burada I_μ transformatörün mıknatıslanma akımı, I_n transformatörün sisteme enjekte ettiği n. harmonik akımıdır.

Çizelge 3.1 Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu

Harmonik Derecesi (n)	$(\%) \frac{I_n}{I_\mu}$
3	50
5	20
7	5
9	2.6

Güç transformatörleri mıknatıslanma eğrisinin lineer olduğu bölgede çalışmak üzere dizayn edilir. Ancak transformatör yükünün az olduğu zamanlarda gerilimin yükselmesi sebebiyle magnetik çekirdek aşırı uyarılır ve çalışma mıknatıslanma eğrisinin lineer olmayan bölgelerinde gerçekleşir. Bu durumda transformatör harmonik üretir ve Çizelge 3.1’de gösterildiği gibi özellikle üçüncü harmonik bileşenleri etkin olur. (Yumurtacı, 2000)

Transformatörlerin lineer olmayan yükleri beslemesi sonucu transformatör üzerinden akan yük akımı harmonik bileşenleri içerir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda kuru tip transformatörlerin nonsinüsoidal akımlar çeken yükleri besleyebilme kapasitesinin bir ölçütü olarak kabul edilen “K-Faktörü” tanımlanmıştır (Kerszenbaum vd., 1991; Linden, 1996). K-Faktörü de anma gerilimi veya anma gücü gibi transformatörler için imalatçısı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüğüdür. Bu faktör,

$$K - \text{faktörü} = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 n^2 \quad (3.1)$$

olarak tanımlanır (Linden, 1996). Bu bağıntıda n harmonik mertebesi, I_n ise baz değeri olarak

transformatörün anma akımının alınması ile hesaplanan n.harmonik akım bileşeninin per-unit değeridir. K-faktörü, anma gücü 500 kVA'in altındaki transformatörler için tanımlanmıştır.

Transformatör bağlantı grubunun üç ve üçün katı harmoniklere etkisi incelendiğinde, dengeli olduğu kabul edilen bir nonlinear yük akımının temel bileşeninin efektif değeri I_1 ve temel frekans için hesaplanan açısal hızı ω_1 olmak üzere, a,b,c fazlarına ait yük akımlarının temel bileşenlerinin ani değerleri,

$$\left. \begin{aligned} i_a(\omega t) &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t) \\ i_b(\omega t) &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\ i_c(\omega t) &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

olarak tanımlanır. Nonlinear yük akımının n. harmonik bileşeninin efektif değeri I_n olmak üzere; a,b,c faz akımlarının n. harmonik bileşenlerinin ani değerleri,

$$\left. \begin{aligned} i_{a_n}(\omega t) &= \sqrt{2}I_n \sin(n\omega_1 t) \\ i_{b_n}(\omega t) &= \sqrt{2}I_n \sin(n\omega_1 t - 2\pi n/3) \\ i_{c_n}(\omega t) &= \sqrt{2}I_n \sin(n\omega_1 t + 2\pi n/3) \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir. Özel bir durum olarak $k=1,2,3,\dots$ olmak üzere $n=3k$ mertebesindeki harmonik bileşenlerinin (3.,6.,9., ...) ani değerleri (3.3) eşitliklerine göre;

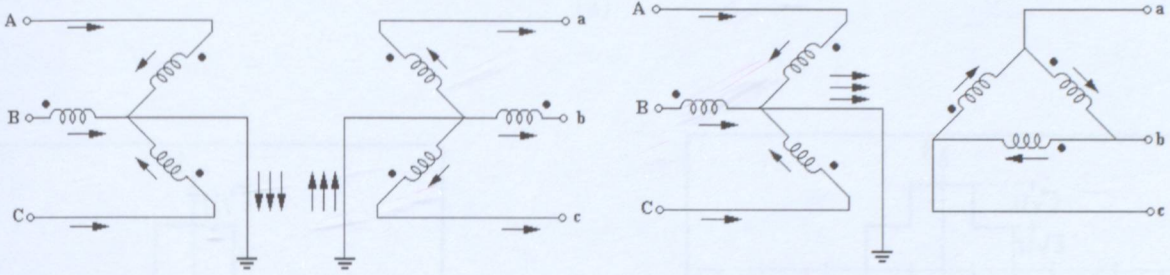
$$i_{a_{3k}}(\omega t) = i_{b_{3k}}(\omega t) = i_{c_{3k}}(\omega t) = \sqrt{2}I_{3k} \sin(3k\omega_1 t) \quad (3.4)$$

değerini alır. Yukarıdaki eşitlikte de görüldüğü gibi, dengeli şebeke ve yük koşulları altında üç ve üçün katı harmonik bileşenlerinin her üç faz akımları birbirine eşittir.

Transformatörün yıldız noktasının topraklanması halinde; her üç faza ait dengeli temel bileşen akımlarının toplamının sıfır olması sebebiyle nötr iletkeninden geçen akım sıfır olur. Bu durum üç ve üçün katı harmonikler dışındaki tüm dengeli harmonik akım bileşenleri için geçerlidir. Şekil 3.2' de gösterildiği gibi her üç fazın üç ve üçün katı harmonik akım bileşenlerinin birbirine eşit olması nedeniyle, bir fazdan geçen üç ve üçün katı harmonik akımının üç katı nötr iletkeninden geçer ve nötr iletkeni bu akım nedeniyle aşırı ısınabilir. Bu nedenle nötr iletkeninin kesitinin belirlenmesinde 3. harmonik akımının da göz önüne alınması gereklidir.

Transformatörün sekonderi üçgen bağlı ise Şekil 3.2'de gösterildiği gibi üçgen bağlantının her bir düğümünde akım toplamının sıfır olması nedeniyle şebekeye üç ve üçün katı harmonik

akımları geçmez. Bu özellikten yararlanarak şebekenin üç ve üçün katı harmoniklerden etkilenmesini önlemek için transformatörün yıldız/üçgen (nonlineer yük tarafının yıldız ve şebeke tarafının üçgen) bağlı olması tavsiye edilir. Transformatörün yıldız-topraklı / yıldız-topraklı bağlı olması halinde üç ve üçün katı harmonikler şebekeye geçer (Dugan vd., 1996).

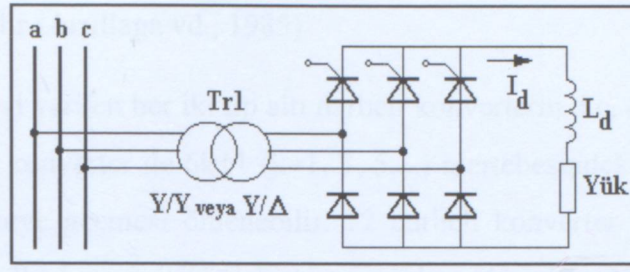


Şekil 3.2 Y/Y ve Y/Δ bağlı transformatörlerde üç ve üçün katı harmonik akım yönleri

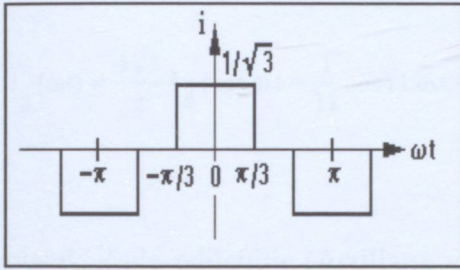
Nonlineer yük dengesiz ise transformatör bağlantısı ne olursa olsun üç ve üçün katı harmonik akımları dengesizlik sebebiyle şebekeye geçer (Arrillaga vd., 1985).

3.3.2 Konverterler

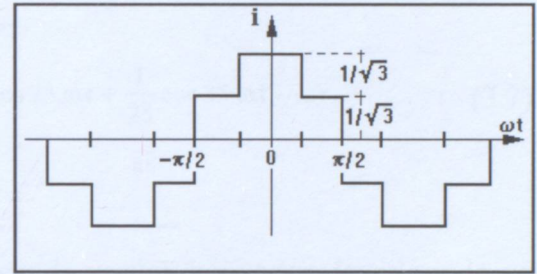
Enerji sistemlerindeki başlıca harmonik kaynaklarından biri de üç ve bir fazlı hat komütasyonlu konverterlerdir. DC iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenir (Kocatepe, 1995). Sistemdeki bir fazlı büyük güçlü konverterlerin (Kontrollü doğrultucuların) kullanım alanlarından birisi de elektrikli demiryolu ulaşım sistemleridir. Üç fazlı ideal (dengeli) konverterlerin bir fazlı konverterlere göre avantajı, üç fazlı konverterlerin üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir (Dugan vd., 1996). Üç fazlı konverterler, konverter transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen a.c. akımın dalga formunun içerdiği darbe sayısı ile tanınır. Şekil 3.3'de 6 darbeleri bir konverterin bağlantı şeması ve hat akımının zamana göre değişimi gösterilmiştir (Arrillaga vd., 1985; Rashid, 1993).



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.3 Üç fazlı 6 darbeleri konverter (Yarı kontrollü doğrultucu)

a) Bağlantı şeması

b) Transformatörün yıldız/yıldız bağlı olması hali için hat akımı dalga şekli

c) Transformatörün yıldız/üçgen bağlı olması hali için hat akımı dalga şekli

Transformatörün Y/Y bağlı olması halinde dengeli olarak çalışan konverterin Şekil 3.3b ile verilen a-fazı hat akımının ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{17} \cos 17\omega t + \dots \right) \quad (3.5)$$

olarak ifade edilebilir (Lander, 1981; Arrillaga vd., 1985). Transformatörün Y/Δ bağlı olması halinde, Şekil 3.3c ile verilen a-fazı hat akımı ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t + \frac{1}{17} \cos 17\omega t - \dots \right) \quad (3.6)$$

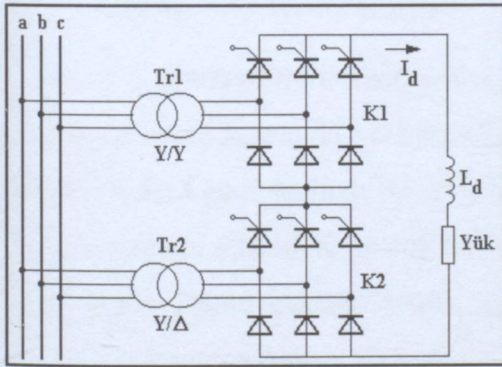
olarak ifade edilebilir. Bu durumda $k=1, 3, 5, \dots$ olmak üzere $6k \pm 1$ mertebesindeki harmonikler (5., 7., 17., 19., ..) Y/Y bağlı transformatörlü konverterin ürettiği harmoniklerin

ters işaretlisi olmaktadır (Arrillaga vd., 1985).

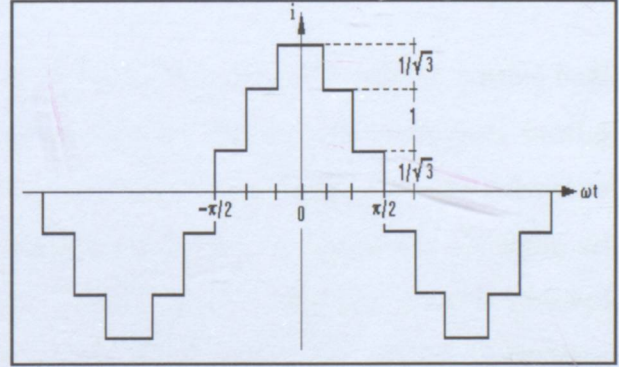
Yukarıda akım ifadeleri verilen her iki tip altı darbeli konverterin d.c. çıkışları seri bağlanarak elde edilen 12 darbeli konverter ile $6k \pm 1$ ($k=1, 3, 5, \dots$) mertebesindeki harmoniklerin (5., 7., 17., 19., ..) a.c. şebekeye geçmesi önlenabilir. 12 darbeli konverter şebekeye $k=1, 2, 3, \dots$ olmak üzere sadece $12k \pm 1$ mertebesindeki harmonikleri (11., 13., 23., 25., ..) enjekte eder. Şekil 3.4'de oniki darbeli konverterin bağlantı şeması ve a-fazı hat akımının zamana göre değişimi gösterilmiştir (Lander, 1981; Rashid, 1993; Arrillaga vd., 1985). Burada hat akımının ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{23} \cos 23\omega t + \frac{1}{25} \cos 25\omega t - \dots \right) \quad (3.7)$$

olarak ifade edilebilir (Arrillaga vd., 1985). (Bu kısımda verilen konverter devrelerinde ve eşitliklerinde transformatörlerin çevirme oranı 1:1 olarak alınmıştır.)



(a)



(b)

Şekil 3.4 Üç fazlı 12 darbeli konverter (Yarı kontrollü doğrultucu)

- a) Bağlantı şeması
b) Hat akımı dalga şekli

3.3.3 Ark Fırınları

Ark fırınları geniş harmonik spektrumları ile enerji sistemine bağlanan büyük güçlü harmonik kaynaklarından biri olarak önemli bir yer tutar. Bunlar, yüksek gerilim iletim şebekesine direkt olarak bağlanan, ancak gücü MW mertebesinde olan ve elektriksel ark oluşumu esasına dayanan fırınlardır. Elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle

ark fırınları harmonik üretirler. Ark olayının başlamasının ardından ark gerilimi azalırken, sadece güç sistemi eşdeğer empedansı ile sınırlandırabilen ark akımı artar. Bu anda ark olayında negatif direnç etkisi görülür (Dugan vd., 1996). Ark fırınlarının empedansı dengesiz olup, zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rastgele değişimine sebep olduğu için ark fırınının modellenmesi oldukça zordur (Arrillaga vd., 1997). Ayrıca ark olayında akım ile gerilim ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak değişir. Buna ait değişimler osilogram ile kaydedildikten sonra harmonik analizörleri yardımıyla harmonik spektrumu elde edilebilir (Kocatepe, 1995).

Bu konuda yapılan deneysel çalışmalardan çeşitli değerler elde edilmiştir. Örneğin, tipik bir ark fırınında 2,3,..., 9 mertebesinde akım harmonikleri bulunmuş ve maksimum harmonik bileşenin temel bileşenin %30'u kadar olduğu tespit edilmiştir (Sundberg, 1976). Ayrıca 2,3,4 ve 5 mertebesindeki akım harmoniklerinin temel bileşen akımının yaklaşık %2'si ile %4'ü arasında ve 6,7,...,10 mertebesindeki akım harmoniklerinin ise temel bileşen akımının yaklaşık %0.4'ü ile %1.3'ü arasında dağılım gösterdiği de tespit edilmiştir (Jahn ve Kaüferle, 1974; Coates ve Brewer, 1974).

3.3.4 Statik VAr Generatörleri

Statik VAr generatörleri; alternatif akım kısıyıcısı ile akımı değiştiren bir reaktör, paralel bağlı kondansatörler, kumanda ve kontrol elemanlarından oluşur. Bu sistemlerin çalışma özelliği gerekli reaktif gücü en hızlı bir şekilde ve her faz için ayrı ayrı verebilmesidir. Zira geleneksel kompanzasyon düzenleri ile çok hızlı değişen reaktif güç ihtiyacı karşılanamaz. Örneğin; ark fırınlarında fırının çektiği reaktif gücün değişimi çok hızlı olduğundan normal mekanik cihazlarla kompanzasyon gücünü karşılamak mümkün olmaz. Fakat yarı iletken elemanların sağladığı imkânlar sayesinde reaktör elemanlarını ark fırınının çalışması gerektiği hızda devreye sokup çıkarmak mümkündür. Bunun için tristörlerden yararlanılır. (Yeşil, 1996)

Tristörler, bir senkron anahtarı gibi çalışırlar. Kumanda devrelerine uygun sinyal verilerek devreye uygulanan gerilimin efektif değeri ve buna bağlı olarakta devreden geçen akım kayıpsız olarak istenildiği gibi ayarlanabilir. Bu sistem tristör ile kumanda edilen, reaktör ile dengelenen, sabit kondansatör ile kompanzasyon metodudur. Doymalı reaktörler kompanzasyon ark fırınları için ideal bir çözüm getirmemektedir. En uygun çözüm, fırının reaktif gücünün ani değerini ölçmek ve buna göre gerekli endüktif gücü, gerekli sayıda reaktörü devreye sokup çıkarmakla sağlamaktır. Bu suretle fırın gücü ile reaktör gücünün toplamı sabit tutulur ve sabit kondansatör tarafından kompanze edilir. (Yeşil, 1996)

3.3.5 Döner Makineler

Bir döner makinenin oluşturduğu harmonikler, ilke olarak makinenin stator ve rotorundaki olukların neden olduğu manyetik relüktanstaki değişimlerle ilgilidir. Döner makinelerin harmonik üretmelerinin başlıca iki nedeni; alan şekli ve ana devreler ile kaçak yollardaki doymalardır. Bir makine için gerçek alan şekli makine tasarımının bir fonksiyonudur. Günümüzdeki ileri tasarım teknikleri (oluk ve kutup geometrisi, sargı yapısı) ile döner makinelerdeki harmonik etkinliği en aza indirilmiştir. Döner makineler içerisinde en önemli harmonik üreticisi senkron generatörlerdir. (Yeşil, 1996)

3.3.6 Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları

Bir tüp içerisindeki gazın deşarjı prensibine dayanarak geliştirilen aydınlatma elemanları (civa buharlı lambalar, floresant lambalar, sodyum buharlı lambalar vb.) nonlinear akım gerilim karakteristiğine sahip olduğu için harmonik üretirler (Dugan vd., 1996). Bu tip lambalar iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Bina ve yol aydınlatmasında yaygın olarak kullanılan floresant lamba tesislerinde tek harmoniklerin seviyesi önemli oranda sistemi etkiler. Özellikle üçüncü harmonik ve üçüncü harmoniğin katları mertebesindeki harmonik akım bileşenleri, üç fazlı dört iletkenli aydınlatma devrelerinde nötr iletkeninden geçerek yüklenen iletkenin ısınmasına neden olur (Arrillaga vd., 1985; Grady ve Heydt, 1985).

Ayrıca floresant lambalara bağlanan balastların da bir magnetik devreleri olması nedeniyle bu yardımcı elemanlar da harmonik üretirler. Son yıllarda magnetik balastların yerine kullanılmak üzere geliştirilen ve anahtarlama güç kaynağı prensibi ile çalışan elektronik balastlar da harmonik üretmekle beraber balast içerisine monte edilen filtre ile elektronik balastın ürettiği harmonik bileşenlerini elimine etmek mümkündür. Aşağıdaki çizelgede magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu verilmiştir.(Çizelge 3.2) (Dugan vd., 1996).

Çizelge 3.2 Magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu

	Harmonik (n)										
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
$(\%) \frac{I_n}{I_1}$	100,0	19,9	7,4	3,2	2,4	1,8	0,8	0,4	0,1	0,2	0,1

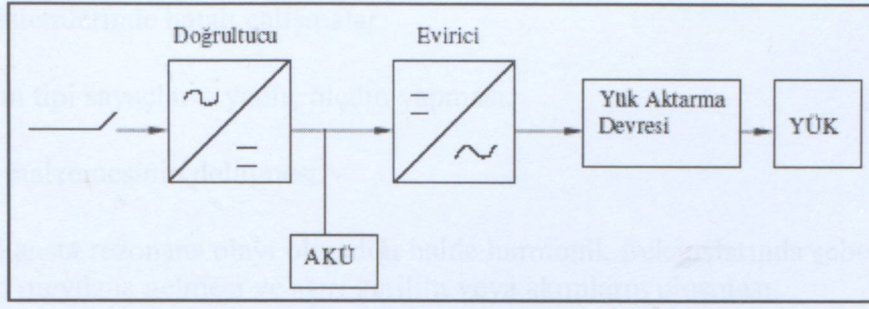
3.3.7 Kesintisiz Güç Kaynakları

Gerilim dalgalanmasının ve kesintisinin yol açtığı zararlardan kurtulmak için bilgisayarlar, hastaneler, hava alanları v.b. diğer önemli yerlerde kullanılan kesintisiz güç kaynakları, alternatif gerilimin doğru gerilime çevrilerek depolanması ve sonra evirici yardımı ile alternatif akıma çevrilerek tüketiciye iletilmesi esasına göre çalışır.

Kesintisiz güç kaynaklarında evirici, ara devre gerilimi olan doğrultucu çıkış gerilimini, evirmek suretiyle istenen genlik ve frekansta dalgalı gerilime dönüştürür. Dönüşüm sırasında tam sinüs dalgası elde edilemediği için çıkış işaretinin fourier serisinin açılımının belirttiği frekanslarda, belirli genliklerde harmonikler oluşturacaklardır. Bu durum gerek yükte gerekse kaynakta gereksiz yüklenmelere, ek ısınmalara, verimlilik kaybına, motor uygulamalarında salınımlara v.b. istenmeyen durumlara neden olabilmektedir. Ortaya çıkan bu harmonikler işletme cihazlarında çoğu kez istenen performansın alınabilmesini engellediği için istenmez. Sonuçta çıkış işaretindeki harmoniklerin belirli miktarlarda bastırılması çoğu kez gerekli bir işlem olmaktadır.

Kesintisiz güç kaynaklarında harmonikler evirici tipine, evirici çıkışını elde etmek için kullanılan modülasyon tipine, mikroişlemci kontrollü olup olmadığına v.b. etkenler bağlı olarak değişmektedir.

Bir güç elektroniği düzeni olan kesintisiz güç kaynakları, esas olarak şebeke geriliminin uygulandığı bir doğrultucu, doğrultucu çıkışında paralel olarak uygulanmış olan akü düzeni ile, doğrultulmuş gerilimi dalgalı gerilime dönüştürerek, yüke veren evirici düzenini içerir. Bu temel elemanlar yanında, elde edilip yüke verilecek sinüsoidal gerilimin istenilen özelliklerde olmasını sağlamak, güvenilir bir çalışma elde etmek üzere yardımcı düzenlerde vardır. Kesintisiz güç kaynaklarında doğrultucu ve evirici devreleri, uygun geri beslemelerle kapalı çevrim kontrollü çalıştırılırlar. Bundan dolayı çıkış gerilimleri çok kararlıdır, yükten etkilenmez. Şekil 3.5’de bir kesintisiz güç kaynağının prensip şeması görülmektedir. (Yeşil, 1996)



Şekil 3.5 Kesintisiz güç kaynağının prensip şeması

3.3.8 Elektronik Balastlar

Gün geçtikçe hayatımızın her safhasına daha belirgin bir biçimde giren elektronik sanayi, şebekede harmonik etkinliğinin de artmasına sebep olmaktadır. Aydınlatmada kullanılan elemanlardan elektronik balastlarda harmonik üreticisidirler. Filtreli ve filtresiz olarak imal edilen bu balastlar, eğer filtreli ise harmonik etkinliği yok sayılır. Filtresiz olarak kullanılan yüksek frekanslı elektronik balastlarda en etkin harmonik bileşenler 3., 5., 7. ve 9. bileşenlerdir, 13. harmonikten sonra temel bileşenin $1/3$ ' ünden daha küçük değerlerde harmonik bileşenlere sahiptirler. (Kocatepe, 1998)

3.4 Harmoniklerin Enerji Sistemine Etkileri

Harmoniklerin enerji sistemlerinde varlığı, sinüsoidal formdaki akım ve gerilim dalga şekillerindeki bozulmalar ile anlaşılır. Harmoniklerin enerji sistemlerinde yol açtığı problemler genel olarak şöyle özetlenebilir (IEEE Working Group on Power System Harmonics, 1983; Kocatepe, 1995)

- Generatör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin sinüs formundan sapması sebebiyle tüketicilerin çalışma koşullarının bozulması.
- Enerji sistemi elemanlarında ve yüklerde harmonikler nedeniyle ek kayıpların oluşması.
- Akımın harmonik bileşenleri nedeniyle gerilim düşümünün artması.
- Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri sebebiyle aşırı yüklenmeleri ve dielektrik zorlanma nedeniyle hasar görmeleri.
- Senkron ve asenkron motorlarda salınımların meydana gelmesi ve bu nedenle aşırı ısınmaları.
- Koruma sistemlerinin harmonikler nedeniyle hatalı çalışmaları.

- Kontrol Sistemlerinde hatalı çalışmalar.
- Endüksiyon tipi sayaçların yanlış ölçüm yapması.
- İzolasyon malzemesinin delinmesi.
- Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması.

Enerji sistemlerinde harmonikler sebebiyle ortaya çıkan problemler arasında en etkili olanları kayıpların artması ile ölçü ve koruma sistemlerinin hatalı çalışmasıdır. Harmonik akım bileşenleri omik direnç içeren tüm tesis elemanları üzerinde ek harmonik kayıplara yol açmaktadır (Emanuel ve Wang, 1985; Hwang vd., 1987; Hwang vd., 1988; Forrest, 1991; Makram vd., 1992). Harmonikler sebebiyle oluşan ek kayıpları azaltmak için harmonik kaynağı durumundaki nonlinear yüklerin filtreler ile donatılması, konverterler gibi güç elektroniği devrelerinin tasarımında ise darbe sayısının mümkün olduğu kadar yüksek tutulması ile büyük genlikli harmonik bileşenlerinin şebekeye geçmesi önlenabilir. Harmoniklerin koruma rölelerinin çalışmasına etkilerini incelemek üzere yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, harmoniklerin koruma rölelerine etkisi konusunda tam bir analitik yaklaşım ortaya konulamamış, elde edilen deneysel sonuçlar üzerine yorumlar yapılarak harmoniklerin etkisinin rölenin tipine, imalatçısına ve röle girişindeki ölçü transformatörünün magnetik doyma karakteristiğine göre değişim gösterdiği ifade edilmiştir. (IEEE Wave Distortion on Consumer's Interconnection Working Group, 1984; Horton ve Goldberg, 1985; Glinkowski ve Esztergalyos, 1996a, 1996b).

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin bu harmonik etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesini sağlamak ve tüketiciye daha kaliteli enerji verebilmek için harmoniklerin belirli bir seviyenin altında tutulması gerekir. Bu amaçla, nonlinear yüklerin toplam harmonik distorsiyonu ve harmoniklerin temel bileşene oranı, her ülke tarafından sınırlandırılmaktadır.

3.5 Türkiye’de ve Dünyada Kullanılan Harmonik Standartları

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin harmoniklerin olumsuz etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesini sağlamak ve tüketiciye daha kaliteli enerji verebilmek için harmoniklerin belirli seviyenin altında tutulması gerekmektedir. Bu amaçla bazı ülkeler, nonlinear yüklerin meydana getirdiği harmonik bileşenleri bir yaptırım olarak sınırlandırmışlar ve harmonik standartları oluşturmuşlardır. (Kocatepe, 2003)

Harmonik standartları, harmonikler için sınırlama getirmektedir. IEEE tarafından 1992 yılında

getirilen IEEE 519-1992 nolu standart ve IEC tarafından 1995 yılında IEC 1000-3-2 gibi standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim distorsiyonunu ve müşteriler için nonlineer yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırları vurgulamaktadırlar. (Kocatepe, 2003)

Çeşitli ülkeler tarafından farklı gerilimler için harmoniklerin sınırlanmış değerleri toplam harmonik distorsiyonu olarak Çizelge 3.3 'de verilmiştir. (Kocatepe, 2003)

Çizelge 3.3 Çeşitli ülkelerin harmonik standartlar

ÜLKE	GERİLİM (kV)	THD _v (%)
A.B.D	Genel	
	2,4-69	5
	115≤	1,5
	Özel	
	2,4-69	8
	115≤	1,5
ALMANYA	Tüm Gerilimler (15.Harmoniğe kadar)	10
AVUSTRALYA	Dağıtım	
	33≥	5
	İletim	
	22,33,66	3
	115≤	1,5
FİNLANDİYA	1	5
	3,0-20	4
	30-45	3
	110	1,5
FRANSA	Tüm Gerilimler	1,6
İNGİLTERE	0,415	5
	6,6-11	4
	33-66	3
	132	1,5
İSVEÇ	0,43-0,25	4
	3,3-24	3
	84≥	1

Ülkemiz açısından harmonik standartlar değerlerine bakıldığında, bu konuda sadece küçük ev aletleri için geliştirilmiş TS 9882 nolu “ Ev tipi cihazlar ve benzeri elektrik donanımının elektrik besleme sistemlerinde yol açtığı bozulmalar” adlı harmonik standardı vardır. TS 9882 standardının kapsamına giren elektriksel donanımlar, pişirme ve ısıtma cihazları, motorla çalıştırılan veya manyetik olarak tahrik edilen cihazlar, taşınabilir aletler, ışık kırıncılar ile

radio ve televizyon alıcılarıdır. TS 9882 standardı, ev ve benzeri yerlerdeki bu elektrik donanımının besleme sistemlerinde yol açtığı bozulmalara karşı öngörülen şartların belirlenmesi ile bu şartların pratik olarak uygulanma kurallarına ve bozulmalarla ilgili tip deneylerin uygulanma metotlarıyla ilgilidir. (Kocatepe, 2003)

Yine ülkemizde, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) tarafından hazırlanmış “Elektrik Piyasaları Şebeke Yönetmeliği” içerisinde OG ve YG için kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri tanımlanmıştır. (Çizelge 3.4 – Çizelge 3.5) (EPDK, 2003)

Çizelge 3.4 380 kV iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)
5	1.25	3	1.0	2	0.75
7	1.0	9	0.4	4	0.6
11	0.7	15	0.2	6	0.4
13	0.7	21	0.2	8	0.4
17	0.4	>21	0.2	10	0.4
19	0.4			12	0.2
23	0.4			>12	0.2
25	0.4				
>25	0.2+0.2 (25/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 2					

Çizelge 3.5 20–154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No. “h”	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. “h”	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. “h”	Harmonik Gerilim (%)
5	1.5	3	1.5	2	1.0
7	1.5	9	0.75	4	0.8
11	1.0	15	0.3	6	0.5
13	1.0	21	0.2	8	0.4
17	0.75	>21	0.2	10	0.4
19	0.75			12	0.2
23	0.5			>12	0.2
25	0.5				
>25	0.2+0.3 (25/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 3					

Akım harmonik limitleri, yine EPDK tarafından yayımlanan “ Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenliği ve Kalitesi” yönetmeliğinde tanımlanmıştır. (Çizelge 3.6) (EPDK, 2004)

Çizelge 3.6 Kabul edilebilir akım harmonik limitleri

Harmonik Sırası		OG 1<Un<34.5					YG 34.5<Un<154					ÇYG Un>154				
Grup	No	Ik/II					Ik/II					Ik/II				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
T E K	3	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	5	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	7	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	9	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
H A R M O N İ	11	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	13	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	15	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	17	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
M O D U L E R	19	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	21	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	23	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	25	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
K L E R	27	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	29	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	31	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	33	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
R	h>33	0,3	0,5	0,7	1	1,4	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7	0,75	0,12	0,17	0,25	0,35
Çift harmonikler izleyen tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.																
Toplam Akım Distorsiyonu		5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5
Bu değerler 3 saniyelik ortalamalardır.																

Ik: Ortak kuplaj noktasındaki maksimum sistem kısa devre akımı

II: Ortak kuplaj noktasındaki maksimum yük akımının en büyük bileşeni

4. HARMONİKLERİN AKIM TRANSFORMATÖRLERİNE ETKİLERİ

Günümüzde harmonik akımlarının ve harmonik güçlerin izlenip kaydedilmesi, güç sisteminin önemli gerekliliklerindendir. (IEEE Std. 1453, 2004; CIGRE Working Group, 2005) Yapılan bu işlerdeki temel amaç;

- Enerji iletim ve dağıtım hatlarında, fider, transformatör ve bunlara ait hücrelerde dolaşan akımın spektrumunu takip edebilmek. (Dugan, 2003)
- Sistemde oluşan rezonans ve elektromanyetik etkileri belirleyebilmek. (Almonte ve Ashley, 1995)
- Harmonik kirliliğe sebebiyet veren kaynağın tespit edilebilmesini sağlamak. (Emanuel, 1990; Cristaldi ve Ferrero, 1995)
- Akımın spektrumunu ölçebilmek.
- Harmonik akımları tespit edebilecek cihazları kullanarak, sistemdeki koruma ve kontrol devrelerinin çalışabileceği ortamı sağlayabilmek. (Arabi vd., 1987)

Birçok akım transdüser tipi içerisinde, harmonik akımları ölçebilmek için en çok kullanılan akım transformatörleridir. Akım transformatörleri, düşük maliyetleri ve kolay montaj ile uzun ömürleri sebebiyle tercih edilirler.

Akım transformatörlerin harmonikler karşısındaki davranışlarını inceleyebilmek için, hem sinüsoidal durumlardaki davranışları hem de nonsinüsoidal durumlardaki davranışlarının incelenmesi doğru olacaktır. (IEEE Std. 1453, 2004)

4.1 Teorik İnceleme

4.1.1 Akım Transformatörlerinin Lineer Modeli

Bilindiği üzere, akım transformatörlerinin çalışması amper yasasına göre olmaktadır. (Emanuel ve Orr, 2007)

$$N_p i_p = N_s i_s \quad (4.1)$$

Burada N_p ve N_s primer ve sekonder sarım sayısını, i_p ve i_s primer ve sekonder akımları ifade etmektedir. Şekil 4.1 de gösterildiği üzere, sekonder devre yük (burden) olarak tabir edilen

$$Z_b = R_b + j\omega L_b \text{ empedansını beslemektedir.}$$

4. HARMONİKLERİN AKIM TRANSFORMATÖRLERİNE ETKİLERİ

Günümüzde harmonik akımlarının ve harmonik güçlerin izlenip kaydedilmesi, güç sisteminin önemli gerekliliklerindendir. (IEEE Std. 1453, 2004; CIGRE Working Group, 2005) Yapılan bu işlerdeki temel amaç;

- Enerji iletim ve dağıtım hatlarında, fider, transformatör ve bunlara ait hücrelerde dolaşan akımın spektrumunu takip edebilmek. (Dugan, 2003)
- Sistemde oluşan rezonans ve elektromanyetik etkileri belirleyebilmek. (Almonte ve Ashley, 1995)
- Harmonik kirliliğe sebebiyet veren kaynağın tespit edilebilmesini sağlamak. (Emanuel, 1990; Cristaldi ve Ferrero, 1995)
- Akımın spektrumunu ölçebilmek.
- Harmonik akımları tespit edebilecek cihazları kullanarak, sistemdeki koruma ve kontrol devrelerinin çalışabileceği ortamı sağlayabilmek. (Arabi vd., 1987)

Birçok akım transdüser tipi içerisinde, harmonik akımları ölçebilmek için en çok kullanılan akım transformatörleridir. Akım transformatörleri, düşük maliyetleri ve kolay montaj ile uzun ömürleri sebebiyle tercih edilirler.

Akım transformatörlerin harmonikler karşısındaki davranışlarını inceleyebilmek için, hem sinüsoidal durumlardaki davranışları hem de nonsinüsoidal durumlardaki davranışlarının incelenmesi doğru olacaktır. (IEEE Std. 1453, 2004)

4.1 Teorik İnceleme

4.1.1 Akım Transformatörlerinin Lineer Modeli

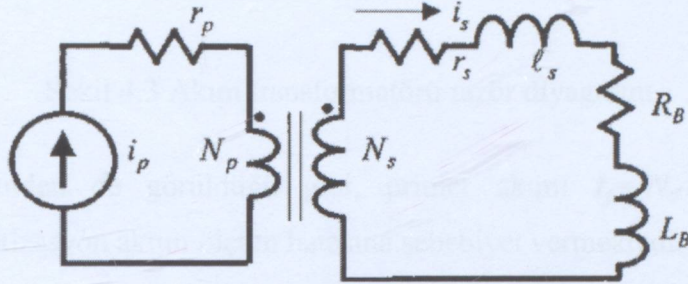
Bilindiği üzere, akım transformatörlerinin çalışması amper yasasına göre olmaktadır. (Emanuel ve Orr, 2007)

$$N_p i_p = N_s i_s \quad (4.1)$$

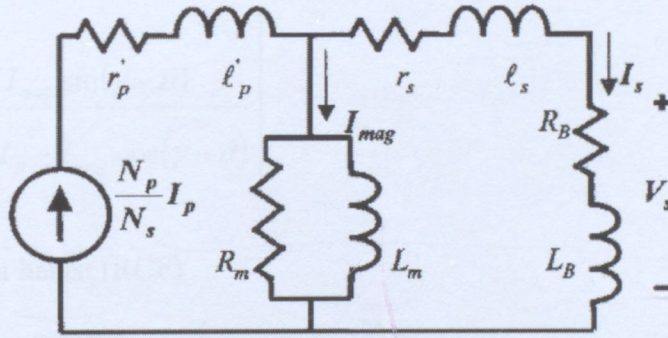
Burada N_p ve N_s primer ve sekonder sarım sayısını, i_p ve i_s primer ve sekonder akımları ifade etmektedir. Şekil 4.1 de gösterildiği üzere, sekonder devre yük (burden) olarak tabir edilen

$Z_b = R_b + j\omega L_b$ empedansını beslemektedir.

Sinüsoidal durumlarda, akım transformatörünün eşdeğer devresi Şekil 4.2 de gösterildiği gibidir. Burada I_p primer akımı, sekonder devreye $(N_p/N_s)I_p$ şeklinde indirgenir. Sekonder sargı direnci r_s ve kaçak endüktans ℓ_s efektif yük değerini arttırmaktadır. (Emanuel ve Orr, 2007)



Şekil 4.1 Akım transformatörü bağlantı diyagramı



Şekil 4.2 Akım transformatörü eşdeğer devresi (lineer model)

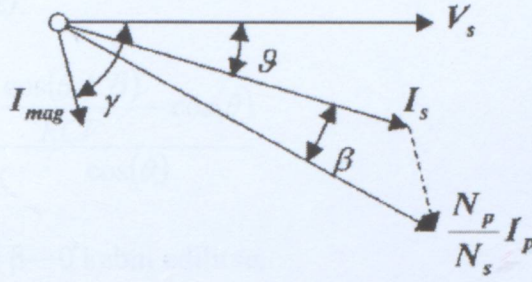
Magnetizasyon kolu üzerinde, magnetizasyon endüktansı L_m ve buna paralel direnç olan $R_m = V_s^2 / \Delta P_{Fe}$ bulunmaktadır. Buradaki ΔP_{Fe} manyetik çekirdekteki histeresis ve eddy akım kayıplarını temsil eder.

Akım transformatörü eşdeğer devresine ait fazör diyagramı Şekil 4.3 de verilmiştir. Burada sekonder gerilimi olan V_s ;

$$V_s = (R_b + j\omega L_b)I_s \text{ olarak ifade edilir.} \quad (4.2)$$

Magnetizasyon akım fazörü I_{mag} , sekonder gerilim fazörü V_s in γ açısı kadar gerisinde kalır. Kirchhoff 'un akım yasasına göre;

$$\frac{N_p}{N_s}I_p = I_s + I_{mag} \quad (4.3)$$



Şekil 4.3 Akım transformatörü fazör diyagramı

Yukarıdaki denklemden de görüldüğü gibi, primer akımı $I_p = (N_s/N_p)I_s$ denkleminde hesaplanırsa, magnetizasyon akımı ölçüm hatasına sebebiyet vermektedir.

İki çeşit hata oluşabilmektedir.

- Faz açısı hatası

$$\beta \approx \tan^{-1} \left[\frac{I_{mag} \sin(\gamma - \vartheta)}{\frac{N_p}{N_s} I_p - I_{mag} \cos(\gamma - \vartheta)} \right] \quad (4.4)$$

- Çevirme oranı hatası (RCF)

$$RCF = \frac{N_p}{N_s} \frac{|I_p|}{|I_s|} \approx \sqrt{1 + \left(\frac{N_s I_{mag}}{N_p I_p} \right)^2 - 2 \frac{N_s I_{mag}}{N_p I_p} \cos(\gamma - \vartheta)} \quad (4.5)$$

Bu iki hatadan özellikle faz açısı β , güç ölçüm hassasiyetini etkilemektedir.

Örneğin aktif gücü (P_A);

$$P_A = VI_p \cos(\theta) \quad (4.6)$$

Faz açısı olan θ , gerilim (V) ile akım (I_p) arasındaki faz farkıdır. ($\theta \neq \vartheta$)

β açısı sebebiyle ölçülen güç (P_M);

$$P_M = V \frac{N_s}{N_p} I_s \cos(\theta \pm \beta) = \frac{VI_p}{RCF} \cos(\theta \pm \beta) \quad (4.7)$$

+ işareti üretilen gücü, - işareti ise dağıtılan gücü ifade eder.

Buradan da yüzde hata ($\% \epsilon$):

$$\% \epsilon_p = 100 \frac{P_M - P_A}{P_A} = 100 \frac{\frac{\cos(\theta \pm \beta)}{RCF} - \cos(\theta)}{\cos(\theta)} \quad (4.8)$$

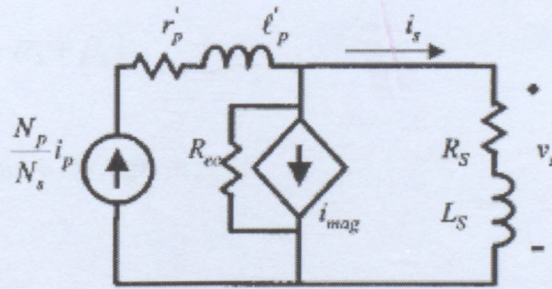
Pratik olarak $RCF \rightarrow 1.0$ ve $\beta \rightarrow 0$ kabul edilirse;

$$\% \epsilon_p \approx \pm 100 \frac{\sin(\theta) \sin(\beta)}{\cos(\theta)} \approx \pm 100 \beta \tan(\theta) \quad (4.9)$$

4.1.2 Akım Transformatörlerinin Nonlinear Modeli

Magnetizasyon endüktansı L_m 'nin nonsinüsoidal olması, i_p ölçülen akımı tamamiyle sinüsoidal iken, i_{mag} magnetizasyon akımının nonsinüsoidal olmasındandır. Bu durum, harmonik akım fazörlerinin ölçülen değerler içerisinde bulunması neticesinde oluşmaktadır. (Emanuel ve Orr, 2007)

Şekil 4.4'de akım transformatörüne ait basit bir nonlinear modelden yararlanacağız. Burada bulunan magnetizasyon kolundaki endüktans, gerilim bağımlı akım kaynağı (i_{mag}) olarak değişmiştir. (Emanuel ve Orr, 2007)



Şekil 4.4 Akım transformatörü modeli – nonlinear manyetizasyon endüktansı

Küçük değerli manyetik indüksiyonda, ferromanyetik çekirdekteki H/B karakteristiği aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$H = \frac{B}{B_M} H_M \pm \left[1 - \left(\frac{B}{B_M} \right)^2 \right] H_C \quad (4.10)$$

Burada H manyetik alan (A/m) ve B ise manyetik indüksiyondur.(T) Bunlardan ayrı olarak H_M ve B_m tepe değerler ve H_C ise coercive alandır.

Yukarıdaki denklemden manyetizasyon akımı (i_{mag});

$$i_{mag} = \frac{l_c H}{N_s} = a\lambda + bv_\sigma(1 - c\lambda^2) \quad (4.11)$$

Linkage akı (λ);

$$\lambda = N_s \phi = N_s A_c B = \int v_s dt \quad (4.12)$$

ve;

$$a = \frac{l_c H_M}{N_s \lambda_M} \quad ; \quad b = \frac{l_c H_c}{N_s}$$

$$c = \frac{1}{\lambda_M^2} \quad ; \quad \lambda_M = N_s A_c B_M$$

Burada l_c manyetik çekirdeğin ortalama yol uzunluğunu, A_c ise kesit alanını ifade etmektedir.

Primer akımın periyodik ve nonsinüsoidal olduğu kabul edilirse;

$$i_p = \sqrt{2} \sum_h I_{ph} \sin(hwt + \alpha_h) \quad (4.13)$$

$$i_s = \sqrt{2} \sum_h I_{sh} \sin(hwt + \alpha_h + \beta_h) \quad (4.14)$$

$$v_s = \sqrt{2} \sum_h Z_{sh} I_{sh} \sin(hwt + \alpha_h + \beta_h + \gamma_h) \quad (4.15)$$

Ayrıca;

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + (hwL_s)^2} \quad \text{ve} \quad \tan(\gamma_h) = \frac{hwL_s}{R_s} \quad (4.16)$$

Buradaki denklemlerden yararlanarak, Linkage akı (λ);

$$\lambda = -\sqrt{2} \sum_h \frac{Z_{sh} I_{sh}}{hw} \cos(hwt + \alpha_h + \beta_h + \gamma_h) \quad (4.17)$$

h bileşeninin tepe değeri için;

$$\lambda_{max} = \frac{\sqrt{2} Z_{sh} I_{sh}}{hw} \approx \frac{\sqrt{2} hw L_s I_{sh}}{hw} = \sqrt{2} L_s I_{sh} \quad (4.18)$$

Bu sonuç neticesinde, manyetik çekirdeğin karakteristiği tamamen lineer olsa bile ($i_{mag}=a\lambda$), ölçülen akımda bozulmalar meydana gelmesi durumunda, magnetizasyon akımı (i_{mag}) spektrumu içerisinde harmonik bileşenler bulunacaktır. (Emanuel ve Orr, 2007)

4.2 Sistemde Bulunan Harmoniklerin Ölçü ve Koruma Devrelerine Olası Etkileri

Akım transformatörlerinin sekonderine bağlanan ekipmanlar dikkate alındığında, ölçü devresi üzerine ölçü aletleri ile sayaçların bağlandığını; koruma devresine ise koruma röleleri ile koruma vazifesini gerçekleştiren diğer elemanlar bağlandığını görmekteyiz.

Sekonder yük olarak kullanılan cihazların da, akım transformatörlerinin harmonikler nedeniyle maruz kalacakları bozulmalardan etkilenebileceği aşikârdır. Bu bozulmaları iki ayrı başlık altında incelemek mümkündür.

4.2.1 Harmoniklerin Ölçü Devresi Üzerine Etkileri

Bilindiği üzere, primerden geçen akım değeri, kullanılacak ölçü devresi üzerindeki ekipmanlar ile insan sağlığı açısından tehlikeler oluşturmaktadır. Bu nedenle, ölçü devresinde kullanılan cihazlar, hem yüksek akımdan zarar görmemeleri için ve hem de maliyetlerinin daha düşük olması nedeniyle, akım transformatörlerinin ölçü devreleri üzerinden beslenirler.

Sekonder ölçü devrelerinde kullanılan başlıca cihazlar, ölçü aletleri ile sayaçlardır.

Ölçü aletleri, başlangıçta tam sinüsoidal işaretlere göre kalibre edilirler. Gerilimin karesi ile orantılı döndürme momentine göre ölçüm yapan sayaçlarda, gerilim ve akım harmoniklerinin oluşması bazı kayıt hatalarına yol açacaktır. Şebeke frekansından başka frekanslardaki enerjileri okumak için tasarlanmayan konvansiyonel sayaçların, harmoniklerin varlığında daha yüksek değerler okuyabildikleri görülmüştür. Ancak gelişmiş elektronik sayaçlar, bozulmuş dalga şekillerini hassasiyetle okuyabilmektedirler. (İnan ve Attar, 1997)

Elektrik saatleri (sayaçlar) gibi indüksiyon disk aygıtları sadece temel bileşene göre çalışırlar. Diskte oluşan moment, akının ve diskte endüklenen girdap akımlarının çarpımı ile orantılıdır. Her ikisi de yüksek frekanslarda orantısız olarak azalırlar. Bu da elektrik sayacının temel frekanstan daha yüksek frekanslarda hatalı ölçme yapmasına neden olur. Harmonik distorsiyonunun oluşturduğu faz dengesizlikleri de bu elemanların hatalı çalışmalarına neden olur. Genelde önemli hataların oluşması için distorsiyon seviyesinin %20' den büyük olması gerekir. (İnan ve Attar, 1997)

4.2.2 Harmoniklerin Koruma Devresi Üzerine Etkileri

Bilindiği gibi koruma sistemleri çoğunlukla temel gerilim ve akımlara göre tasarlanırlar. Tepe gerilimine, akım veya gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler harmonik distorsiyonundan çeşitli biçimlerde etkilenirler. Olabilecek harmoniklerin süzüldüğü veya ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilirse, elektromanyetik röle uygulamalarında (aşırı akım koruması gibi) yüksek harmoniklerin çok fazla etkinliğinin olmadığı söylenebilir. Ancak özellikle mesafe korumalarında, harmonik akımları (özellikle 3. harmonik bileşeni) büyük oranda ölçme değerlendirme hatalarına ve toprak rölelerinin hata yapmasına neden olabilmektedir. Dijital mesafe koruma sistemlerinde, akım ve gerilim harmoniklerinin mutlaka filtre edilmesi gerekmektedir. Rölelerin harmoniklerden başlıca etkileniş biçimleri şunlardır;

- Röleler daha büyük tepe değerleri ile yavaş çalışmak yerine daha küçük tepe değerleri ile hızlı çalışma eğilimi gösterirler.
- Statik rölelerin çalışma karakteristiklerinde önemli değişiklikler gözlenir.
- Aşırı akım ve gerilim rölelerinin çalışma karakteristikleri değişir.
- Harmonik bileşene bağlı olarak rölelerin çalışma momentlerinin yönü değişebilir.
- Çalışma zamanları, ölçülen büyüklükteki frekansın bir fonksiyonu olarak oldukça büyük bir farklılık gösterebilir.
- Dengeli empedans röleleri hem ayar ötesi hem ayar gerisi çalışma gösterebilirler.
- Fark röleleri yüksek hızla çalışmayabilirler.

Genelde rölelerin çalışmasını etkileyen harmonik seviyeleri, diğer elemanlar için kabul edilebilir maksimum harmonik seviyelerinden daha büyüktür. Bununla birlikte, koruma elemanları (röleler) üzerinde yapılan testlerden %20 'lik bir harmonik seviyesine kadar rölelerde fazla bir işletme probleminin oluşmadığı gözlenmiştir. (İnan ve Attar, 1997)

5. EMTP-ATP PAKET PROGRAMI

5.1 Temel Bilgiler

ATP, elektrik güç sistemlerinde elektromanyetik geçiciliklerin (Transient) ve elektromekanik olayların dijital simülasyonunda kullanılan EMTP programının bugün en yaygın kullanılan versiyonudur. Bu kadar yaygın olarak kullanılıyor olmasının başlıca nedenlerinden biri yasal olarak dünya üzerinde neredeyse herkes için ücretsiz kullanılabilir olması ve en çok kullanılan bilgisayar sistemleriyle uyumlu olmasıdır. (Prikler ve Hoidalén, 2002)

Bu program sayesinde karmaşık şebekeler ve kontrol sistemleri simüle edilebilir. Geçiciliklerin hesaplanabilmesi dışında çok çeşitli modelleme imkanlarına olanak sağlaması gibi önemli özelliklere de sahiptir.

EMTP ilk olarak 1984 senesinde Bonneville Elektrik İdaresi (BPA) dahilindeki EMTP Geliştirme Koordinasyon Grubu (DCG) ve Palo Alto Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü (EPRI) tarafından endüstriyel amaçlı kullanımı serbest bir program olarak geliştirilmiştir. ATP' nin doğuşu ise 1984' ün başlarında ticarileştirilmesi önerisini kabul etmeyen Dr. Meyer ve Dr. Liu 'nun, yine BPA' nin EMTP programı kodlarını kullanarak yeni bir program yazmaya başlamasına dayanır. Bu tarihten itibaren ATP programı, Dr. W. Scott Meyer ve Dr. Tsu-huei Liu (Canada/Amerika EMTP Kullanıcıları Grubu eski başkanları) tarafından yayınlanan uluslararası makaleler vasıtasıyla sürekli olarak geliştirilmektedir. 1975' den başlayarak EMTP ve sonrasında ATP için çok sayıda uzman Portland/USA' deki programcılar ile işbirliği içinde çalışmaktadır. (Prikler ve Hoidalén, 2002)

EMTP Amerikan yasalarına göre kullanımı serbest bir program olarak kabul edilse de ATP'nin kullanımı serbest değildir, kullanımı için lisans gerektirmektedir. Bu lisans ticari olarak electromagnetic transient programları satışı ile ilgilenmekte olan kişiler dışında ücretsizdir.

ATPDraw EMTP' nin ATP versiyonu için geliştirilmiş, Windows işletim sistemlerinde kullanılabilen bir grafik ara yüzüdür. Program, Borland Delphi programlama dili ile yazılmış olup Windows 9x/NT/2000/XP işletim sistemleriyle uyumlu olarak çalışabilmektedir. ATPDraw ile kullanıcı mouse yardımı ile önceden tanımlanmış bileşenleri kullanarak, simüle edilecek devrenin dijital modelini oluşturabilir. Bundan sonra ATPDraw, "gördüğün, girdiğindir" mantığı çerçevesinde ATP simülasyonu için gerekli formata uygun giriş dosyasını oluşturur. Böylece ATP simülasyon programı ile çizim programı ATPDraw ile

birbirlerine entegre edilmiş olur. (Prikler ve Hoidalén, 2002)

ATPDraw aynı anda birden fazla devre modellemesine ve bunlar arasında bilgilerin kopyalanmasına olanak tanır. Standart düzenleme komutlarının (kopyala/yapıştır, grupta, çevir, vs.) hepsi kullanılabilir. Üç faz ve bir faz düğüm noktaları isimlendirmesi özel olarak kullanıcı tarafından isimlendirilecek düğümler dışında tamamen ATPDraw tarafından otomatik olarak gerçekleştirilir. Standart olarak bulunan bileşenler dışında (üç faz ve bir faz bileşenleri) kullanıcı kendi objelerini oluşturabilir. Makine ve transformatör modellemelerinde kullanılabilecek Üniversal Motor gibi özel objeler, iletim hatları, kablolar, döner makineler, transformatörler modelleri mevcuttur. TACS (Kontrol Sistemlerinin Geçicilik Analizi) ve MODELS (Bir çeşit simülasyon dili) kontrol sistemlerindeki ark ve korona gibi lineer olmayan davranışların modellenmesinde, harmonik analizlerinde simetrik ve asimetrik kısa devre analizlerinde kullanılabilmektedir. (Prikler ve Hoidalén, 2002)

5.2 Simülasyon Çalıştırma Prensipleri

- Temel entegrasyonun trapezoidal kuralı, zaman domeninde sistem bileşenlerinin diferansiyel eşitliklerini çözmektir. (ATP, 1987- 1998)
- Sıfır olmayan başlangıç koşulları hem sabit durum faz çözümü ile otomatik olarak tanımlanabilir hem de daha basit bileşenler için kullanıcı tarafından giriş yapılabilir. (ATP, 1987- 1998)
- Program modülleri TACS (kontrol sistemlerinin geçici durum analizi) için interface (ara yüz) yeteneği ve MODELS, ark ve korona gibi lineer olmayan karakteristikler ile kontrol sistemleri ve bileşenlerinin modellenmesine olanak sağlar. (ATP, 1987- 1998)
- Arızalar, yıldırım dalgaları, valflerin (diyotlar v.b.) değişimini kapsayan anahtar operasyonlarının herhangi bir türü gibi simetrik ya da simetrik olmayan parazitlere izin verilir. (ATP, 1987- 1998)
- Frekans tarama özelliğini kullanarak faz ağlarının frekans cevabının hesaplanması gerçekleştirilebilir. (ATP, 1987- 1998)
- Harmonik frekans tarama kullanarak frekans domeninde harmonik analizleri yapmaya olanak sağlar. (ATP, 1987- 1998)

- Herhangi bir elektrik ağı olmaksızın TACS ve MODELS kontrol sistemi modellenmesi kullanarak dinamik sistemler simule edilebilir. (ATP, 1987- 1998)

5.3 Kullanılan Bileşenler

EMTP- ATP programı aşağıda belirtilen bileşenleri içerir. (ATP, 1987- 1998)

- Çift olmayan ve çift olan lineer, toplu parametrelili R, L, C elemanları.
- Dağılmış ve frekans bağımlı parametreler ile iletim hatları ve kablolar.
- Lineer olmayan dirençler ve endüktanslar, histerik endüktör, zamanla değişen direnç, TACS/MODELS kontrollü rezistans.
- Doğru olmayan bileşenler: doyma ve histerezis ihtiva eden transformatörler, dalga kesiciler, arklar.
- Anahtarlar: zamana bağımlı ve gerilime bağımlı anahtarlar, istatistik anahtarlar (Monte Carlo çalışmaları).
- Valfler (diyotlar, tristörler, tiryaklar), TACS/MODELS kontrollü anahtarlar.
- Analitik kaynaklar, adım, rampa, sinüsoidal, üstel, dalga fonksiyonları, TACS/MODELS tanımlı kaynaklar.
- Makineler: 3 faz senkron makine, üniversal makine modeli.
- Sıralı etki eden MODELS ihtiva eden kullanıcı tanımlı bileşenler.

5.4 Tanımlanmış Simülasyon Modelleri

ATP 'de MODELS, ifade ve zaman değişkenli sistemlerin çalışması için simülasyon takımlarının kapsamlı yerleştirilmesi ile desteklenen genel amaçlı bir tanımlama dilidir. Her bir modelin serbest formatta tanımlanmasına olanak sağlar. ATP 'de MODELS, keyfi kullanıcı tanımlı kontrol ve devre bileşenlerinin tanımlanmasına izin verir, ATP için diğer programlara ve modellere bağlantı için basit bir ara yüz sağlar.

Genel amaçlı programlayabilme takımı MODELS, hem frekans domeninde hem de zaman domeninde süreç simülasyon sonuçları için kullanılabilir.

TACS, kontrol sistemlerinin zaman domeni analizleri için bir simülasyon modülüdür.

HVDC (Yüksek Voltaj DC), dönüştürme kontrollerinin simülasyonu için özel olarak geliştirilmiştir. TACS için kontrol sistemlerinin bir blok diyagram benzetimi kullanılır. TACS aşağıda belirtilen işlemlerin simülasyonu için kullanılabilir.

- HVDC dönüşüm kontrolleri.
- Senkron makinelerin uyarma sistemleri.
- Güç elektroniği ve sürücüleri.
- Elektrik arkları (Devre kırıncılar ve arıza arkları).

Elektrik ağı ve TACS arasındaki ara yüz düğüm gerilimi, anahtar akımı, anahtar durumu, zaman değişkenli rezistans, gerilim ve akım kaynakları gibi sinyallerin değişimi ile tesis edilir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve SİMÜLASYON

Akım transformatörlerinin performansını etkileyen nedenlerden biri enerji kalitesinin yetersiz olmasıdır. Enerji kalitesinin yetersiz olmasından kasıt, akım ve gerilimin dalga şeklinin sinüsoidal formdan sapması, yani dalga şeklinin bozulmasıdır. Bu bozulmalara neden olan harmonikler, önceki bölümlerde incelenmiş ve teorik olarak tanımı yapılmıştır.

Bu bölümde, gerçek bir akım transformatöründen elde edilen veriler kullanılarak, bir akım transformatörü modeli oluşturulacaktır. Oluşturulan akım transformatörü modelinin sağlaması yapıldıktan sonra sinüsoidal olan ve olmayan primer akımlar karşısında performansı incelenecektir.

Simülasyonlar için oluşturulan sinüsoidal olan ve olmayan primer akımlar, gerçek akım transformatörüne uygulanarak ölçümler yapılacak ve elde edilen veriler simülasyon sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

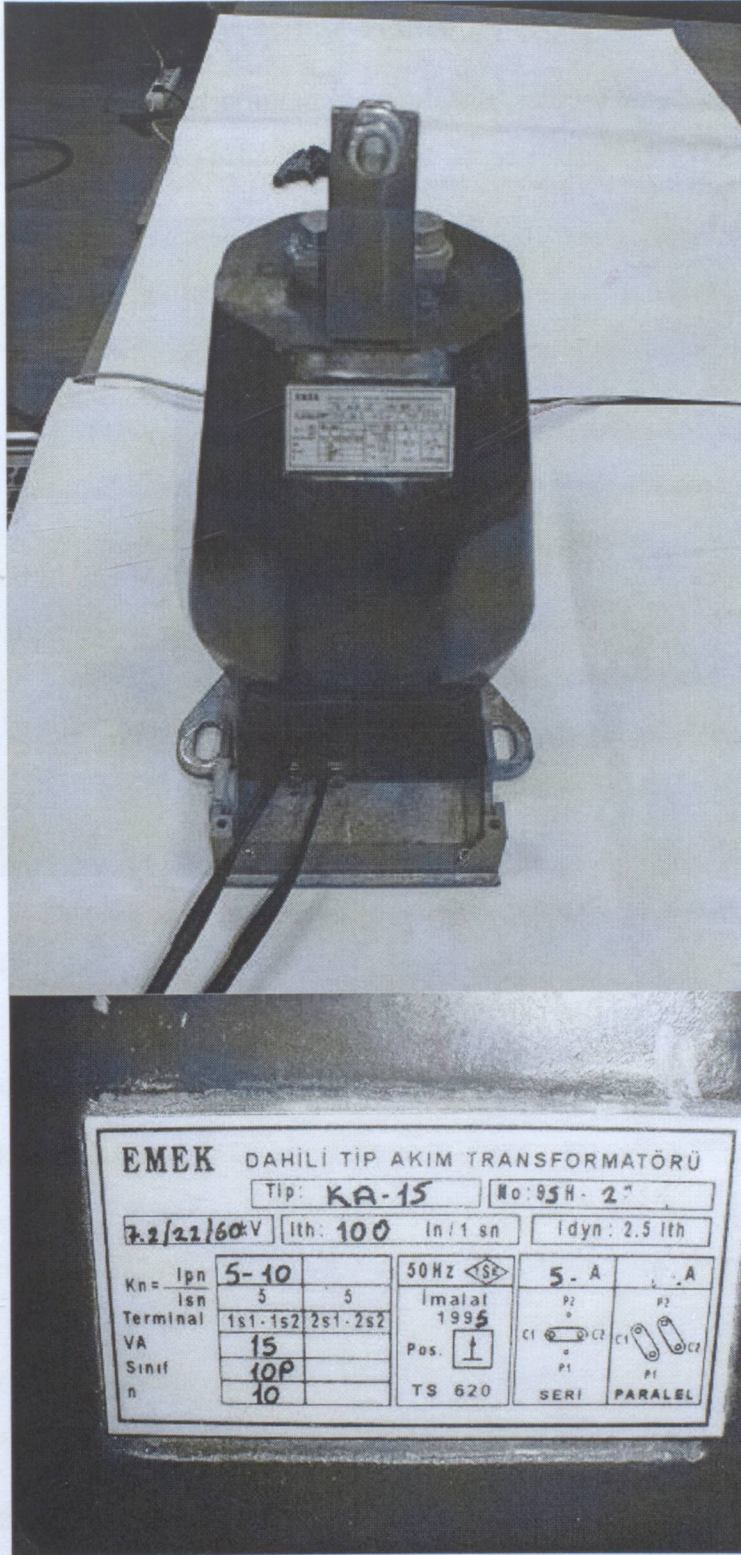
6.1 Kullanılan Akım Transformatörüne ait Bilgiler

Simülasyon ve testler için kullanılan akım transformatörüne ait etiket bilgileri aşağıda verilmiştir.(Çizelge 6.1)

Çizelge 6.1 Akım transformatörüne ait etiket bilgileri

Çevirme Oranı	10 -5 / 5 A*
Hassasiyet Sınıfı	10P
Hassasiyet Sınır Faktörü (n)	10
Yük	15 VA
Kısa Devre Akımı (Ith)	100 x In (1s)
Nominal Dinamik Akımı (Idyn)	2,5 x Ith

* Akım transformatörünün 5/5A oranı kullanılmıştır.



Şekil 6.1 Kullanılan akım transformatörü ve etiket bilgileri

Akım transformatörünün etiket bilgilerinin doğruluğunun tespiti için, Bölüm 2.6'da belirtilen deneylerden, çevirme oranı testi yapılmıştır. Simülasyonda modellemenin sağlıklı yapılabilmesi için de uyartım eğrisinin elde edilmesi ve sekonder sargı direncinin ölçülmesi testleri yapılmıştır.

6.2 Akım Transformatörüne Uygulanan Testler

Akım transformatörüne laboratuvar ortamında uygulanan çevirme oranı, uyartım eğrisi ve sargı direnci testleri, aşağıda gösterilen primer test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. (Şekil 6.2)



Şekil 6.2 Laboratuvarda kullanılan primer test cihazı (Omicron,2002)

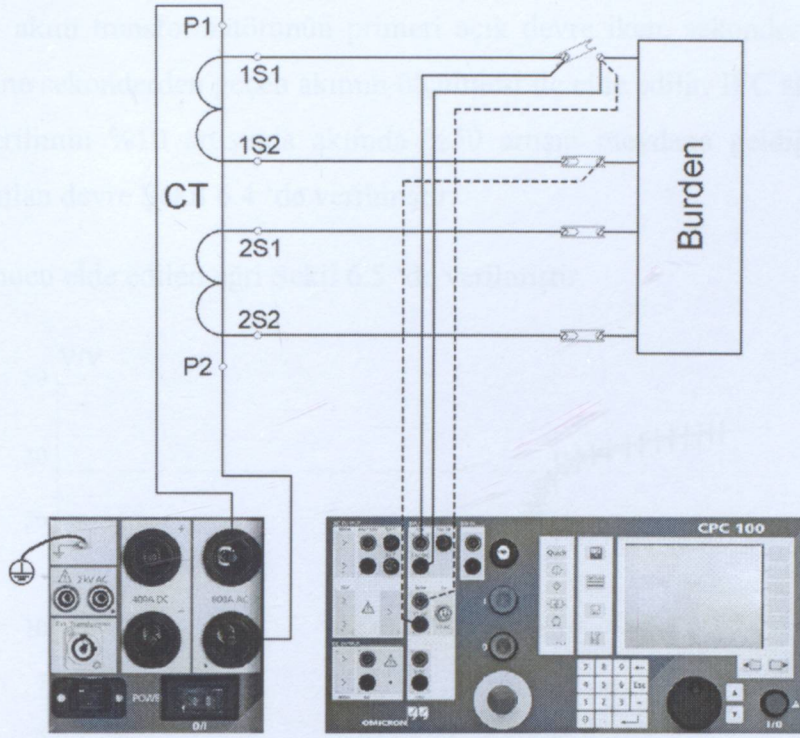
6.2.1 Akım Transformatörü Dönüştürme Oranı Testi

Yapılan testte, akım transformatörünün primerine (P1 ve P2 olmak üzere) nominal akım değeri uygulanır. Buna karşılık sekonderde oluşan akımın genliği ile faz açısı okunur. Uygulanan ve okunan değerler karşılaştırılarak, gerçek dönüştürme oranı ile yüzdesel hata tespit edilir. Test için kullanılan devre şeması Şekil 6.3 'de verilmiştir. (Deneyde kullanılan akım transformatörünün sadece koruma çekirdeğinin olması sebebiyle bir adet sekonder sargısı olduğundan cihazın 2S1-2S2 girişleri kullanılmıştır.)

Yapılan testte, test cihazı tarafından akım transformatörünün primerine uygulanan akım değerinin 4,790A ve faz açısının 0° olduğu; sekonder taraftan okunan akım değerinin 4,784A ve faz açısının 0,34 ° olduğu görülmüştür. Bu durumda hata miktarı aşağıdaki bağıntıdan;

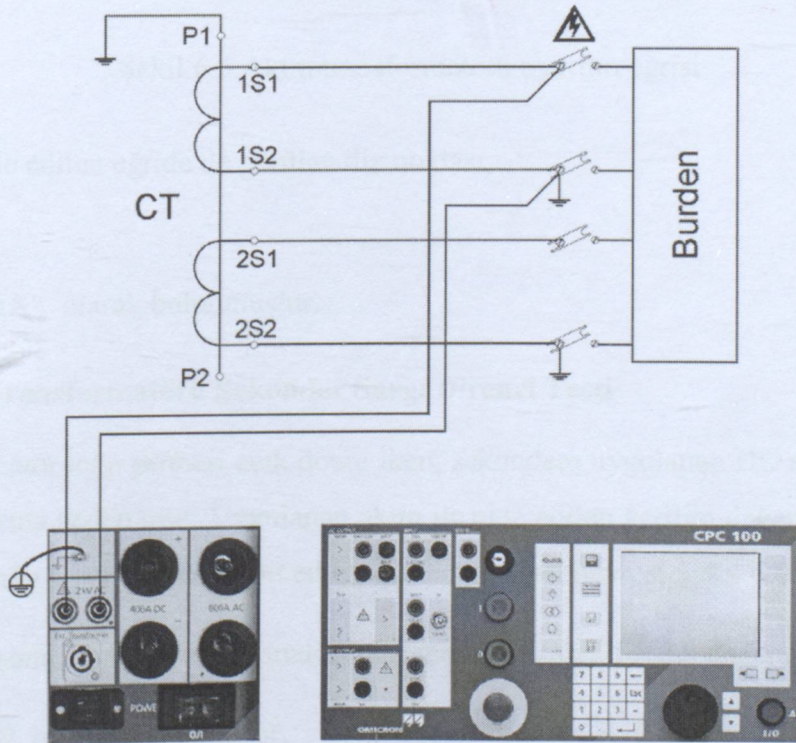
$$\%Hata = \frac{((K_n \times I_s) - I_p)}{I_p} \times 100$$

$$\%Hata = \frac{((1 \times 4,784) - 4,79)}{4,79} \times 100 = -0,13 \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$



Şekil 6.3 Oran testi devre şeması (Omicron,2002)

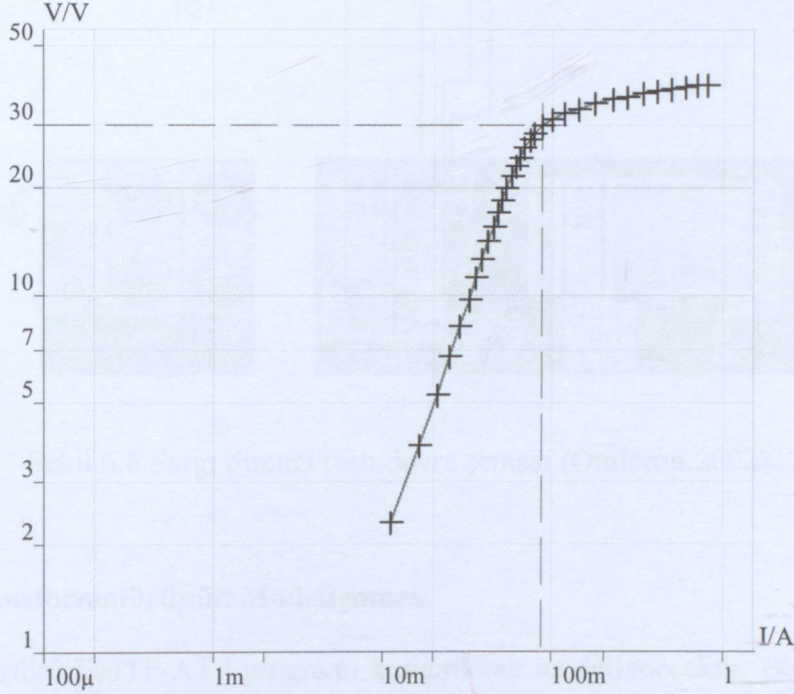
6.2.2 Akım Transformatörü Uyartım Eğrisi (Excitation) Testi



Şekil 6.4 Uyartım eğrisi testi devre şeması (Omicron,2002)

Uyartım eğrisi; akım transformatörünün primeri açık devre iken, sekonder devreye gerilim uygulanarak, yine sekonderden geçen akımın ölçülmesi ile elde edilir. IEC standartlarına göre diz noktası, gerilimin %10 artışıında akımda %50 artışın meydana geldiği noktadır. Test sırasında kullanılan devre Şekil 6.4 'de verilmiştir.

Yapılan test sonucu elde edilen eğri Şekil 6.5 'de verilmiştir.



Şekil 6.5 Akım transformatörü uyartım eğrisi

Test sonucu elde edilen eğride de görülen diz noktası;

$$V_{diz} = 29,98 \text{ V}$$

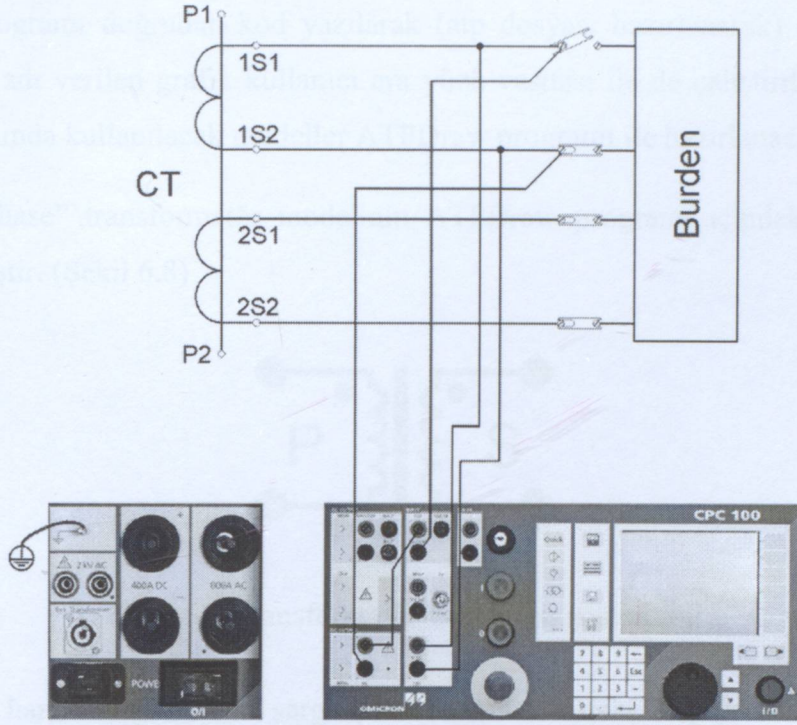
$$I_{diz} = 86,767 \text{ mA} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

6.2.3 Akım Transformatörü Sekonder Sargı Direnci Testi

Akım transformatörünün primeri açık devre iken, sekondere uygulanan DC akım, sekonderde gerilim oluşmasına neden olur. Uygulanan akım ile elde edilen gerilim değerlerine göre, akım transformatörünün sargı direnci tespit edilir. Kullanılan test devresi Şekil 6.6 'da verilmiştir.

Yapılan deney sonucu akım transformatörünün sekonder sargı direnci değeri;

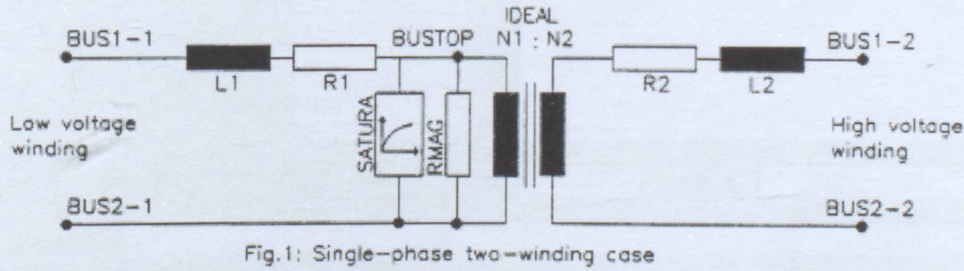
$$R_s = 124,87 \text{ m}\Omega \text{ olarak bulunmuştur.}$$



Şekil 6.6 Sargı direnci testi devre şeması (Omicron,2002)

6.3 Akım Transformatörünün Modellenmesi

Akım transformatörü EMTP-ATP programı kullanılarak modellenenecektir. Bu amaçla EMTP-ATP içerisinde bulunan “saturable 1 phase” transformatör modeli kullanılacaktır. Bu modelin kullandığı akım transformatörü eşdeğer devresi Şekil 6.7 de verilmiştir.

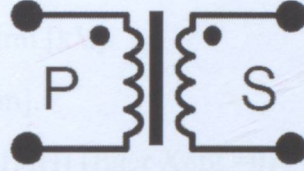


Şekil 6.7 Akım transformatörü eşdeğer devresi (ATP, RB-04E)

Şekil 6.7’ de görüldüğü üzere, bu modelde manyetik kol birinci sargıda (winding 1 – low voltage winding) bulunmaktadır. Akım transformatörleri manyetik kolları sekonder sargıda bulunacak şekilde modellendikleri için EMTP-ATP modelinin birinci sargısı sekonder, ikinci sargısı ise primer sargı olarak kullanılacaktır.

EMTP-ATP programı doğrudan kod yazılarak (atp dosyası hazırlanarak) çalıştırılabileceği gibi ATPDraw adı verilen grafik kullanıcı ara yüzü vasıtası ile de çalıştırılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılacak modeller ATPDraw programı ile hazırlanacaktır.

“Saturable 1 phase” transformatör modelinin ATPDraw programı içindeki gösterim şekli aşağıda verilmiştir. (Şekil 6.8)



Şekil 6.8 Transformatör modelinin gösterilimi

Bu modelde P harfi ile gösterilen sargı Şekil 6.7’deki birinci sargıya tekabül etmektedir. Dolayısıyla bu sargı sekonder sargıyı temsil etmektedir.

ATPDraw programında akım transformatörü modeli için kullanılan parametreler ve açıklamaları aşağıda verilmiştir. (Şekil 6.9)

Component: TRAFO_S

Attributes | Characteristic

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Io	Volts	0	P1	1	SEC
Fo	Vs	0	P2	1	
Rmag	Ohms	0	S1	1	PRI
Rp	Ohms	0.125	S2	1	
Lp	Ohm	0			
Vrp	kV	1			
Rs	Ohms	0			
Ls	Ohm	1E-7			

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output: 3 - Current&Voltage

Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Şekil 6.9 ATPDraw akım transformatörü veri giriş ekranı

I_0 = Kararlı haldeki (steady state) manyetik branş (MB) üzerindeki akım [A]

F_0 = Kararlı haldeki MB izerindeki akı [Wb-turn]

R_{mag} = MB' deki direnç [ohm].

R_p = Primer sargı direnci [ohm].

L_p = Primer sargı endüktansı [mH] (Eğer $X_{opt.}=0$) ; [ohm] (Eğer $X_{opt.}$ = frekans)

V_{rp} = Primer sargı nominal gerilimi [kV].

R_s = Sekonder sargı direnci [ohm].

L_s = Sekonder sargı endüktansı [mH] (Eğer $X_{opt.}=0$) ; [ohm] (Eğer $X_{opt.}$ = frekans)

V_{rs} = Sekonder sargı nominal gerilimi [kV]..

RMS= Nonlineer karakteristik seçimi. (0 $\rightarrow$ Akım-akı, 1 $\rightarrow$ I_{rms}/U_{rms})

Akım transformatörleri normal çalışma koşullarında uyartım eğrilerinin doğrusal kısmında çalışırlar. Bu bölgede manyetik kol üzerinden geçen akım (kaçak akım) çok düşüktür. Akım transformatörü modellenirken kararlı haldeki kaçak akım ihmal edilmiştir. Dolayısıyla I_0 ve F_0 değerleri ihmal edilmiş ve simülasyonda sıfır olarak tanımlanmıştır. Aynı varsayım kullanılarak, R_{mag} değeri sonsuz kabul edilmiştir. Kullanılan modelde, R_{mag} değerinin sonsuz olduğunu ifade etmek üzere, ATP rulebook'da da belirtildiği üzere bu parametreye sıfır değeri atanmıştır.

Akım transformatörünün sekonder sargı empedansının belirlenmesi için modellenen akım transformatörü üzerinde ölçüm yapılması gerekmektedir. Akım transformatörü sekonder sargı endüktansı ihmal edilebilir düzeyde olduğu için, akım transformatöründe sadece sekonder sargı direnci ölçümü yapılmıştır. Yapılan test sonucu elde edilen değer simülasyonda kullanılmıştır.

Akım transformatörü primer sargı empedansı çok küçük olduğu için bu çalışma kapsamında ihmal edilmiştir. Ancak model gereği primer sargı empedansı sıfır girilemediğinden, 10^{-7} ohm olarak girilmiştir.

Modellenen akım transformatörü 5/5A oranında olduğu için transformatör oranını belirleyen primer ve sekonder nominal sargı gerilimleri (V_{rp} , V_{rs}) eşit değerlerde girilmiştir.

Akım transformatörü manyetik kolunun modellenmesi için en sağlıklı yol akım-akı bilgilerinin girilmesidir. Bu sebeple, ilgili parametre (RMS) buna imkan verecek şekilde

seçilmiştir.

Çizelge 6.2’de modelleme için kullanılan parametreler verilmiştir.

Çizelge 6.2 Saturable transformatör ATPDraw verileri

Io	0	Vrp	1
Fo	0	Rs	0
Rmag	0	Ls	1E-7
Rp	0,125	Vrs	1
Lp	0	RMS	0

Akım transformatörü modelinin sağlıklı çalışabilmesi için, öncelikle saturasyon eğrisinin doğru olarak tanımlanması gerekmektedir. ATPDraw programında akım transformatörü uyarma eğrisi modellenirken en fazla on nokta tanımlanabilmektedir. Uyarma eğrisi testinde elde ettiğimiz akım ve gerilim noktalarından diz noktası çevresinde yedi tane, eğrinin doğrusal kısmının başlangıcından bir tane ve eğrinin saturasyon bölgesinin sonlarından da iki tane nokta seçilmiştir. Seçilen noktalar Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3 Saturasyon eğrisi akım-gerilim verileri

V (rms)	I (rms)
2,32 V	11,26 mA
27,22 V	72,52 mA
28,61 V	78,46 mA
29,95 V	86,46 mA
31,23 V	98,23 mA
32,39 V	116,14 mA
33,45 V	142,13 mA
34,41 V	177,24 mA
38,85 V	701,79 mA
39,14 V	806,76 mA

Seçilen noktaların EMTP-ATP modelinde kullanılabilmesi için akım-akı eğrisi olarak tanımlanmaları gerekmektedir. Akım-gerilim eğrilerinin akım-akı eğrisine dönüştürülmesi için EMTP-ATP içerisinde mevcut olan “Saturation” rutini kullanılmaktadır. Bu amaçla seçilen noktalar kullanılarak Şekil 6.10’da verilen “satcurve.atp” dosyası oluşturulmuştur.


```

                                satcurve.atp
BEGIN NEW DATA CASE
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
SATURATION
50.    .001    1.E-6    1    0
      0.01126      2.32
      0.07252      27.22
      0.07846      28.61
      0.08646      29.95
      0.09823      31.23
      0.11614      32.39
      0.14213      33.45
      0.17724      34.41
      0.70179      38.85
      0.80676      39.14
      9999
C
$PUNCH, SATCURVE.pch
BLANK LINE
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK LINE ENDING ALL CASES

```

Şekil 6.10 Akım transformatörü saturasyon eğrisi atp dosyası verileri

Oluşturulan bu dosya çalıştırılarak akım-akı değerlerini içeren ve Şekil 6.11’de sunulan “satcurve.pch” dosyası elde edilmiştir.

```

                                SATCURVE.PCH
C <++++> Cards punched by support routine on 26-Aug-09 01.06.04 <++++>
C SATURATION
C 50.    .001    1.E-6    1    0
C      0.01126      2.32
C      0.07252      27.22
C      0.07846      28.61
C      0.08646      29.95
C      0.09823      31.23
C      0.11614      32.39
C      0.14213      33.45
C      0.17724      34.41
C      0.70179      38.85
C      0.80676      39.14
C      9999
C 1.59240447E-02 1.04436693E-02
C 1.00268733E-01 1.22533051E-01
C 1.18852928E-01 1.28790249E-01
C 1.38212204E-01 1.34822368E-01
C 1.71094807E-01 1.40584393E-01
C 2.23232720E-01 1.45806227E-01
C 2.95680821E-01 1.50577904E-01
C 3.90597485E-01 1.54899422E-01
C 1.60592187E+00 1.74886444E-01
C 2.19542910E+00 1.76191903E-01
C      9999

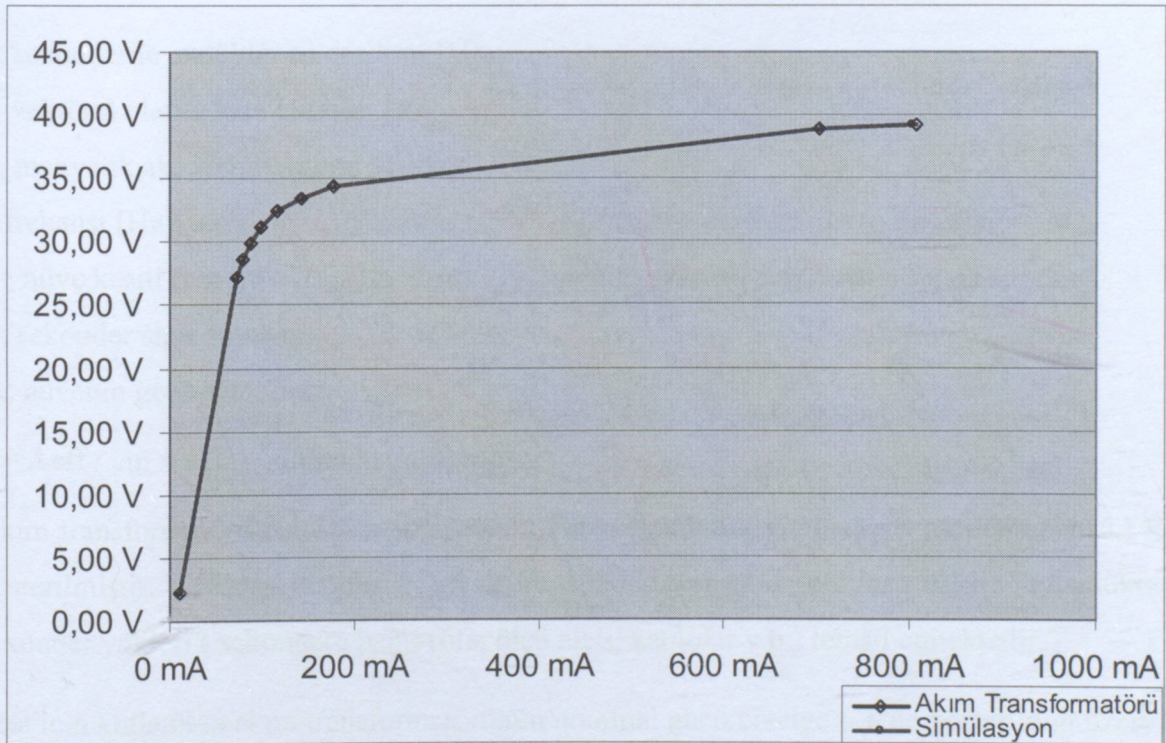
```

Şekil 6.11 Akım transformatörü saturasyon eğrisi punch dosyası verileri

Elde edilen akım-akı verilerinin ATPDraw modeline girilmesi ile akım transformatörü manyetik kolu modellenmiş olur.

Çizelge 6.4 Akım transformatörü saturasyon eğrisi noktaları

DOYMA						
CT DATA		Laboratuar Ortamında Elde Edilen Veriler		Gerilimin Tepe Değeri	Simülasyon Sonucu Elde Edilen Veriler	%Hata
		No	Vrms	Irms	V peak	
1		2,32 V	11,26 mA	3,28 V	11,25 mA	-% 0,05
2		27,22 V	72,52 mA	38,49 V	72,51 mA	-% 0,01
3		28,61 V	78,46 mA	40,46 V	78,46 mA	% 0,00
4		29,95 V	86,46 mA	42,36 V	86,48 mA	% 0,02
5		31,23 V	98,23 mA	44,17 V	98,26 mA	% 0,03
6		32,39 V	116,14 mA	45,81 V	116,17 mA	% 0,03
7		33,45 V	142,13 mA	47,31 V	142,19 mA	% 0,04
8		34,41 V	177,24 mA	48,66 V	177,08 mA	-% 0,09
9		38,85 V	701,79 mA	54,94 V	701,67 mA	-% 0,02
10		39,14 V	806,76 mA	55,35 V	802,48 mA	-% 0,53



Şekil 6.13 Akım transformatörü saturasyon eğrileri karşılaştırması

Şekil 6.13 üzerinden de görüleceği üzere, deneysel çalışmalarda elde edilen saturasyon eğrisi ile simülasyon neticesinde elde edilen eğriler birbiriyle örtüşmektedir. Bu sonuç akım transformatörü modelinin doğru çalıştığını göstermektedir.

6.4 Akım Transformatörü Performansının İncelenmesi

Bu bölümde, akım transformatörünün sinüsoidal olan ve olmayan şartlarda hata oranının tespiti için testler yapılacaktır. Testler öncelikle akım transformatörü EMTP-ATP üzerinde yapılacak, daha sonra gerçek akım transformatörü üzerinde tekrar edilerek sonuçlar karşılaştırılacaktır.

Akım transformatörünün vektörel akım hatası aşağıdaki bağıntılar kullanılarak bulunabilir;

$$F = \frac{\sqrt{2} \times E \times 10^8 \times 10^2}{2 \times \pi \times f \times q_E \times w \times \mu_g \times a_1} \quad (5.1)$$

$$E = \frac{2 \times \pi}{\sqrt{2}} \times f \times B \times q_E \times w \times 10^{-8} \quad (5.2)$$

$$F = \frac{B \times 10^{-8}}{\sqrt{2} \times a_1 \times \mu_g} \quad (5.3)$$

E; sekonderde endüklenen gerilimi [V],

F; vektörel olarak hata akımını [%],

B; manyetik akı yoğunluğunu [Tesla],

f; frekansı [Hz],

q_E; nüve kesiti [cm²],

w; sekonder sipir sayısını,

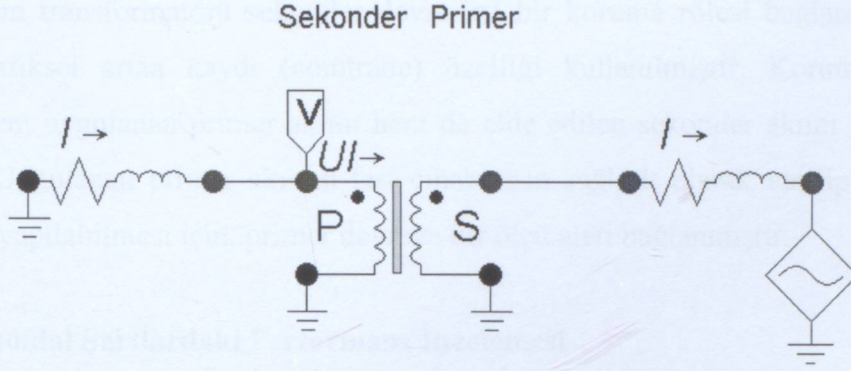
μ_g; nüvenin geçirgenliğini,

a₁= A_{eff} / cm = f (B) 'yi ifade etmektedir.

Akım transformatörü hatalarını incelemek için kullanılacak simülasyon modeli şekil 6.14'de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, sekonder kısımda bulunan direnç ve endüktans, sekonder yükleri (sekondere bağlı röle, ölçü aleti, kablolar v.b.) temsil etmektedir.

Test için kullanılan akım transformatörünün nominal gücü çizelge 6.1'de gösterildiği üzere 15 VA değerindedir. Kullanılan akım transformatörünün gücünün 15 VA ve nominal akımının 5 A olması sebebiyle nominal yük empedansı 0,6 Ω olacak şekilde; R=0,37Ω ve X_L=0,47Ω olarak girilmiştir. Ölçüm sırasında kullanılan kablo direnci küçük olduğu için ihmal edilmiştir.

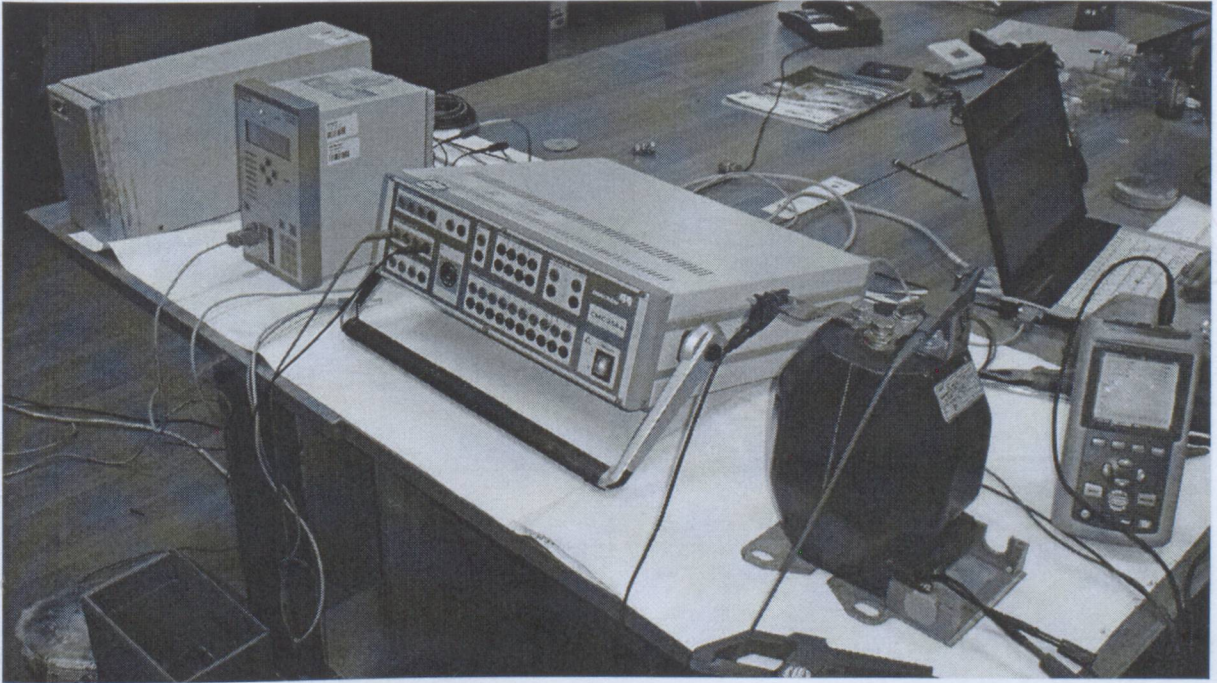
Primer kısımda bulunan direnç ve endüktans ise, primer devreye ait yükleri tanımlamada kullanılır. Bu yükler simülasyon sırasında ihmal edilmiştir.



Şekil 6.14 Akım transformatörü hata tespiti simülasyon modeli

Akım transformatörünün performansı incelenirken akım transformatörü bilek noktası ile diz bölgesi arasında çalıştırılacaktır. Ancak simülasyonlarda sinüsoidal olmayan şartlar inceleneceğinden doyma bölgesi de dikkate alınacaktır.

Simülasyon sırasında akım transformatörünün primerine uygulanan akım değerleri IEEE Comtrade dosyası olarak kaydedilip bir sekonder test cihazı yardımı ile gerçek akım transformatörüne uygulanacaktır. Bu amaçla kullanılan test devresi Şekil 6.15'de gösterilmiştir.

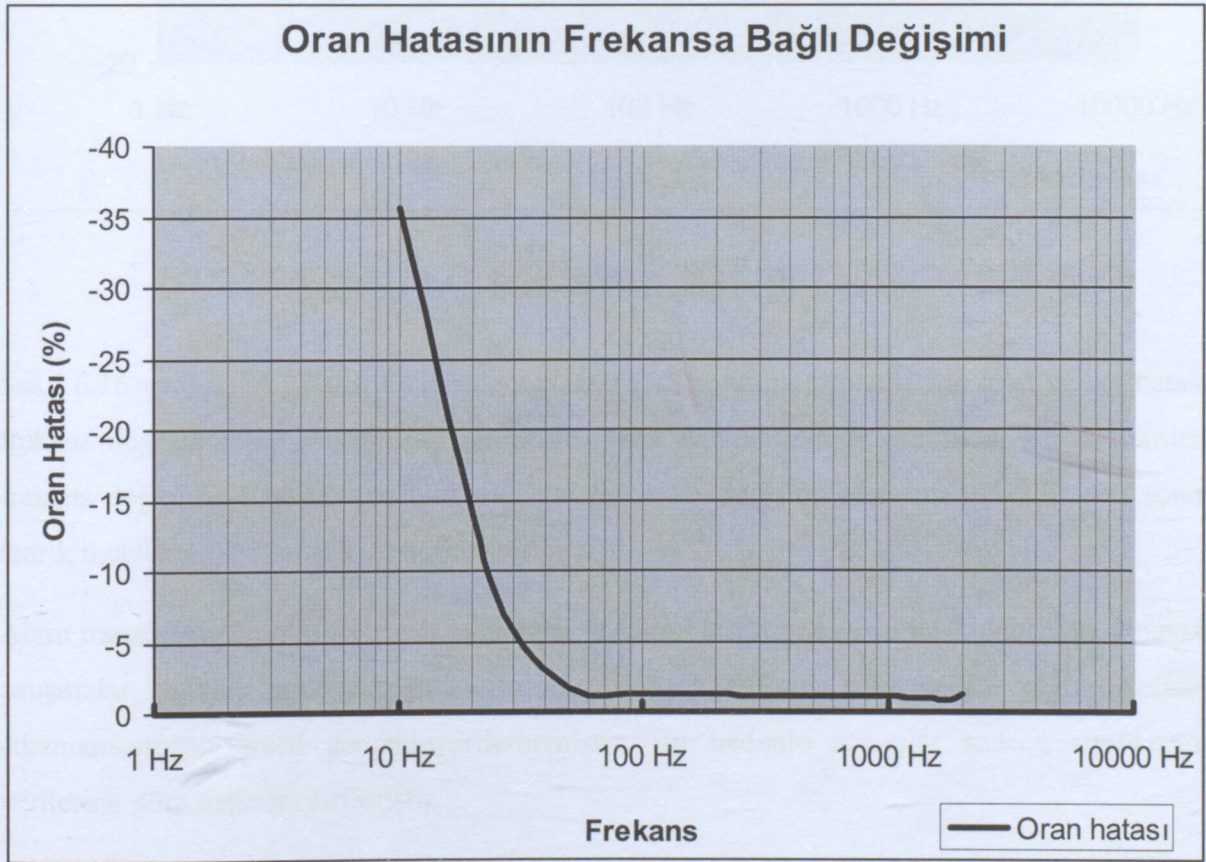


Şekil 6.15 Akım transformatörü deneyinde kullanılan test devresi

Sekonder test cihazından uygulanan primer akımın oluşturduğu sekonder akımı ölçmek amacıyla akım transformatörü sekonder devresine bir koruma rölesi bağlanmış ve koruma rölesinin grafiksel arıza kaydı (comtrade) özelliği kullanılmıştır. Koruma rölesi akım bağlantısı, hem uygulanan primer akımı hem de elde edilen sekonder akımı verecek şekilde yapılmıştır. Uygulanan primer akımın test cihazından sağlıklı olarak verilir verilemediğinin kontrolünün yapılabilmesi için, primer devreye bir ölçü aleti bağlanmıştır.

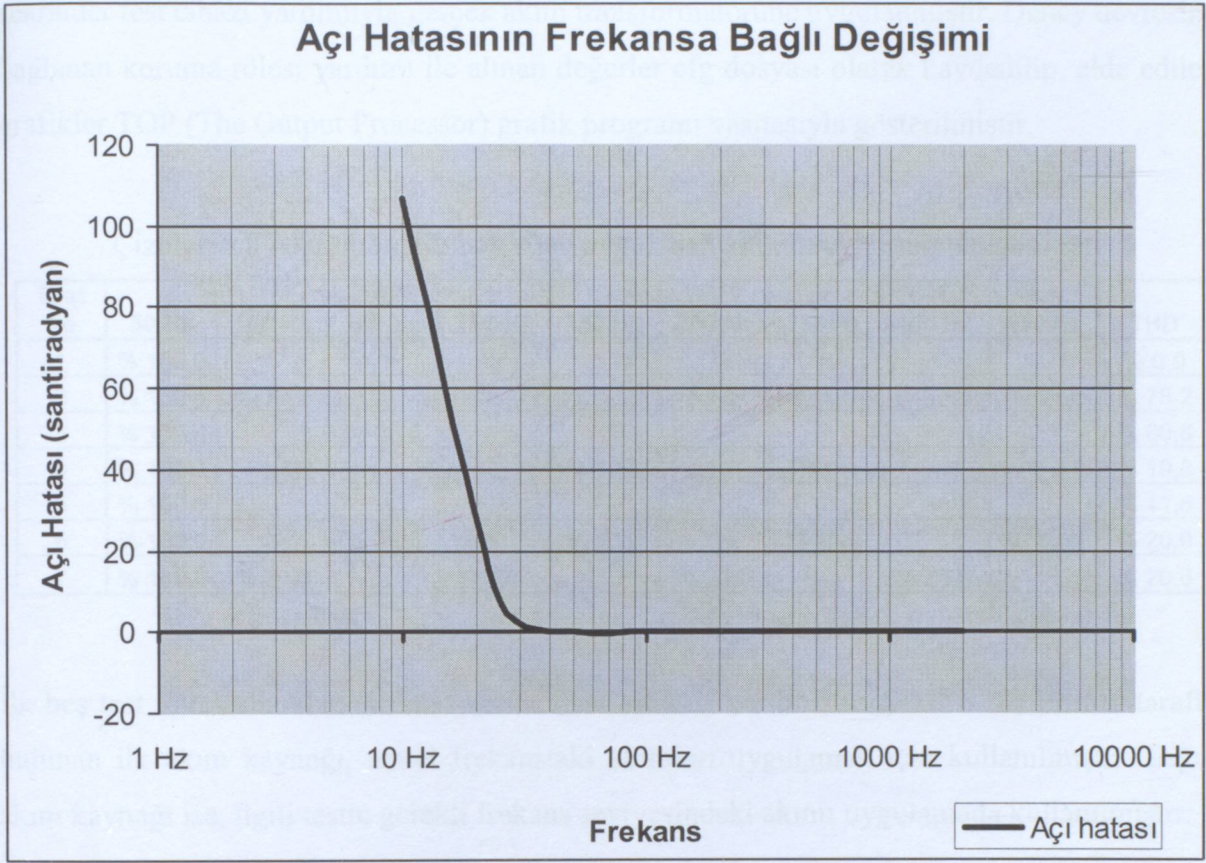
6.4.1 Sinüsoidal Şartlardaki Performans İncelemesi

Akım transformatörü modeline hassasiyet sınır faktörü ($n=10I_n$) değerinde akım uygulanıp, frekans değerini değiştirerek oran hatasının frekansa bağlı değişimi tespit edilmiştir. Yapılan simülasyonların sonucu Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.16 Oran hatasının frekansa bağlı değişimi

Akım transformatörüne hassasiyet sınır faktörü değerinde akım uygulanıp, frekans değerini değiştirerek açı hatasının frekansa bağlı değişimi tespit edilmiştir. Yapılan simülasyonların sonucu Şekil 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.17 Açı hatasının frekansa bağlı değişimi

Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'den de görüleceği üzere, akım transformatöründe oran ve açı hatası, frekans değeri nominal değerinin altına düştükçe önemli ölçüde artmakta, ancak nominal frekans değerinin üzerine çıkıldıkça kayda değer bir değişim göstermemektedir. Bu sonuç teorik inceleme ile tutarlılık göstermektedir.

Akım transformatörünün frekansa bağlı hata değişimi tespitinde yapılması planlanan deneysel çalışmalar, seçilen sekonder test cihazının istenen frekans seviyelerine sağlıklı olarak çıkamamasından ötürü gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle sonuçlar sadece simülasyon verilerine göre değerlendirilmiştir.

6.4.2 Sinüsoidal Olmayan Şartlardaki Performans İncelemesi

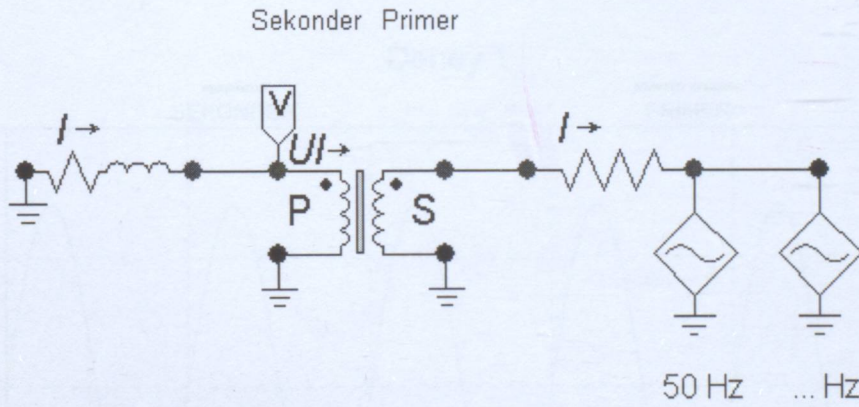
Akım transformatörünün sinüsoidal olmayan şartlardaki performansının incelenmesini sağlamak amacıyla, akım transformatörü modeline Çizelge 6.5'de belirtilen içeriğe sahip nominal primer akım dalgaları uygulanmıştır. Öncelikle çalışmalar simülasyon modeli üzerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen grafikler PlotXY grafik programı vasıtası ile gösterilmiştir. Daha sonra aynı içerikteki primer akımlar IEEE Comtrade formatında,

sekonder test cihazı yardımıyla gerçek akım transformatörüne uygulanmıştır. Deney devresine bağlanan koruma rölesi yardımı ile alınan değerler cfg dosyası olarak kaydedilip, elde edilen grafikler TOP (The Output Processor) grafik programı vasıtasıyla gösterilmiştir.

Çizelge 6.5 Akım transformatörüne uygulanan akımların harmonik içerikleri

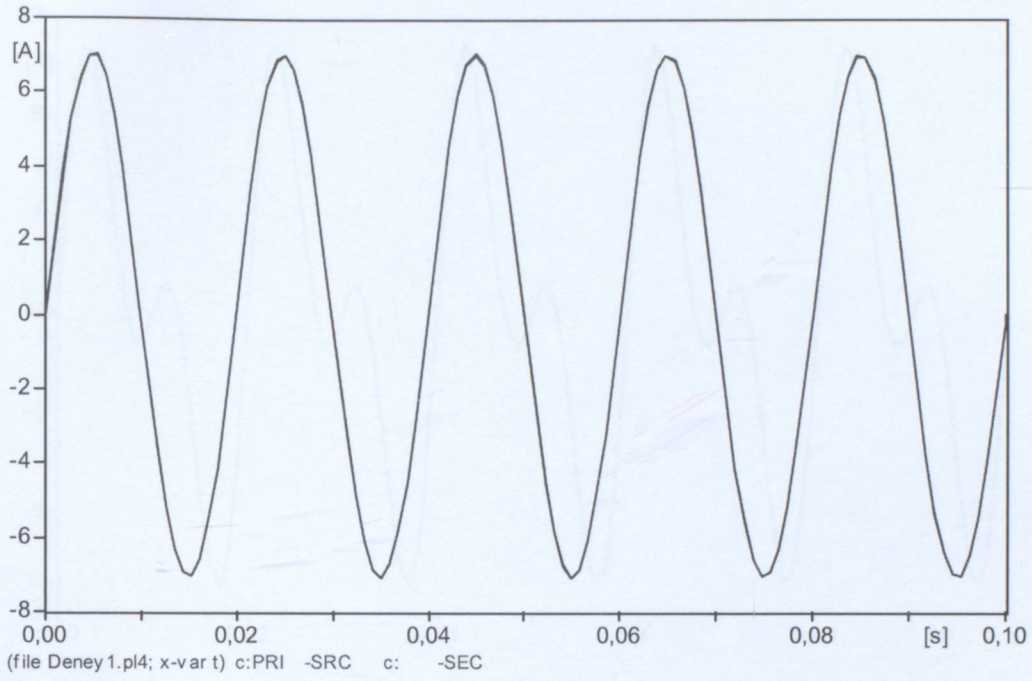
Test No	50 Hz	100 Hz	150 Hz	200 Hz	250 Hz	300 Hz	350 Hz	400 Hz	450 Hz	THD
1	% 100,0									% 0,0
2	% 100,0	% 78,2								% 78,2
3	% 100,0		% 60,8							% 60,8
4	% 100,0				% 19,8					% 19,8
5	% 100,0						% 11,5			% 11,5
6	% 100,0		% 20,0		% 20,0		% 20,0		% 20,0	% 20,0
7	% 100,0	% 20,0		% 20,0		% 20,0		% 20,0		% 20,0

İlk beş test için kullanılan simülasyon devresi aşağıda verilmiştir.(Şekil 6.18) Primer tarafta bulunan ilk akım kaynağı, temel frekanstaki akımları uygulamak için kullanılmıştır. Diğer akım kaynağı ise, ilgili testte gerekli frekans seviyesindeki akımı uygulamada kullanılmıştır.

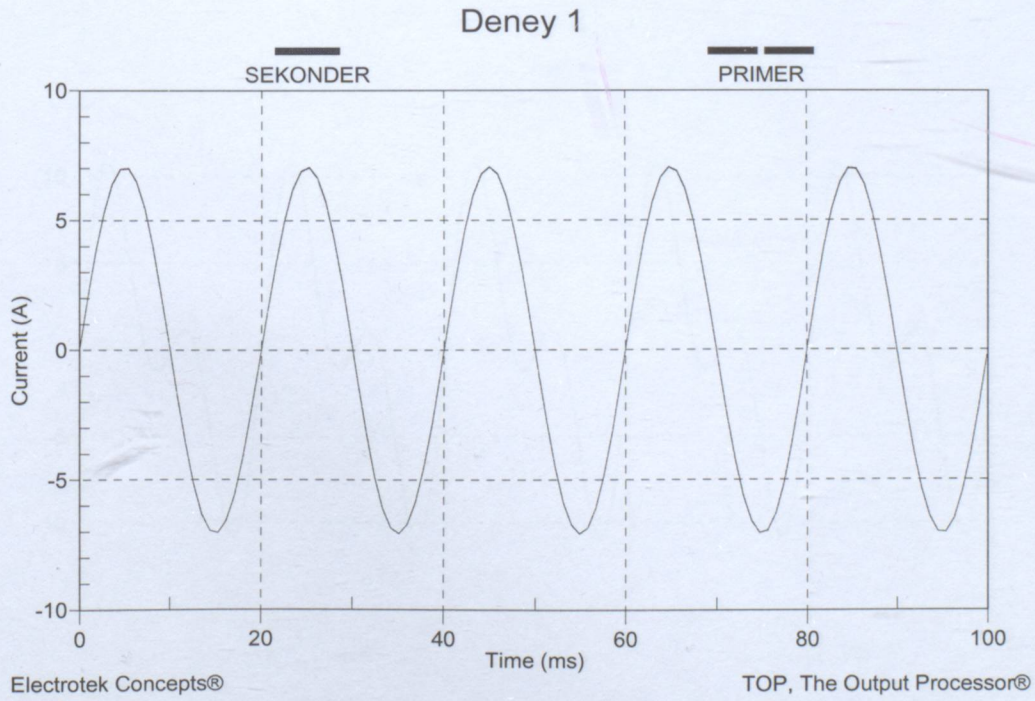


Şekil 6.18 Test 1-Test 5 için kullanılan simülasyon devresi

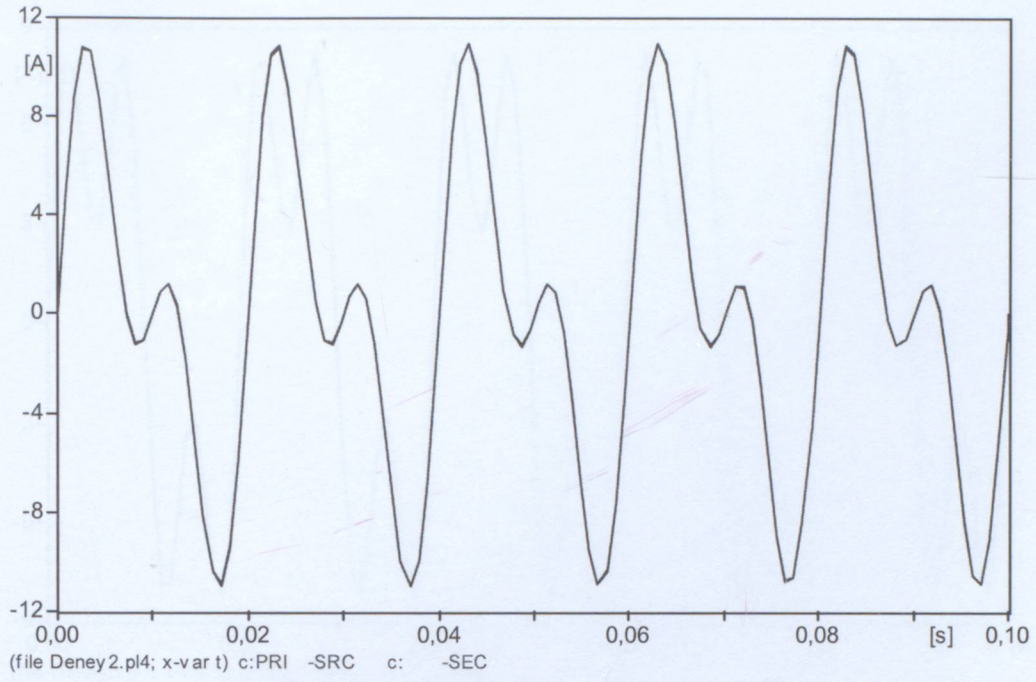
Yapılan çalışmalar neticesinde, simülasyonlardan elde edilen primer-sekonder akım grafikleriyle gerçek akım transformatörüne uygulanan aynı değerdeki akımlardan elde edilen primer-sekonder akım grafikleri aşağıda sunulmuştur.



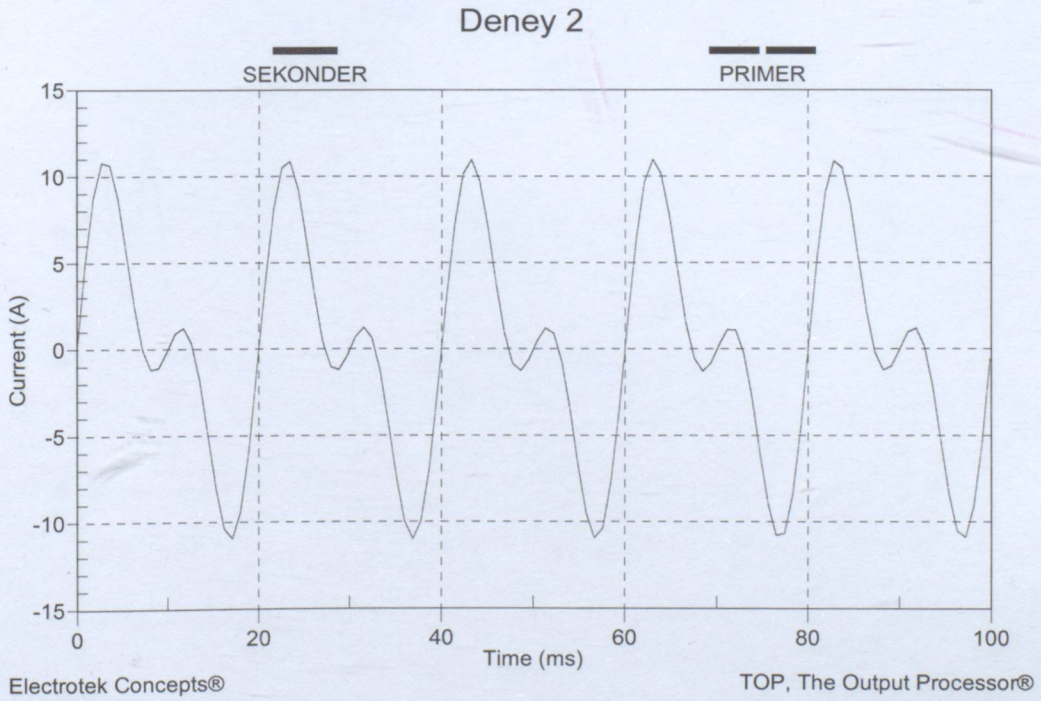
Şekil 6.19 Simülasyon 1 sonuçları



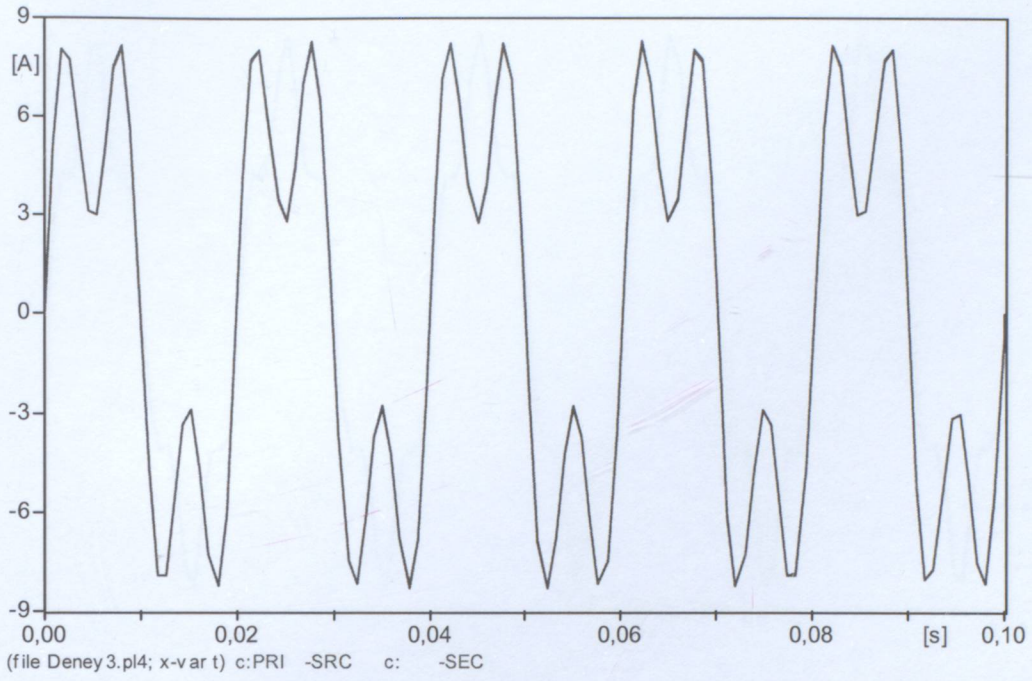
Şekil 6.20 Deney 1 sonuçları



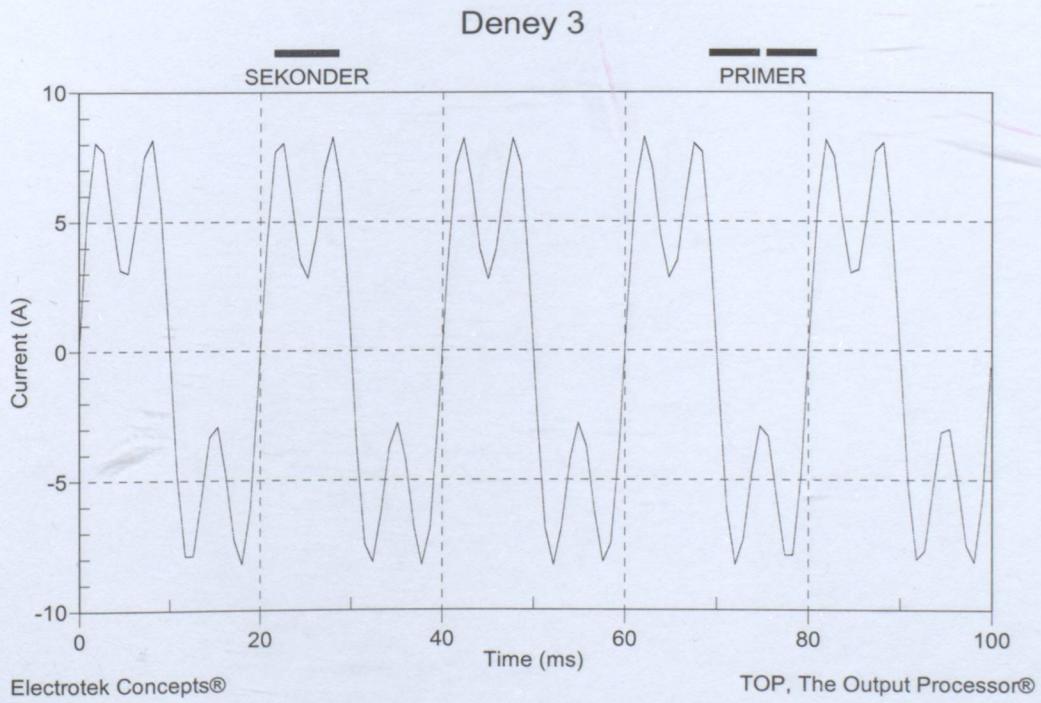
Şekil 6.21 Simülasyon 2 sonuçları



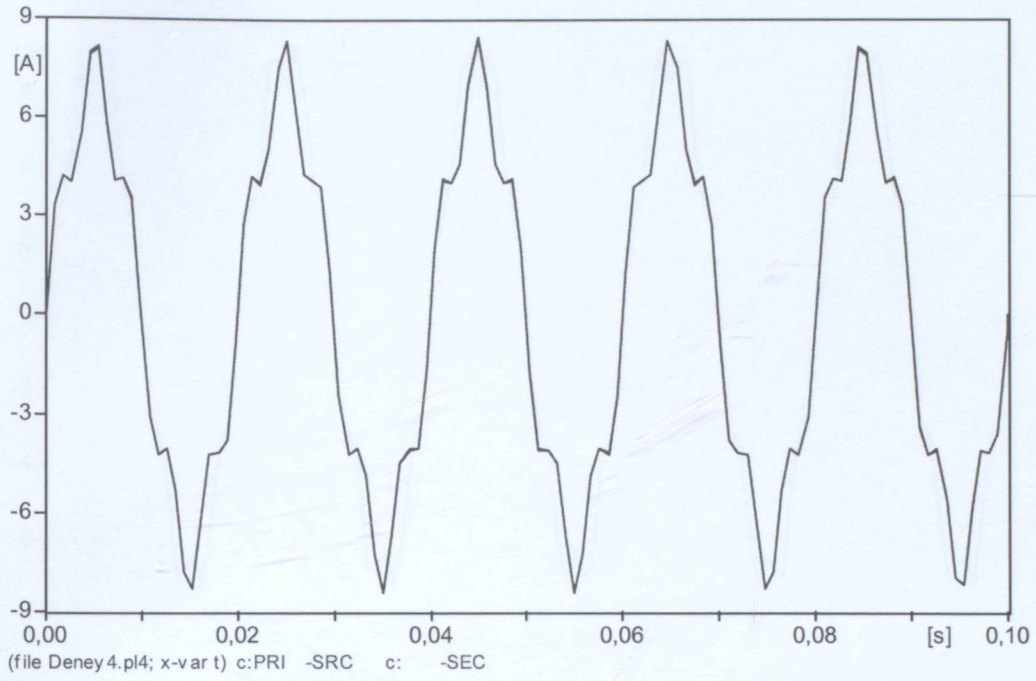
Şekil 6.22 Deney 2 sonuçları



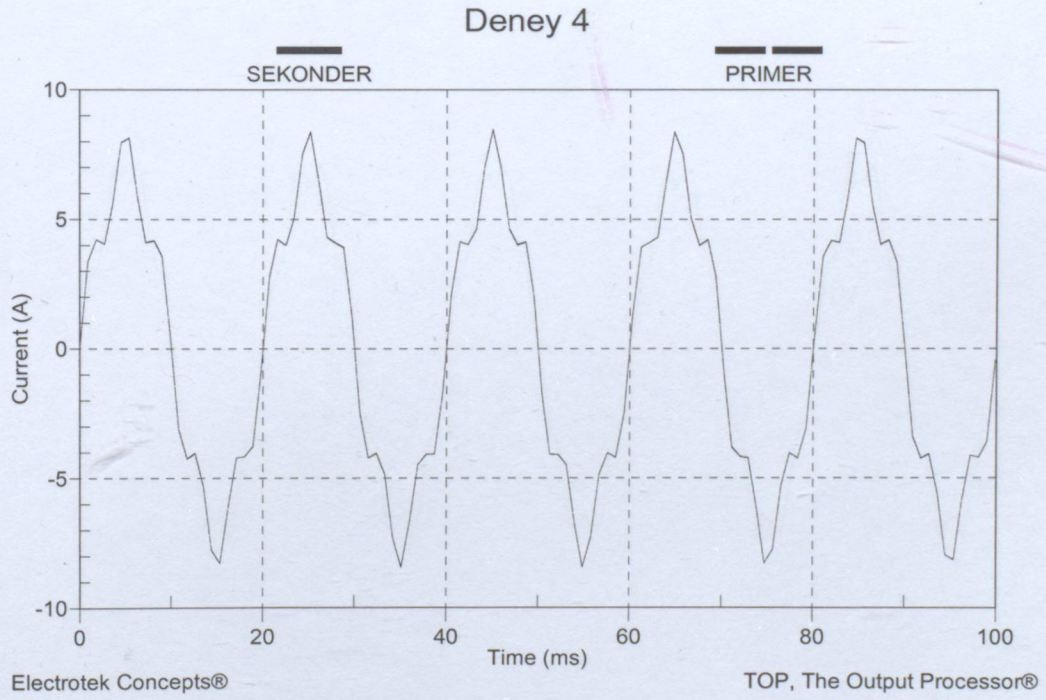
Şekil 6.23 Simülasyon 3 sonuçları



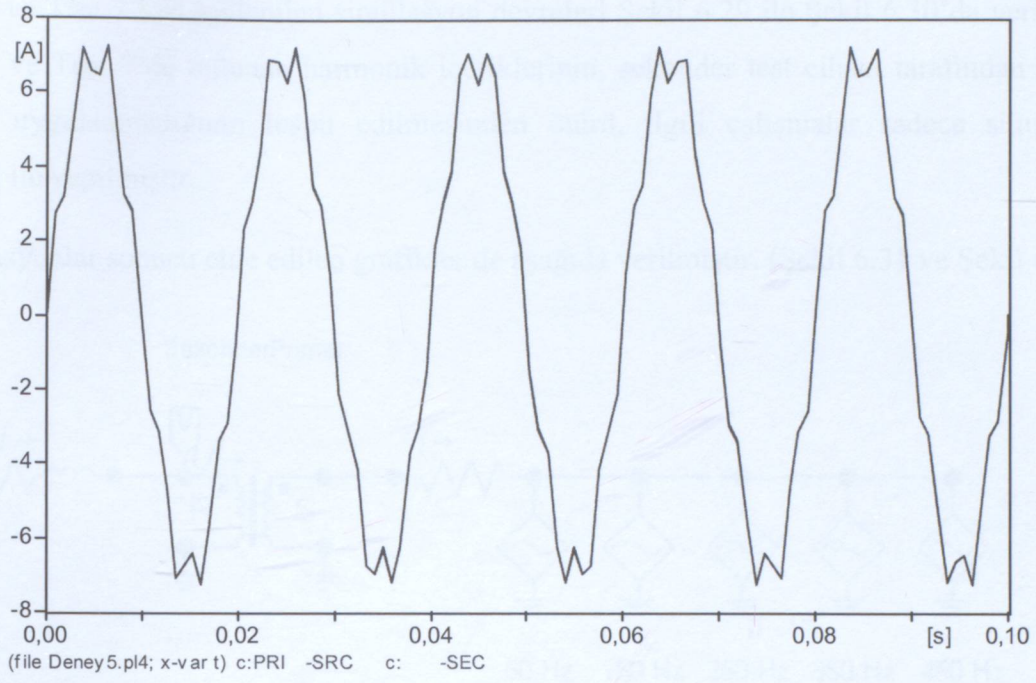
Şekil 6.24 Deney 3 sonuçları



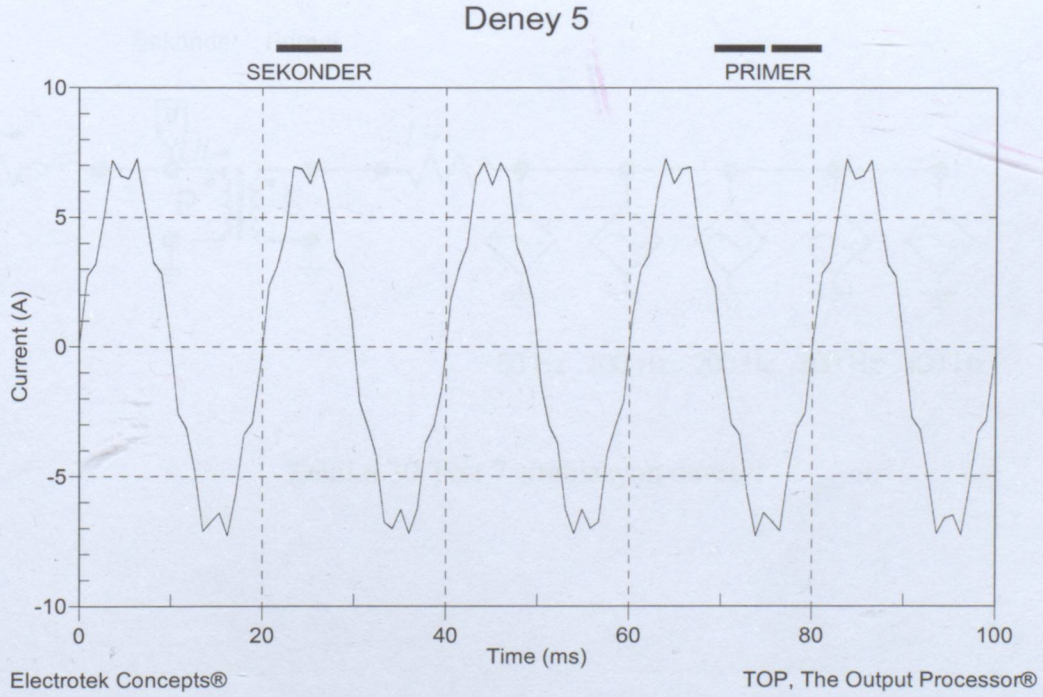
Şekil 6.25 Simülasyon 4 sonuçları



Şekil 6.26 Deney 4 sonuçları



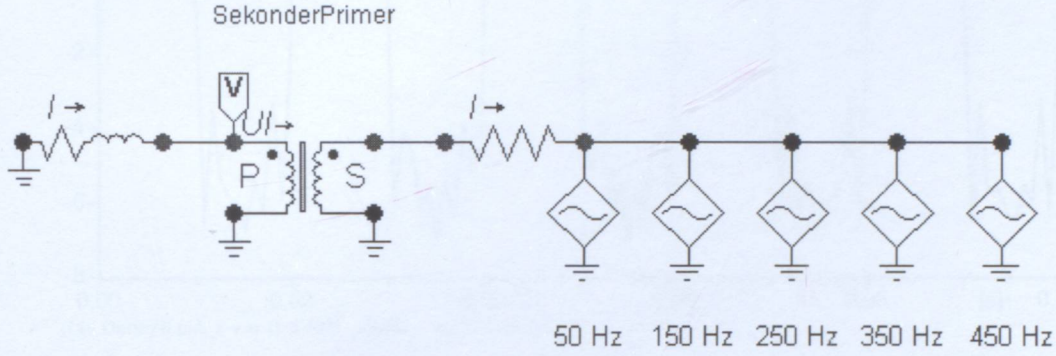
Şekil 6.27 Simülasyon 5 sonuçları



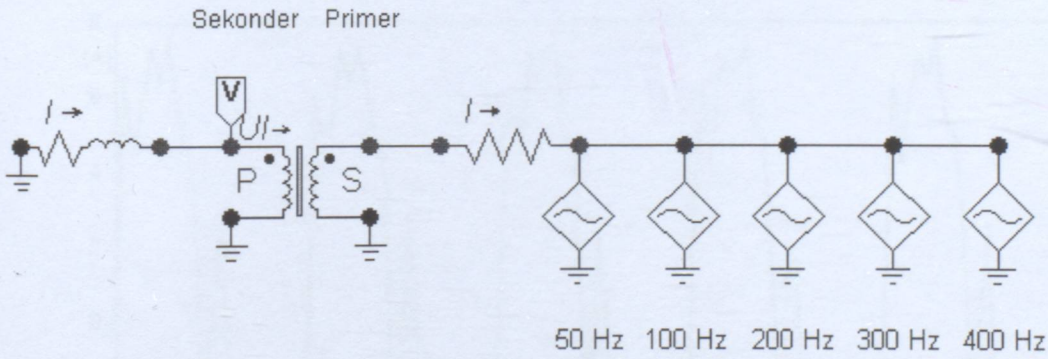
Şekil 6.28 Deney 5 sonuçları

Test 6 ve Test 7 için kullanılan simülasyon devreleri Şekil 6.29 ile Şekil 6.30'da verilmiştir. Test 6 ve Test 7'de bulunan harmonik içeriklerinin, sekonder test cihazı tarafından sağlıklı olarak uygulanmadığının tespit edilmesinden ötürü, ilgili çalışmalar sadece simülasyon modeli ile yapılmıştır.

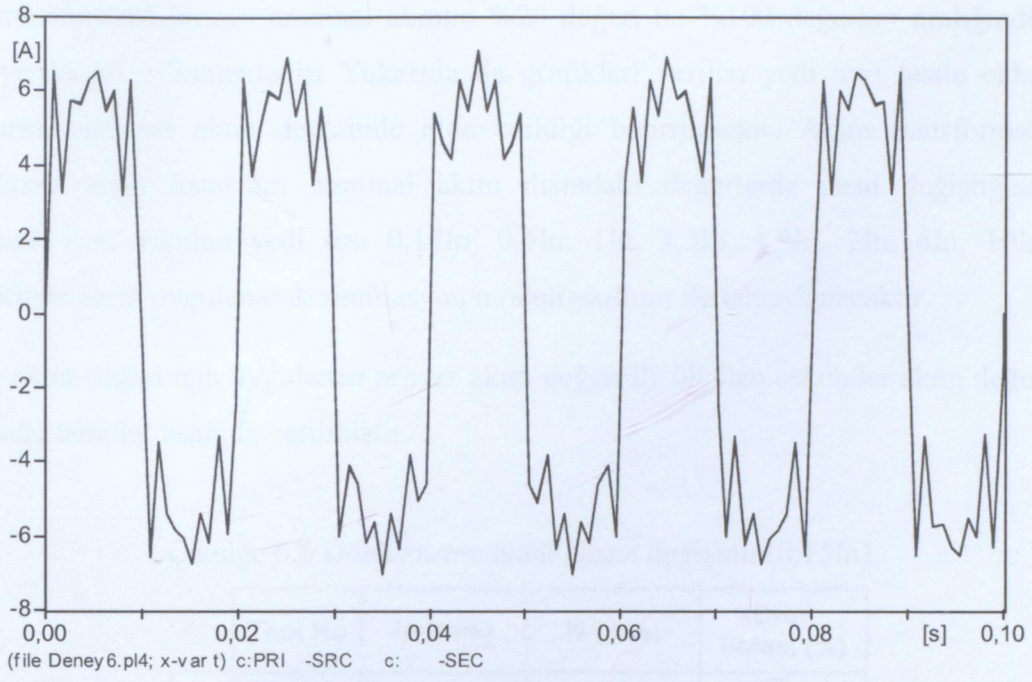
Simülasyonlar sonucu elde edilen grafikler de aşağıda verilmiştir. (Şekil 6.31 ve Şekil 6.32)



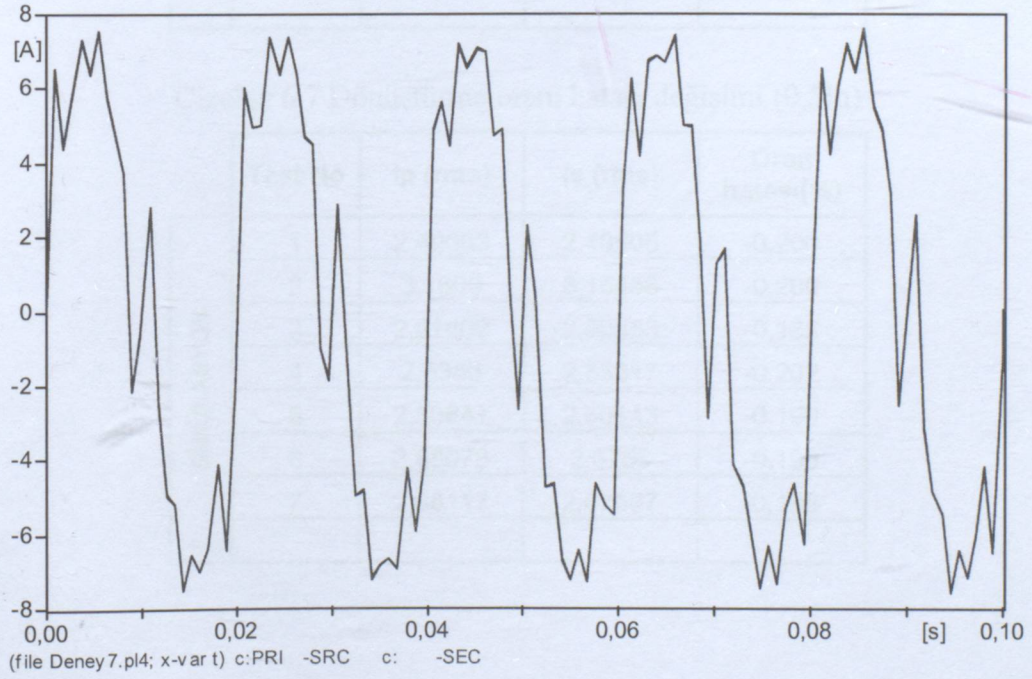
Şekil 6.29 Test 6 simülasyon devresi



Şekil 6.30 Test 7 simülasyon devresi



Şekil 6.31 Simülasyon 6 sonuçları



Şekil 6.32 Simülasyon 7 sonuçları

Akım transformatörlerinin nominal akımın %20 değeri ile %100 değerleri aralığında doğru sonuç verdikleri bilinmektedir. Yukarıda da grafikleri verilen yedi ayrı testte elde edilen sonuçların, nominal akım değerinde elde edildiği belirtilmiştir. Akım transformatörünün dönüştürme oranı hatasının nominal akım dışındaki değerlerde nasıl değiştiğini tespit edebilmek için, yapılan yedi test $0,15I_n$, $0,5I_n$, $1I_n$, $1,3I_n$, $1,5I_n$, $2I_n$, $6I_n$, $10I_n$, $20I_n$ değerlerinde akım uygulanarak simülasyon modeli yardımı ile tekrarlanacaktır.

Her bir akım değeri için uygulanan primer akım değeri ile ölçülen sekonder akım değerlerinin bulunduğu tablolar aşağıda verilmiştir.

Çizelge 6.6 Dönüştürme oranı hatası değişimi ($0,15I_n$)

	Test No	I_p (rms)	I_s (rms)	Oran hatası (%)
SİMÜLASYON	1	0,747011	0,74531	-0,228
	2	0,948271	0,94611	-0,228
	3	0,874206	0,87221	-0,228
	4	0,761491	0,75975	-0,228
	5	0,751923	0,75021	-0,228
	6	0,804234	0,802397	-0,228
	7	0,804349	0,802513	-0,228

Çizelge 6.7 Dönüştürme oranı hatası değişimi ($0,5I_n$)

	Test No	I_p (rms)	I_s (rms)	Oran hatası (%)
SİMÜLASYON	1	2,49003	2,48505	-0,200
	2	3,1609	3,15458	-0,200
	3	2,91402	2,90853	-0,188
	4	2,5383	2,53317	-0,202
	5	2,50641	2,50143	-0,199
	6	2,68078	2,6756	-0,193
	7	2,68117	2,67587	-0,198

Çizelge 6.8 Dönüştürme oranı hatası değişimi (1In)

	Test No	Ip (rms) (A)	Is (rms) (A)	Oran Hatası (%)
SIMÜLASYON	1	4,98007	4,97185	-0,165
	2	6,32181	6,31132	-0,166
	3	5,82804	5,81896	-0,156
	4	5,07661	5,06834	-0,163
	5	5,01276	5,00453	-0,164
	6	5,36156	5,35288	-0,162
	7	5,36234	5,3534	-0,167

Çizelge 6.9 Dönüştürme oranı hatası değişimi (1,3In)

	Test No	Ip (rms)	Is (rms)	Oran hatası(%)
SIMÜLASYON	1	6,4741	6,46416	-0,154
	2	8,21836	8,20538	-0,158
	3	7,57645	7,56532	-0,147
	4	6,59959	6,58936	-0,155
	5	6,51667	6,50654	-0,155
	6	6,97004	6,95955	-0,151
	7	6,97104	6,96023	-0,155

Çizelge 6.10 Dönüştürme oranı hatası değişimi (1,5In)

	Test No	Ip (rms)	Is (rms)	Oran hatası(%)
SIMÜLASYON	1	7,47011	7,45884	-0,151
	2	9,48271	9,46825	-0,152
	3	8,74206	8,72962	-0,142
	4	7,61491	7,60345	-0,150
	5	7,51914	7,50801	-0,148
	6	8,04235	8,03065	-0,145
	7	8,0435	8,03148	-0,149

Çizelge 6.11 Dönüştürme oranı hatası değişimi (2In)

	Test No	Ip (rms)	Is (rms)	Oran hatası(%)
SİMÜLASYON	1	9,96012	9,94590	-0,143
	2	12,6436	12,62550	-0,143
	3	11,6561	11,64030	-0,136
	4	10,1532	10,13850	-0,145
	5	10,0255	10,01130	-0,142
	6	10,7231	10,7084	-0,137
	7	10,7247	10,7096	-0,141

Çizelge 6.12 Dönüştürme oranı hatası değişimi (6In)

	Test No	Ip (rms)	Is (rms)	Oran hatası(%)
SİMÜLASYON	1	29,8804	29,80410	-0,255
	2	37,9309	37,63660	-0,776
	3	34,9682	34,40490	-1,611
	4	30,4596	30,36640	-0,306
	5	30,0766	29,98650	-0,300
	6	32,1694	31,8561	-0,974
	7	32,174	32,0237	-0,467

Çizelge 6.13 Dönüştürme oranı hatası değişimi (10In)

	Test No	Ip (rms)	Is (rms)	Oran hatası(%)
SİMÜLASYON	1	49,8007	48,27950	-3,055
	2	63,2181	60,21440	-4,751
	3	58,2804	55,13530	-5,396
	4	50,7661	49,13870	-3,206
	5	50,1276	48,55020	-3,147
	6	53,6157	51,446	-4,047
	7	53,6234	51,7829	-3,432

Çizelge 6.14 Dönüştürme oranı hatası değişimi (20In)

	Test No	Ip (rms)	Is (rms)	Oran hatası(%)
SİMÜLASYON	1	99,6015	84,42840	-15,234
	2	126,436	99,69970	-21,146
	3	116,561	96,33940	-17,349
	4	101,532	84,74320	-16,535
	5	100,255	84,97150	-15,245
	1	107,231	89,2528	-16,766
	2	107,247	89,2983	-16,736

6.5 Deney ile Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Nominal akımda yapılan gerçek testler neticesinde elde edilen dönüştürme oran hatası değerleri, simülasyon çalışmasında elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma tablosu Çizelge 6.15’de verilmiştir.

Çizelge 6.15 Test 1-Test 5 sonuçları karşılaştırma tablosu

	Test No	Ip (rms) (A)	Is (rms) (A)	Oran Hatası (%)
DENEY	1	4,98007	4,96857	-0,231
	2	6,32181	6,30752	-0,226
	3	5,82804	5,81533	-0,218
	4	5,07661	5,06493	-0,230
	5	5,01276	5,00113	-0,232
SİMÜLASYON	1	4,98007	4,97185	-0,165
	2	6,32181	6,31132	-0,166
	3	5,82804	5,81896	-0,156
	4	5,07661	5,06834	-0,163
	5	5,01276	5,00453	-0,164

Çizelge 6.15’den de görüleceği üzere, simülasyonlar sonucu elde edilen oran hatası değerleri ile testler sonucu elde edilen değerler birbirine çok yakındır. Arada oluşan fark, gerçek testler sırasında yapılan okuma hataları ile bağlanan yüklerin simülasyonda verilen değerleri tam olarak karşılayamamasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 6.16 Test 6 ve Test 7 sonuçları karşılaştırma tablosu

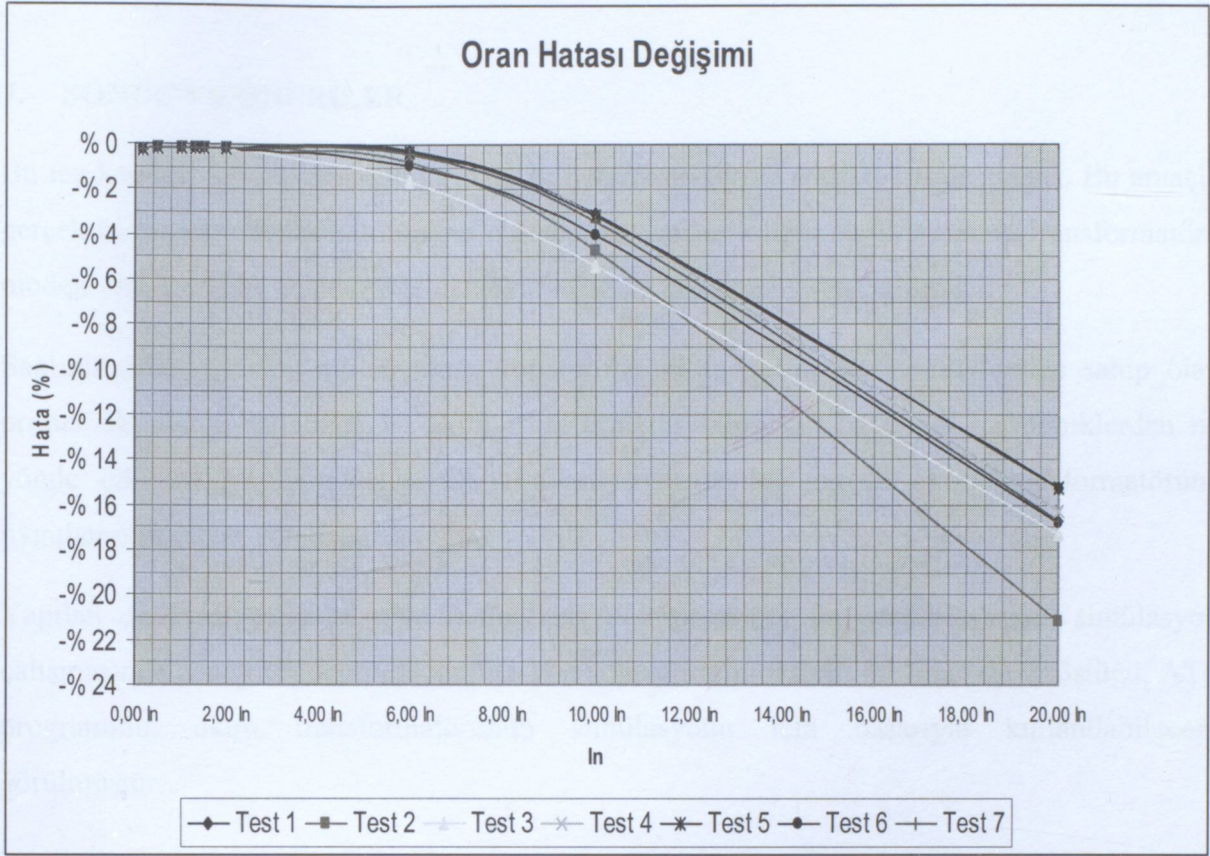
	Test No	Ip (rms) (A)	Is (rms) (A)	Oran Hatası (%)	THD (%)
SİMÜLASYON	7	5,36156	5,35288	-0,162	40
	8	5,36233	5,35340	-0,167	40

Çizelge 6.16'da da Test 6 ve Test 7 için elde edilen simülasyon sonuçlarına yer verilmiştir. Burada da görülüyor ki, primer akımın dalga şekli bozulmuş olmasına rağmen, akım transformatörünün çevirme oran hatasında çok büyük farklılıklar yaşanmamaktadır.

Nominal akımın farklı değerlerinde gerçekleştirilen simülasyonlar sonucu elde edilen dönüştürme oranı hatası sonuçları Çizelge 6.17'de ve Şekil 6.33'de verilmiştir.

Çizelge 6.17 Farklı akım değerlerinde dönüştürme oranı hatası sonuçları

	Oran Hatası (%)						
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7
0,15 In	-0,228	-0,228	-0,228	-0,228	-0,228	-0,228	-0,228
0,50 In	-0,200	-0,200	-0,188	-0,202	-0,199	-0,193	-0,198
1,00 In	-0,165	-0,166	-0,156	-0,163	-0,164	-0,162	-0,167
1,30 In	-0,154	-0,158	-0,147	-0,155	-0,155	-0,151	-0,155
1,50 In	-0,151	-0,152	-0,142	-0,150	-0,148	-0,145	-0,149
2,00 In	-0,143	-0,143	-0,136	-0,145	-0,142	-0,137	-0,141
6,00 In	-0,255	-0,766	-1,611	-0,306	-0,300	-0,974	-0,467
10,00 In	-3,055	-4,751	-5,396	-3,206	-3,147	-4,047	-3,432
20,00 In	-15,234	-21,146	-17,349	-16,245	-15,245	-16,766	-16,736



Şekil 6.33 Farklı akım değerlerindeki dönüştürme oranı hatası değişimi

Her bir test için gerçekleştirilen simülasyonlar neticesinde elde edilen sonuçlara bakıldığında, seçilen akım transformatörünün, nominal akımın 2 katından sonraki akım değerlerinde dönüştürme oranı hatasındaki değişimin gözle görülür bir şekilde arttığı görülmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında harmoniklerin akım transformatörlerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla gerçek bir akım transformatöründen elde edilen veriler kullanılarak bir akım transformatörü modeli oluşturulmuş ve bu modelin sağlıklı çalışıp çalışmadığı test edilmiştir.

Sağlıklı çalıştığı tespit edilen akım transformatörü modeline harmonik içeriğe sahip olan primer akımlar uygulanmış ve akım transformatörünün oran hatasının harmoniklerden ne yönde etkilendiği ölçülmüştür. Daha sonra aynı testler gerçek akım transformatörüne uygulanıp sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar ve kullanılan ATP programı ile gerçekleştirilen simülasyon çalışmasında deney sonuçları ile simülasyon sonuçlarının başarılı bir biçimde örtüştüğü, ATP programının akım transformatörünün simülasyonu için başarıyla kullanılabileceği görülmüştür.

Yapılan çalışmalar neticesinde, akım transformatörlerinin nominal frekansın (50 Hz) altındaki frekanslarda yüksek hata ile çalıştığı, ancak nominal frekansın üstündeki frekanslarda hata oranının son derece düşük olduğu görülmüştür. Ancak bu değerlendirmeler akım transformatörlerinin “ilgili standartlara uygun olarak hata sınıfları içerisinde çalışıp çalışmadığına” kanaat getirmek için kullanılamaz. Zira, TS 620 EN 600044-1’e göre tanımlanan hata sınır değerleri primer akımın sinüsoidal olduğunu varsaymaktadır. İlgili standart harmonik bileşenler içeren sinüsoidal olmayan akımları kapsamamaktadır. Ayrıca aynı standart sadece 15 Hz ile 100 Hz arasındaki frekansları içermektedir. Buna göre standartta tanımlanan frekanslar 3., 5., 7. harmonik gibi sistemde etkili olan harmonik frekanslarını içermemektedir.

Bu tez çalışmasında yapılan deneylerde akım transformatörünün primer sargısına 2., 3., 5. ve 7. harmonik bileşenlerin frekansında ayrı ayrı sinüsoidal akımlar uygulandığında akım transformatörünün dönüştürme oranı hatasının ve faz açısı hatasının akım transformatörünün hata sınıfına göre izin verilen sınır değerinin altında olduğu görülmüştür.

Yapılan simülasyon çalışmasında ise akım transformatörünün primer sargısına 3., 5., 7. ve 9. tek harmonikler ile 2., 4., 6. ve 8. çift harmonikler ayrı ayrı sinüsoidal akımlar biçiminde ve temel bileşen ile birlikte harmoniklerden oluşan sinüsoidal olmayan akımlar biçiminde uygulandıklarında akım transformatörünün dönüştürme oranı hatasının ve faz açısı hatasının

akım transformatörünün hata sınıfına göre izin verilen sınır değerin altında olduğu görülmüştür.

Üç fazlı dengeli elektrik güç sistemlerinde en yüksek genlikli harmonik akım bileşenlerinin sırasıyla 5. ve 7. harmonikler olduğu, tek fazlı sistemlerde en yüksek genlikli harmonik akım bileşenlerinin sırasıyla 3., 5. ve 7. harmonik bileşenler olduğu göz önüne alındığında; yapılan deneysel çalışmaların ve simülasyon çalışmalarının sonuçlarına dayanarak, koruma röleleri için kullanılan akım transformatörlerinin sistemde etkin olan bu harmonikler sebebiyle koruma rölelerinin hatalı çalışmasında belirgin bir etkilerinin olamayacağı, bu mertebedeki harmonik bileşenlerin akım transformatörü üzerindeki dönüştürme oranı hatasının ve faz açısı hatasının ihmal edilebilecek düzeyde olduğu yorumu yapılabilir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlardan yararlanılarak aşırı akım röleleri ile ilgili simülasyon çalışmalarında harmonikli akımlar için bu çalışmada geliştirilen akım transformatörü modeli kullanılabilir. Benzer çalışmalar gelecekte konvansiyonel gerilim transformatörleri ve kapasitif gerilim transformatörleri için de gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

Almonte, R. L., and Ashley, A. W., (1995) "Harmonics at the Utility Industrial Interface: A Real World Example," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no.6, pp. 1419-26.

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

Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R. ve Wood, A.R., (1997), Power System Harmonic Analysis, John Wiley & Sons.

Arabi S., Komaragiri M. M., and Taranawecky M. Z., (1987) "Effects of geomagnetically-induced currents in power transformers," Can. Elec. Eng.J., vol. 12, no. 4, pp. 165-170.

ATP, RB-04E, " Alternative Transient Program Saturable Transformer Component Rule Book"

ATP, RB (1987-1998), " Canadian,American EMTP User Group Rule Book"

CIGRE Working Group 05, "Transformers and Instruments for Measuring Harmonics", Study Committee 36, Electra, No. 124.

Coates, R. ve Brewer, G.L., (1974), "The Measurement and Analysis of Waveform Distortion Caused by a Large Multi-Furnace Arc-Furnice Installation", IEE Conf. Publ., 110: 135-143.

Cristaldi, L. and Ferrero A., (1995) "A method and related digital instrument for the measurement of electric power quality," IEEE Trans. Power Del., vol. 10, no. 3, pp. 1183-89.

Debnath, K., (1992) "Accuracy of Distribution Current Transformers Under Non-Sinusoidal Excitation" School of Engineering, University of Tasmania, Hobart, Australia 7000.

Dommel, H.W., Yan, A. ve Wei, S., (1986), "Harmonics from Transformer Saturation", IEEE Trans. on Power Systems, 1(2):209-215.

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

Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., and Beaty, H. B., Electrical Power System Quality. New York: McGraw-Hill, 2003, ch. 6.

Emanuel, A.E. ve Wang., X., (1985), "Estimation of Loss of Life of Power Transformers Supplying Nonlinear Loads", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS 104(3): 628-636).

Emanuel, A. E. (1990) "Powers in nonsinüsoidal situations: A review of definitions and physical meaning," IEEE Trans. Power Del., vol. 5, no. 3, pp. 1377-89.

Emanuel, A.E., Orr, J.A., (2007) "Current Harmonics Measurement by Means of Current Transformers", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.22, No.3,

Erkan, E., (1996) "Nonlineer Yüklerde Güç Faktörünün İyileştirilmesi", M.Ü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

EPDK, (2003) "Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği"

EPDK, (2004) "Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği"

Folkers, R., " Determine Current Transformer Suitabilty Using EMTP Models" Schweitzer

Engineering Laboratories, Inc. Pulman.

Forrest, J.A.C., (1991), "Harmonic Load Losses in HVDC Converter Transformers", IEEE Trans. on Power Delivery, 6(1): 153-157.

Glinkowski, M.T. ve Estergalyos, J., (1996a), "Transient Modeling of Electromechanical Relays Part I: Armature Type Overcurrent Relays", IEEE Trans. on Power Delivery, 11(2): 763-770.

Glinkowski, M.T. ve Estergalyos, J., (1996b), "Transient Modeling of Electromechanical Relays Part II: Plunger Type 50 Relays", IEEE Trans. on Power Delivery, 11(2): 771-782.

Grady, W.M., (1983), Harmonic Power Flow Studies, Ph. D. Thesis, Purdue University (U.S.A.).

Grady, W.M. ve Heydt, G.T., (1985), "Prediction of Power System Harmonics due to Gaseous Discharge Lighting", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 97:1935-1945.

Henderson, R ve Rose, P.J., (1994) "Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers" IEEE Trans. on Industry App. Vol 30, No.3.

Horton, W.F. ve Goldberg, S., (1985), "The Effect of Harmonics on the Operating Points of Electromechanical Relays", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-104(5): 1178-1188.

Hwang, M.S., Grady, W.M. ve Sanders, H.W., (1987), "Distribution transformer Winding Losses due to Nonsinusoidal Currents, IEEE Trans. on Power Delivery, 2(1): 140-146.

Hwang, M.S., Grady, W.M. ve Sanders, H.W., (1988), "Calculation of Winding Temperatures in Distribution Transformers Subjected to Harmonic Currents", IEEE Trans. on Power Delivery, 3(3): 1074-1079.

IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power systems, IEEE Std. 1453, 2004.

IEEE Wave Distortion on Consumer's Interconnection Working Group, (1984), "The Impact of Sine-Wave Distortion on Protective Relays", IEEE Trans. on Industry App., 20(2): 335-343.

IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1983), "Power Systems Harmonics: An Overview", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, PAS 102(8): 2455-2460.

İnan, A., Attar, F., (1997) "Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Etkileri ve Bir Harmonik Kontrol Kartı Modeli", Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:98,

Jahn, H.H. ve Kauferle, J., (1974), "Measuring and Evaluating Current Fluctuations of Arc-Furnaces", IEE Conf. Publ., 110:105-109.

Kerszenbaum, I., Mazur, A., Mistry, M. ve Frank, J., (1991), "Specifying Dry-Type Distribution Transformers for Solid-State Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, 27(1):173-178.

Kocatepe, C., (1995) "Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu", Y.T.Ü Doktora Tezi,

Kocatepe, C., Demir, A., (1998) "Güç Sistemlerinde Harmonik Üreten Elemanlara Genel Bakış", Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:113.

- Kocatepe, C.,(2003) Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Lander, C.W. (1981), Power Electronics, McGraw-Hill Book Company Limited, Michigan.
- Linden, W.P., (1996), "Transformer Design and Application considerations for Nonsinusoidal Load Currents", IEEE Transactions on Industry Applications, 12:633-645.
- McGranaghan, M.F., Dugan, R.C., King, J.A. ve Jewell, W.T., (1984), "Distribution Feeder Harmonic Study Methodology", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, PAS 103 (12): 3663-3666.
- Makram, E.B. ve ,Girgis, A.A., (1990), "A new Method in Teaching Power System Harmonics in the Undergraduate Power Curriculum", IEEE Trans. on Power Systems, 5: 1407-1412.
- Markam, E.B., Haines, R.B., Girgis, A.A, (1992) " Effects of Harmonic Distortion in Reactive Power Measurement" IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.28 No.4.
- McPherson, G. Ve Laramore, R.D., (1990), An Introduction to Electrical Machines and Transformers, John Wiley & Sons, Singapoure.
- Omicron, (2002) " CPC 100 Reference Manual" Omicron Electronics GmbH, Austria.
- Prikler, L.ve Hoidalén, K.H, (2002) " ATPDraw User Manual" Preliminary Release No.1.1.
- Purkayastha, I ve Savoie, P.J.,(1990) "Effects of Harmonics on Power Measurements" IEEE Trans. on Industry App. Vol 26, No.5,
- Rashid, M.H., (1993), Power Elecronics, Prentice Hall, New Jersey.
- Türk Standardı, (2004) " TS 620 EN 60044-1 Ölçü Transformatörleri – Bölüm 1: Akım Transformatörleri",
- Türk Standardı, (2004) " TS EN 60044-6 Ölçü Transformatörleri – Bölüm 6: Geçici Durum Performansı içim Koruma Akım Transformatörleriyle İlgili Özellikler".
- Wright, A., (1968) Current Transformers, their Transient and Steady-State Performance.London, U.K.: Chapman & Hall.
- Xia, D. ve Heydt, G.T., (1982a), "Harmonic Power Flow Studies Part I – Formulation and Solution" IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS 101 (6): 1257-1265.
- Xia, D. ve Heydt, G.T., (1982b), "Harmonic Power Flow Studies Part II – Implementation and Practical Application, PAS 101 (6): 1266-121270.
- Yeşil, M., (1996) "Enerji Sistemi Üzerindeki Nonlineer Yüklerin Etkileri ve Alınabilecek Önlemler", M.Ü Yüksek Lisans Tezi.
- Yıldız, S. (2005) " Ölçü Akım Transformatörlerinin Matematiksel Modeli ve Sinüsoidal Olmayan Şartlar Simülasyon ile Performansının İncelenmesi" G.Y.T.E Y.Lisans Tezi.
- Yumurtacı, R., (2000) "Lineer Olmayan Dengesiz Yükler İçeren Enerji Sistemlerinde Üç Fazlı Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu", Y.T.Ü Doktora Tezi.
- Zamora, I., Mazón, A.J., Valverde, V., San Martín, J.I., Buigues, G., Dyško A. 2004) "Influence of Power Quality on the Performance of Digital Protection Relays" IEEE Trans. on Industry App.

EKLER

- Ek 1 Akım Transformatörü Oran Test Raporu
- Ek 2 Akım Transformatörü Uyartım Eğrisi Test Raporu
- Ek 3 Akım Transformatörü Sekonder Sargı Direnci Test Raporu
- Ek 4 EMTP saturasyon modeli simülasyon verileri
- Ek 5 EMTP oran modeli simülasyon verileri

Ek 1 Akım transformatörü oran test raporu

\TEZ\ORAN.xml:

Test Device: CPC 100
 Serial Number: GC802K (V1)
 Date/Time: 08/23/2009 09:57:00

Overall assessment: n/a

Test Cards Overview:

Test Card	Type	Date/Time	Results	Assessment	Overload
ORAN	CTRatio	08/23/2009 09:47:44	yes	n/a	no

Test Cards:

ORAN:

Card Type: CTRatio

Date/Time: 08/23/2009 09:47:44

Overload: no

Assessment: n/a

Range: AC 800A

Nominal values:

I prim.: 5 A

I sec.: 5.000 A

Frequency: 50.00 Hz

I test: 5.0 A

Automatic: yes

Results:

I prim.: 4.79 A 0.00 °

I sec.: 4.78400 A 0.34 °

Ratio: 5 A:4.9935 A -0.13 %

Polarity: OK

Ek 2 Akım transformatörü uyartım eğrisi test raporu**\TEZ\DOYMA.xml:**

Test Device: CPC 100
Serial Number: GC802K (V1)
Date/Time: 08/23/2009 09:40:00
Overall assessment: n/a

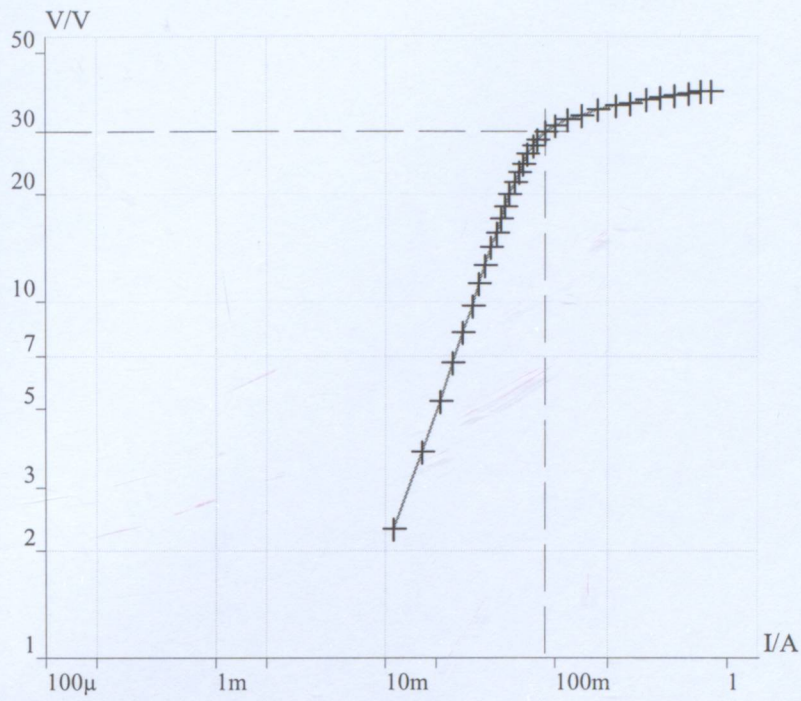
Test Cards Overview:

Test Card	Type	Date/Time	Results	Assessment	Overload
DOYMA	CTExcitation	08/23/2009 09:05:23	yes	n/a	no

Test Cards:**DOYMA:**

Card Type: CTExcitation
Date/Time: 08/23/2009 09:05:23
Overload: no
Assessment: n/a
V max: 50.0 V
I max: 1.00000 A
Frequency: 50.00 Hz
Automatic: Yes
Results:

V	I
39.14 V	806.76 mA
38.85 V	701.79 mA
38.48 V	596.59 mA
38.03 V	497.76 mA
37.51 V	411.75 mA
36.85 V	336.40 mA
36.11 V	274.78 mA
35.31 V	221.78 mA
34.41 V	177.24 mA
33.45 V	142.13 mA
32.39 V	116.14 mA
31.23 V	98.231 mA
29.95 V	86.461 mA
28.61 V	78.460 mA
27.22 V	72.520 mA
25.82 V	67.762 mA
24.40 V	63.642 mA
22.96 V	60.007 mA
21.51 V	56.693 mA
20.05 V	53.427 mA
18.59 V	50.463 mA
17.11 V	47.443 mA



15.65 V	44.492 mA
14.18 V	41.449 mA
12.69 V	38.235 mA
11.23 V	35.103 mA
9.75 V	31.869 mA
8.27 V	28.499 mA
6.78 V	24.829 mA
5.28 V	20.829 mA
3.80 V	16.351 mA
2.32 V	11.260 mA

Kneepoint calculation: IEC/BS

V knee: 29.98 V

I knee: 86.767 mA

Ek 3 Akım transformatörü sekonder sargı direnci test raporu

\TEZ\SARGI_DIRENCI.xml:

Test Device: CPC 100
 Serial Number: GC802K (V1)
 Date/Time: 08/23/2009 09:39:00
 Overall assessment: n/a

Test Cards Overview:

Test Card	Type	Date/Time	Results	Assessment	Overload
SARGI DIRENCI	RWinding	08/23/2009 09:26:47	yes	n/a	no

Test Cards:

SARGI DIRENCI:

Card Type: RWinding
 Date/Time: 08/23/2009 09:26:47
 Overload: no
 Assessment: n/a

Range: DC 6A
 I test: 1.000 A
 R min.: 200.00 $\mu\Omega$
 R max.: 10.000 Ω
 Automatic: no

Results:

I DC: 0.97075 A
 V DC: 121.22 mV
 R meas.: 124.87 m Ω
 Deviation: 0.02 %
 Time: 57.000 s

Ek 4 EMTP saturasyon modeli simülasyon verileri

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW Aðustos, Çarpamba 19, 2009
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2008
C -----
C Example 1
C Your first circuit
C Rectifier bridge
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  5.E-5      .05
    500      1      1      1      1      1      0      0      1      0
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
TRANSFORMER                                TX0001                                1
0.066100341905      0.3150356843
0.092629594876      0.55403215306
0.11874394694      0.74478667254
0.13601662851      0.8397700439
0.16554512766      0.93396563847
0.25657311368      1.0258354159
0.4823601673      1.0671374269
1.0345762281      1.0984609321
2.1705513146      1.1193182601
9999
1VS                                .206 1.E-6 800.
2XX0001                                1.E-10 5.
/SOURCE
C < n 1><>< Amp1. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14VS      0      421.97      50.                                -1.      1.E3
/OUTPUT
VS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```


Ek 5 EMTP oran modeli simülasyon verileri

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW Aðustos, Pazartesi 24, 2009
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SefAS/NTNU - NORWAY 1994-2008
C -----
C Example 1
C Your first circuit
C Rectifier bridge
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  5.E-5      .05
    500      1      1      1      1      0      0      1      0
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
  TRANSFORMER                                TX0001                                0
  0.066100341905      0.3150356843
  0.11722653298      0.74478667254
  0.13608529447      0.8397700439
  0.14951500342      0.88714919003
  0.16632856038      0.93396563847
  0.19436898933      0.98066954737
  0.26892938636      1.0258354159
  0.47980551375      1.0671374269
  1.0355348356      1.0984609321
  2.1703854075      1.1193182601
      9999
  1XX0004IS      .206      800.
  2XX0005IP      1.E-10      5.
  XX0003XX0004      1.28
  XX0003      .96
/ SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
      IS      MEASURING      1
      IP      MEASURING      1
/SOURCE
C < n 1><>< Amp1. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14XX0005-1      1131.4      50.      -1.      1.E3
/OUTPUT
  XX0004
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```


ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	19.06.1984	
Doğum yeri	Burdur	
Lise	1998–2002	Burdur Anadolu Öğretmen Lisesi
Lisans	2002–2006	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2006–2009	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı

Çalıştığı Kurum(lar)

2005–2006	Tekad Elektrik Ltd Şti.
2006–.....	Siemens San. Tic. A.Ş

