

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖLÇÜ AKIM TRANSFORMATÖRLERİNİN
DOĞRULUĞUNUN SİNÜZOİDAL OLMAYAN
ŞARTLAR ALTINDA DENEYSEL İNCELENMESİ

Emrah ANİGİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2012

T.C.

**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖLÇÜ AKIM TRANSFORMATÖRLERİNİN
DOĞRULUĞUNUN SİNÜZOİDAL OLMAYAN
ŞARTLAR ALTINDA DENEYSEL İNCELENMESİ**

**Emrah ANİĞİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI
Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU**

GEBZE

2012



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21/01/2013 tarih ve 2013/03 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 07/02/2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Emrah ANİĞİ'nin tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU

ÜYE

: Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI

ÜYE

: Yrd. Doç. M. Erhan BALCI

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Not: Formdaki boşluklar mutlaka Ms Word ortamında doldurulacak.

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : ÖLÇÜ AKIM TRANSFORMATÖRLERİNİN DOĞRULUĞUNUN SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLAR ALTINDA DENEYSEL İNCELENMESİ

YAZAR ADI : EMRAH ANIĞI

Gelişen teknoloji ile birlikte enerji sisteminde kullanılan lineer olmayan yüklerin sayısı ve oranı gün geçtikçe artmaktadır. Bu artışa paralel olarak dağıtım sistemlerindeki harmoniklerin oranında da artış görülmektedir. Enerji sisteminin korunmasında, akım genliği ve fazının ölçümünde kullanılan akım transformatörlerinin sinüzoidal şartlarda görevlerini doğru olarak yerine getirdikleri, bununla birlikte sinüzoidal olmayan şartlarda hatalı çalıştıkları bilinmektedir.

Bu tezde, enerji sisteminin önemli bir parçası olan ölçü akım transformatörlerinin doğruluğuna, enerji sisteminde harmonik bozulmalara sebep olan yüklerin bireysel olarak etkisi geliştirilen bir deney sistemi yardımıyla deneysel olarak incelenmiş, ölçü akım transformatörünün matematiksel modeli oluşturulmuş ayrıca sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlardaki performansı ElectroMagnetic Transient Programın (EMTP) Alternatif Transient Program (ATP) versiyonunda yapılan simülasyon çalışmaları ile incelenmiştir.

Çalışmanın sonucunda, ölçü akım transformatörünün bağlı olduğu sistemde lineer olmayan yüklerin bulunması ölçüm doğruluğunu önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Özellikle temel frekansın altındaki harmoniklerde ve akım dalga formundaki doğru akım bileşen oranına göre akım transformatörü hata sınıfının dışına çıkabilmektedir.

SUMMARY

TITLE : AN EXPERIMENTAL STUDY OF CURRENT MEASUREMENT TRANSFORMERS ACCURACY UNDER NONSINUSOIDAL CONDITIONS

AUTHOR : EMRAH ANİĞİ

The proportion and number of nonlinear loads used in power systems have been increasing with the developments in the power electronics technology. In addition to this increase, the rate of harmonics in distribution systems has been increasing. It is known that nonlinear loads are a major harmonic source for the distribution systems and operating range of the current transformers vary significantly in the harmonically polluted systems.

In this study, the accuracy of current transformers which is an important part of the power system is investigated via a developed test system. The effects of individual loads that cause harmonic distortions in the system parametrically analysed and a mathematical model has been created for current transformers. Also current transformers are simulated under sinusoidal and nonsinusoidal conditions using ATP (Alternative Transient Program) version of EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) to evaluate their performance.

The main conclusion of the thesis is that, the accuracy of current transformers are significantly affected by nonlinear loads that may exist in power systems. Also current transformers may be forced to work out of their class range due to the lack of DC component in current wave forms and/or subharmonics.

TEŞEKKÜR

Hazırlanmış olan bu tez çalışmasında destek ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na, ölçümler sırasındaki katkıları için araştırma görevlisi Dr. Özgür KARACASU ve Onur ÖZTÜRK'e teşekkür ederim. Her zaman maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan aileme ve kardeşim Yunus Emre ANİĞİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	İV
SUMMARY	V
TEŞEKKÜR	VI
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	3
1.2. Tezin Sınırları	3
1.3. Tezin Yapısı	3
2. HARMONİK VE HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR	5
2.1. Giriş	5
2.2. Harmonikler	5
2.3. Harmonik Üreten Elemanlar	6
2.3.1. Transformatörler	7
2.3.3. Konvertörler	8
2.3.4. Alternatif Akım Kırıyıcı Devreler	10
2.5. Sistemdeki Harmoniklerin Engellenmesi	14
2.6. Sonuç Ve Değerlendirme	15
3. AKIM TRANSFORMATÖRLERİ	16
3.1. Giriş	16
3.2. Akım Transformatörünün Yapısı	16
3.3. Akım Transformatörü Çalışma Prensipleri	17
3.4. Akım Transformatörünün Çeşitleri	23
3.4.1. Ölçü Akım Transformatörü	23
3.4.2. Koruma Akım Transformatörü	25
3.5. Sonuç Ve Değerlendirme	27
4. AKIM TRANSFORMATÖRÜNÜN DOĞRULUĞUNUN SİMÜLASYONLA İNCELENMESİ	28
4.1. Giriş	28
4.2. Atp Paket Programı	28
4.3. İncelenen Akım Transformatörü Ve Atp Test Devresinin Oluşturulması	29

4.4.Akım Transformatörünün Simülasyon Devresi Ve Kaynak Dalga Şeklinin Doğruluğa Etkisi	32
4.4.1. Sinüzoidal Şartların Etkisi	33
4.4.2. Sinüzoidal Olmayan Şartların Etkisi	34
4.5. Sonuç Ve Değerlendirme	36
5. AKIM TRANSFORMATÖRÜNÜN DOĞRULUĞUNUN DENEYSEL İNCELENMESİ	37
5.1. Giriş	37
5.2. Deney Sisteminin Belirlenmesi	37
5.2.1. Deney Sistemi 1	37
5.2.2. Deney Sistemi 2	44
5.3. Deneysel Çalışmalar	48
5.3.1. Sinüzoidal Şartlar Altında Frekansın Etkisi	48
5.3.2. Sinüzoidal Olmayan Şartların Etkisi	51
5.4. Sonuç Ve Değerlendirme	58
6. SONUÇ	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

ATP	Alternative Transient Programı
EMTP	ElectroMagnetic Transient Program
Hz	Hertz
IEEE	Institute of Electrical and Electronical Engineers
I_n	n. harmonik akımı
I_μ	Transformatör mıknatıslanma akımı
U_h	Endüklenen h. Harmonik gerilimi
f	Frekans
N_s	Bir faz sargı sarım sayısı
k_n	n. harmoniğin sargı faktörü
ω	Açısal hız
%AH	Akım hatası
K_n	Transformatör dönüştürme oranı
I_s	Sekonder akımı
I_p	Primer akımı
Φ_{FH}	Faz hatası
Φ_p	Primer akımı faz açısı
Φ_s	Sekonder akımı faz açısı
ϵ_b	Bileşik hata
i_p	Anlık primer akımı
i_s	Anlık sekonder akımı
Imag	Magnetizasyon akımı
RCF	Oran düzeltme faktörü
β	Faz açısı hatası
GH	Genlik hatası
N_s	Sekonder siper sayısı
N_p	Primer siper sayısı
F	Vektörel olarak hata akımı
E	Sekonderde endüklenen gerilim
B	Manyetik akı yoğunluğu
q_E	Nüve kesiti
R_y	Yük direnci
R_{ss}	Sekonder akım şöntü
R_{ps}	Primer akım şöntü
Z_b	Sekonder yükü
$\cos\phi$	Güç faktörü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil:

Sayfa:

2.1. Temel dalga İle 2., 3., 5. harmonikler ve bunların bileşkesi olan toplam dalgalar	6
2.2. Üç fazlı 6 darbeli konvertör (a) Bağlantı şeması, (b) Y/Y bağlı durumda hat akımı dalga şekli, (c) Y/Δ bağlı durumda hat akım dalga şekli.	9
2.3. Üç fazlı 12 darbeli konvertör (a) Bağlantı şeması, (b) Hat akımı dalga şekli	10
2.4. AA kıyıcı (a) Bağlantı şeması, (b) Akım dalga formu.	11
2.5. AA kıyıcısı harmonik spektrumu ($\alpha=70^\circ$)	11
3.1. Ölçü akım transformatörünün iç yapısı; (a) Tek geçişli primer (b) Sarmal yapılı primer [25].	17
3.2. Akım transformatörü (a) Bağlantı şeması (b) Eşdeğer devresi (lineer model).	18
3.3. Akım transformatörü fazör diyagramı.	18
3.4. (a) Sinüzoidal kaynak, (b) Ferromanyetik nüvenin histeresiz çevrimi[12].	21
3.5. Farklı frekanslar için B-H çevrimi [14].	23
4.1. Kullanılan ölçü akım transformatörü resmi	30
4.2. Transformatör test devresi.	30
4.3. Ölçüm ve simülasyon sonucu elde edilen mıknatıslanma akımı.	32
4.4. Akım transformatörü doğruluk testi modeli.	32
4.5. Frekansa bağlı genlik hatası değişimi.	33
4.6. Frekansa bağlı faz hatası değişimi.	33
4.7. Sinüzoidal olmayan şartlarda akım transformatörü modeli.	34
4.8. Sinüzoidal olmayan dalga formları (a) Tek harmonikler (b) Çift harmonikler	35
4.9. Genlik ve Faz hatası a) Teksayılı harmonikler b) Çift sayılı harmonikler.	36
5.1. Kullanılan ölçü akım transformatörlerinin resmi.	38
5.2. Deney sistemi bağlantı şeması.	39
5.3. AT2 transformatörü (a) Primer akımı (b) Sekonder akımı.	39
5.4. Güç kaynağı çıkış gerilimi dalga formu.	40
5.5. Kaynak gerilimi harmonik spektrumu (5volt).	40
5.6. Kaynak gerilimi dalga formu (60volt)	41
5.7. Kaynak gerilimi harmonik spektrumu (60volt)	42
5.8. Sisteme eklenen varyak resmi	42
5.9. Varyak ile uygulanan gerilim dalga formu	43

5.10. Varyakgerilimi harmonik spektrumu.	43
5.11. Frekansa bağı genlik hatası	44
5.12. Kullanılan ölçü akım transformatörü resmi	45
5.13. Deney sistemi prensip şeması	45
5.14. Deney sistemi resmi.	46
5.15. Geliştirilen labwiev programı kontrol paneli.	46
5.16. Geliştirilen labwiev programı blok diyagram.	47
5.17. Frekansa bağı genlik hatası değişimi.	49
5.18. Frekansa bağı faz hatası değişimi.	49
5.19. Hata fazör diagramı.	50
5.20. Primer akımı dalga formu(10A)	50
5.21. Primer akımı harmonik spektrumu	51
5.22. Tek sayılı harmonikler primer akımı.	52
5.23. Çift sayılı harmonikler primer akımı.	52
5.24. Primer akımına karşılık akım ve faz hatası. (a) Temel harmonik ve tek harmonikler. (b) Temel hamonik ve çift harmonikler.	53
5.25. 6 darbeleri konvertör primer akımı.	54
5.26. 12 darbeleri konvertör primer akımı.	54
5.27. Primer akımına karşılık akım ve faz hatası. (a) 6 darbeleri konvertör	55
5.28. AA Kıyıcısı primer akımı ($\theta=70^\circ$).	56
5.29. AA Kıyıcısı genlik ve faz hatası.	56
5.30. Doğru akım bileşen içeren harmonik primer akımı.	57
5.31. Doğru akım bileşen içeren harmonik genlik ve faz hatası.	57

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo:</u>	<u>Sayfa:</u>
2.1. Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu	11
2.2. Magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu	14
2.3. Çeşitli ülkelerin harmonik standartları	16
3.1. Ölçü akım transformatörü akım hatası ve faz hatası sınırları (IEC 60044-1)	20
3.2. Koruma akım transformatörlerinin hata sınırları (IEC 60044-1)	22
4.1. Kullanılan ölçü akım transformatörüne ait bilgiler	28
4.2. Saturable transformatör için girilen veriler	30
4.3. Akım transformatörünün mıknatıslanma eğrisi noktaları	31
4.4. Akım transformatörüne uygulanan akımların harmonik içerikleri	35
4.5. Sinüzoidal olmayan şartların hataya etkisi	35
5.1. Kullanılan ölçü akım transformatörlerine ait bilgiler	39
5.2. Akım transformatörü etiket bilgileri	41
5.3. Ölçüm sistemi hassasiyeti	45

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji bir yandan elektrik enerjisine olan ihtiyacı artırırken diğer yandan enerji sistemindeki yüklerde çeşitliliğe neden olmuştur. Buna bağlı olarak daima lineer olması istenen sistemdeki bu yüklenmelerin yanı sıra lineer olmayan yüklerde ciddi oranda artmıştır.

Lineer olmayan yükler akım-gerilim karakteristiği doğrusal olmayan yüklerdir. Yani, akım-gerilim dalga şeklinin sinüs eğrisinin dışına çıkmasıdır. Sinüzoidal olmayan bu dalga şekilleri Fourier analizine göre temel frekans ve temel frekansın katlarında frekanslara sahip sinüzoidal dalgaların toplamı biçiminde ifade edilebilir. Temel frekans dışındaki bu bileşenlere harmonik adı verilir [1], [2], [3].

Harmoniklerin sebep olduğu akım ve gerilim dalga şekillerinin bozukluğu sistemde çeşitli problemlere yol açmaktadır. 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 bu problemlere örnek verilebilir. Bu sebeple harmonikler, elektrik enerji sistemlerinde enerji kalitesini önemli ölçüde etkilemektedirler [1].

Bu çalışmada, akım genliği ve fazının ölçümünde kullanılan ölçü akım transformatörlerinin sinüzoidal olmayan şartlarda genlik ve faz hatasının değişimi deneysel olarak analiz edilmiştir.

Genel olarak ölçü akım transformatörleri standartlarda harmonik frekanslar için değil temel frekans bileşenini ölçmek için tasarlanmış ve test edilmiştir [4]. Literatür incelendiğinde deneysel çalışmalar ve ElectroMagnetic Transient Programı (EMTP) tabanlı simülasyonlar ile karşılaşılmaktadır. Ölçü akım transformatörleri [5]'ye göre 10kHz'e kadar %3 doğruluk ile harmonikleri ölçebilir. Ama bu ifadede özellikle güç ölçümünde çok büyük etkisi olan faz hatasına yer verilmemiştir. Bir çalışmada ölçü akım transformatörünün harmonik akımın genliğini ölçmede güvenilir olduğu belirtilmiştir [6]. Bununla birlikte faz hatasının harmonik aktif gücü ölçerken kabul edilemez boyutlara ulaştığı vurgulanmıştır [7]-[10].

2005 yılında yapılan bir tez çalışmasında akım transformatörü sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlarda Alternatif Transient Program (ATP)'ile simüle edilmiş

ve akım transformatörünün alt harmoniklerde ve doğru akım bileşeni içeren akım dalga formlarında büyük belirsizlikler gösterdiği belirtilmiştir [11][12].

2008 yılında yapılan bir çalışmada ölçü akım transformatörünün frekans bağlı hata değişimine bakılmış ve standartlarda verilen sınıfına uygun olarak çalıştığı belirtilmiştir. Fakat frekans cevabı testinin gerçek çalışma koşullarını yansıtmadığı vurgulanmıştır [13]. Yazar diğer bir çalışmasında ölçü akım transformatörünü gerçek çalışma koşullarına uygun olması için temel frekans ve bir harmonik frekansın bileşke dalga formunda karakterize etmiş ve genlik ve faz hatasının primer akım dalga formundan oldukça etkilendiğini vurgulamıştır [14][15].

Başka bir çalışmada teorik ve deneysel olarak harmonik aktif gücün ölçümünde akım transformatörünün etkisi incelenmiştir. Çalışmada akım transformatörü faz hatasının harmonik güç ölçümünde büyük hatalara yol açtığı ve harmonik güç ölçümünde ölçü akım transformatörünün iyi çalışmadığı belirtilmiştir [16].

Bu çalışmalar göstermektedir ki ölçü akım transformatörlerinin doğruluğunun incelenmesi güncel bir problem olarak önemini hala korumaktadır.

1.1. Tezin Amacı

Ölçü akım transformatörleri, elektrik sistemlerindeki yüksek etkin değerdeki akımların düşük ölçme aralıklarına sahip ampermetreler, sayaçlar vb. tarafından ölçülebilecek değerlere indirilmesi için kullanılan sistem elemanlarıdır. Bu elemanların hassasiyetleri şebeke frekansına sahip ve sinüzoidal dalga şeklindeki akımlar için test edilir. Bu çalışmada, akım ölçü transformatörlerinin sinüzoidal olmayan şartlarda genlik ve faz hatasının değişimi simülasyonla ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu sayede sistemde genellikle karşılaşılan çeşitli harmonik kaynaklarının, bireysel olarak akım transformatörünün doğruluğuna etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu tezde literatürde sunulmuş olan çalışmalardan farklı olarak varsayımsal harmonik akım bileşenlerin transformatör ölçüm hatasına etkisi yerine, çeşitli yüklere ait harmonikli akımların kolektif olarak transformatör ölçüm hatasına etkisi analiz edilmiştir.

1.2. Tezin Sınırları

Tezin içerisinde incelenen konular ve bu konularla alakalı analizlerde; ölçü akım transformatörünün hassasiyeti hem simülasyon hem de ölçüm temelli sonuçlar yardımıyla incelenecektir. Hassasiyet analizi sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlarda gerçekleştirilecektir. Sinüzoidal olmayan şartlar için yapılan ölçüm temelli analizlerde programlanabilir güç kaynağı kullanıldığı için, kaynağın akım sınırları içerisinde çalışılmıştır.

1.3. Tezin Yapısı

Çalışma altı bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde enerji kalitesi, enerji kalitesini bozan etkenler, lineer olmayan yükler, harmonikler ve sistemde harmonik üreten kaynaklardan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde akım transformatörlerinin; tanımı, amacına göre çeşitleri, iç yapısı hakkında bilgilere değinilmiş ve çalışma prensibi kısaca anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde EMTP programının ATP versiyonu ile akım transformatörünün modelinin oluşturulması hakkında bilgi verilmiştir. Modelin

doğruluğu laboratuvar ortamında yapılan testler ile teyit edilmiştir. Simülasyon ortamında sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlarda akım transformatörlerinin performansına ilişkin yapılan parametrik analiz yine bu bölümde sunulmuştur.

Beşinci bölümde akım transformatörünün sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlardaki doğrulunun deneysel olarak incelenmesi yer almaktadır. Ölçümlerin yapılacağı iki ayrı deney düzeneğinin tanıtımı da bu bölüm içinde sunulmuştur. Güvenilirliği test edilmiş olan deney düzeneğinde üretilen sinüzoidal olmayan şartlar için akım transformatörünün hassasiyet analizi yüke bağlı olarak incelenmiştir.

2. HARMONİK VE HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR

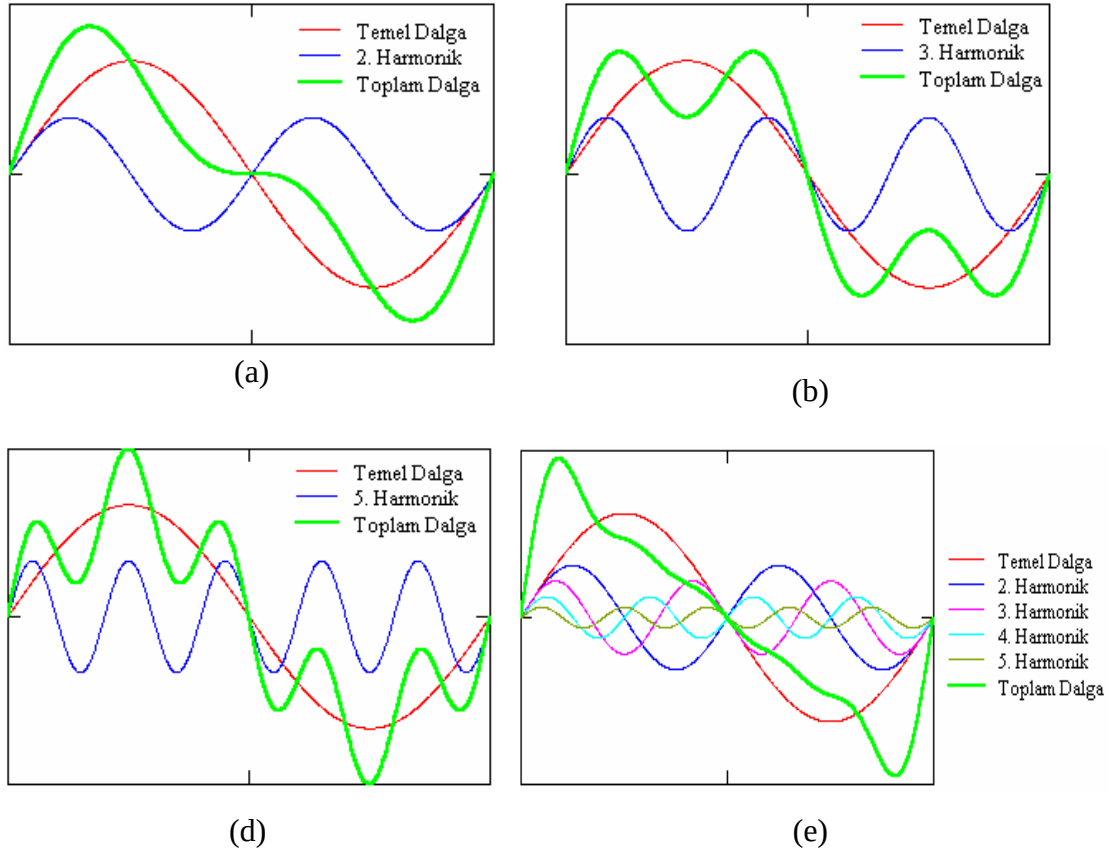
2.1. Giriş

Güç sisteminde elektrik enerjisinin kalitesi; elektriğin sürekliliği, gerilim ve frekansın limitler dâhilinde değişimi ve dalga biçimi düzgünlüğü ile birlikte tanımlanır. Elektrik güç sistemlerinin düzgün ve güvenilir biçimde çalışabilmesi için tasarım ve işletim aşamasında bir takım etkenlerin göz önünde bulundurulması gerekir. Güç kalitesini belirleyen parametrelerden biri de lineer olmayan karakteristikli elemanların meydana getirdiği harmoniklerdir. Elektrik güç sistemlerindeki lineer olmayan elemanlar, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerji kalitesini olumsuz etkilemektedir [1], [17].

2.2. Harmonikler

Harmonikler, genel olarak lineer olmayan elemanlar ile sinüzoidal olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Sistemde bulunan bu elemanların etkisiyle akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte temel sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalara “harmonik” adı verilir [1].

Güç sisteminde en çok 3., 5., 7., 11. ve 13. harmoniklerle karşılaşmaktadır. Ama temel bileşene göre genlikleri itibari ile 11. ve 13. harmonikler küçük olduklarından, özel durumlar dışında dikkate alınmazlar [17]. Temel dalga, harmonikli dalgalar ve bunların bileşkesi olan toplam dalgalar ile ilgili örnekler Şekil 2.1’ de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi temel dalga sistem de görülen harmonik dalgalar ile sinüzodail formunu yitirmektedir. Örneğin Şekil 2.1 (a)’da temel dalgaya 2. harmoniğin eklenmesiyle elde edilen bileşke dalga formu görülmektedir.



Şekil 2.1. Temel dalga ile 2., 3., 5. harmonikler ve bunların bileşkesi olan toplam dalgalar.

2.3. Harmonik Üreten Elemanlar

Elektrik üretimi, dağıtımı ve kullanımı sırasında elektrik enerjisinin kaliteli olması istenir. Kalite faktörlerinden biride akım ve gerilim dalga formlarının sinüs biçimli olması yani harmoniklerle kirlenmemiş olmasıdır. Ancak güç sistemindeki bazı yükler yapıları gereği, bazı yükler ise tasarım ve kontrol özellikleri bakımından besleme gerilim ve akımını bozarak harmonik üretirler. Bunun sebebi yüklerin uç gerilimi ve akımı arasındaki ilişkinin doğrusal olmamasıdır. Bu tür yükler genel olarak ark prensibine göre çalışan düzenler, gaz deşarjlı aydınlatma armatürleri, elektronik ve yarıiletken teknolojisine göre tasarlanmış sistemler, demir çekirdekli sargı bulunduran makineler olarak sınıflandırılabilir [18], [19]. Elektrik makineleri ve cihazların da yapılan tasarım ve kontrol değişiklikleri, güç elektroniğinin hızla ilerlemesi birçok olumsuzluğu da beraberinde getirmektedir. Örneğin motor,

transformatör, bobin ve jeneratör gibi demir çekirdeğe sahip elemanlar doyma sebebiyle harmonik üretirler. Ayrıca tristör, IGBT veya MCT gibi elektronik devre elemanları periyodik akımı keserken yine harmonik oluştururlar [209]. Sinüzoidal olmayan bu dalga formları sistemde, zaman eksenine göre periyodik simetrik veya periyodik asimetrik olabilir. Sinüzoidal olmayan dalga formu tek sayılı harmoniklerden oluşuyorsa periyodik simetrik, çift sayılı harmoniklerden oluşuyorsa periyodik asimetrik. Periyodik asimetrik dalgaların ortalama değeri sıfırdan farklı ise doğru akım bileşeni ortaya çıkmaktadır [1],[18].

Bu bölümde yukarıda bahsedilen ve analizler için deney sisteminde kullanacağımız harmonik kaynaklarından bazıları incelenecektir.

2.3.1. Transformatörler

Enerji sistemlerinde transformatörler gibi demir çekirdek üzerine yerleştirilmiş bobinlerden meydana gelen elemanlar, doyma özelliğine sahip demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle harmonikler üretirler [19], [21].

Güç transformatörleri, elektronik güç dönüştürücüleri ve ark fırınları gibi nominal akımlarının %20'sine varan oranlarda harmonik akımları üreten harmonik kaynakları ile karşılaştırılırsa, büyük harmonik kaynakları olarak dikkate alınmayabilir [19]. Bu nedenle harmonik yük akış çalışmalarının bir kısmında transformatörlerin doğrusal devre elemanları olarak modellendiği görülmektedir. Ancak bir dağıtım sisteminde yüzlerce transformatörün olduğu göz önüne alınırsa bir bütün olarak transformatörler harmonik kaynağı olarak ele alınabilir. Tablo 2.1'de bir dağıtım transformatörünün harmonik akım bileşenleri transformatörün mıknatıslanma akımının yüzdesi olarak verilmiştir [22],[23]. Burada I_μ transformatörün mıknatıslanma akımı, I_n transformatörün sisteme enjekte ettiği n. harmonik akımdır.

Tablo 2.1 Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu

Harmonik Derecesi (n)	%(I_n/I_μ)
3	50
5	20
7	5
9	2.6

2.3.3. Konvertörler

Enerji sistemindeki başlıca harmonik kaynaklarından birisi de üç ve tek fazlı şebeke denetimli konvertörlerdir. Doğru akım iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler şebeke denetimli konvertörler üzerinden beslenirler. Üç fazlı ideal (dengeli) konvertörlerin bir fazlı konvertörlere göre avantajı, üç fazlıların üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir. Üç fazlı konvertörler, dönüştürücü transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen alternatif akımın dalga şeklinin içerdiği darbe sayısı ile tanınır [18].

Konvertörlerde darbe sayısı p , 6, 12, 18 veya 36 olabilir. Bir konvertörün meydana getirdiği harmonikler, konvertörlerin tristör sayısına (darbe sayısına) bağlı olarak ifade edilebilir.

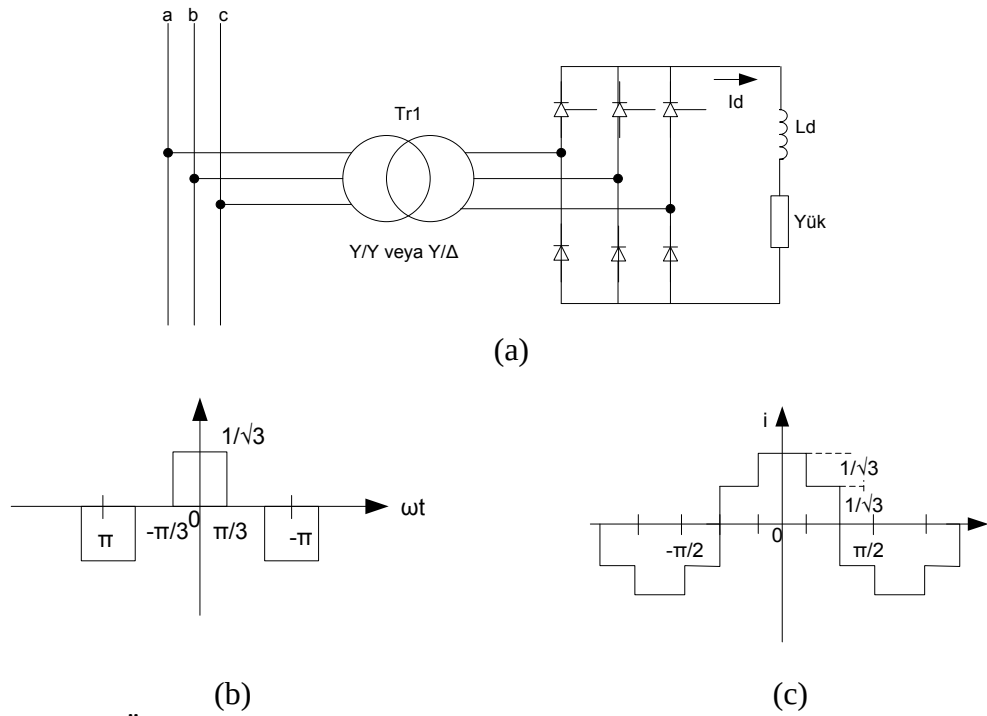
$$n = kp \mp 1 \quad (2.1)$$

n : harmonik mertebesi

p : çeviricinin darbe sayısı

k : pozitif bir tamsayı (1, 2, 3,...)' dir [19].

Darbe sayısı arttıkça düşük harmonik bileşenlerin ortaya çıkması önlenmektedir. 6 darbeli konvertörün bağlantı şekli ve akım dalga formları Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Üç fazlı 6 darbeli konvertör (a) Bağlantı şeması, (b) Y/Y bağlı durumda hat akımı dalga şekli, (c) Y/Δ bağlı durumda hat akım dalga şekli.

Transformatörün yıldız/yıldız bağlı olması halinde dengeli olarak çalışan konvertörün Şekil 2.2 (b) ile verilen a-fazı hat akımının ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \dots \right) \quad (2.2)$$

olarak ifade edilebilir. Burada I_d , doğrultucu tarafındaki akımı ifade etmektedir.

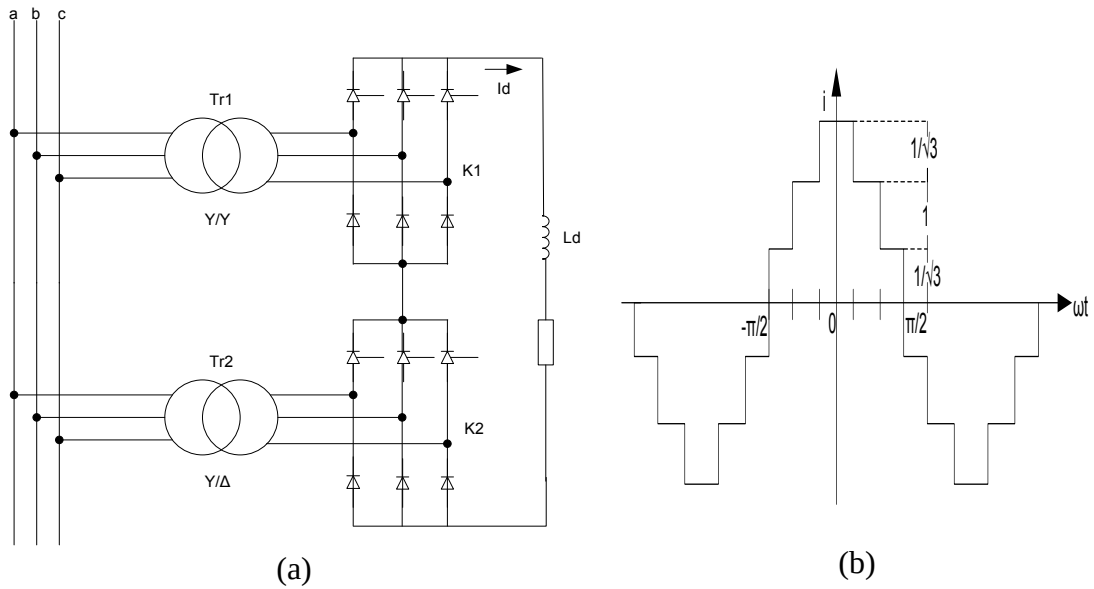
Transformatörün yıldız/üçgen bağlı olması halinde, Şekil 2.2 (c) ile gösterilen a-fazı hat akımı ani değeri Denklem (2.3)'te verilmiştir.

$$i_a(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \frac{1}{11} \cos 11\omega t - \frac{1}{13} \cos 13\omega t + \dots \right) \quad (2.3)$$

olarak ifade edilebilir. Burada görüldüğü gibi 6 darbeli konvertörde 5., 7., 11., 13., 17.,... harmonik bileşenleri ortaya çıkmaktadır. Harmonik mertebesi arttıkça her bir harmonik bileşeni genliği azalmaktadır. Yine görüldüğü gibi bu durumda 5., 7., 17., 19.,... mertebesindeki harmonikler yıldız/yıldız bağlı transformatörlü konvertörün ürettiği harmoniklerin ters işaretlisi olmaktadır [18]. (Ters işaretli olan harmonik bileşenler $k=1,3,5$ olmak üzere $6.k \pm 1$ ile belirlenir.)

Yukarıda akım ifadeleri verilen her iki tip altı darbeli konvertörün DA çıkışları seri bağlanarak elde edilen 12 darbeli konvertör şebekeye $k=1,2,3,\dots$ olmak üzere $12.k \pm 1$ mertebesindeki harmonikleri (11.,13.,23.,25.,...) enjekte eder. 12 darbeli konvertör kullanılarak (5., 7.,17.,19.,...) mertebesindeki harmoniklerin AA şebekeye geçmesi önlenabilir. Geçmesi engellenen harmonik bileşenler $k=1,3,5,\dots$ olmak üzere $6.k \pm 1$ ile belirlenir. Şekil 2.3’de 12 darbeli konvertörün bağlantı şeması ve a fazı hat akımının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Hat akımının ani değeri Denklem (2.4)’te verilmiştir.

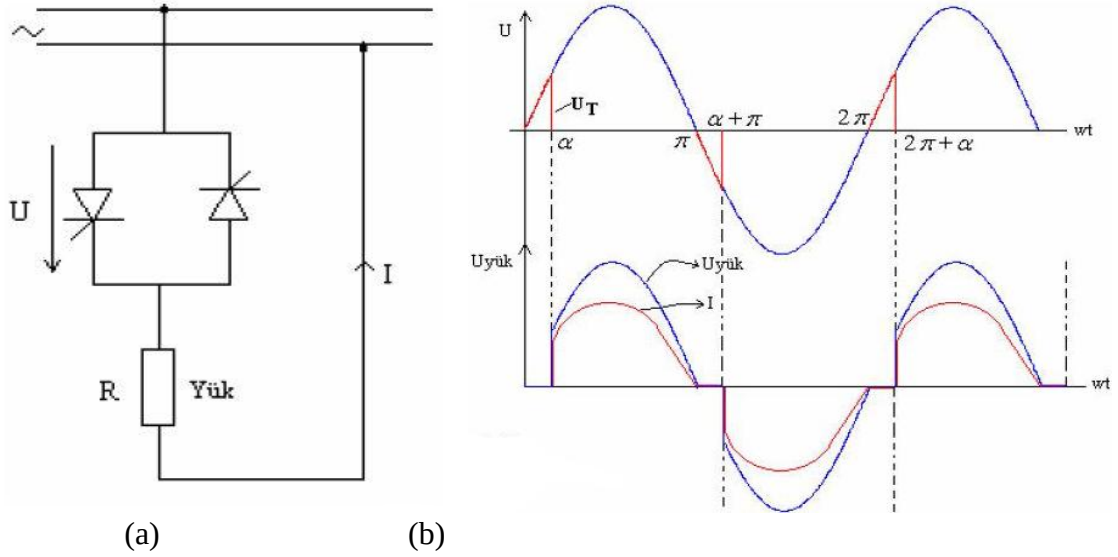
$$i_a(\omega t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{23} \cos 23\omega t + \dots \right) \quad (2.4)$$



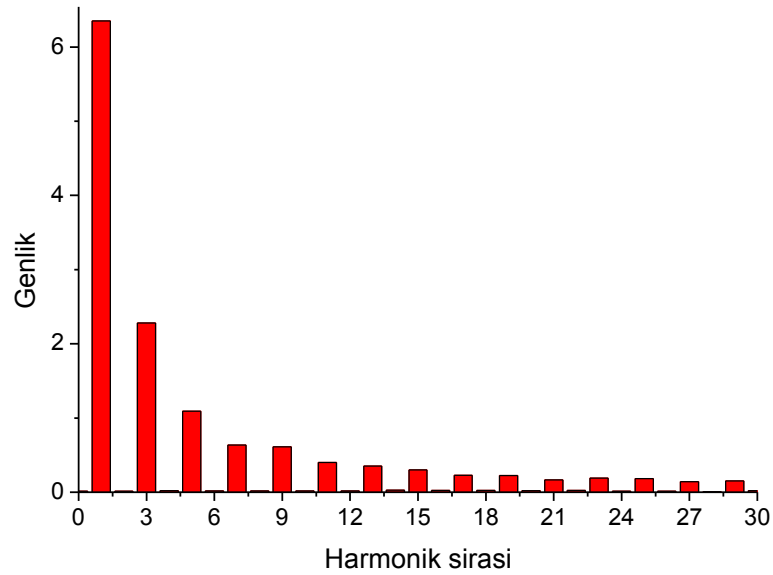
Şekil 2.3. Üç fazlı 12 darbeli konvertör (a) Bağlantı şeması, (b) Hat akımı dalga şekli.

2.3.4. Alternatif Akım Kıyıcı Devreleri

Sabit frekanslı ve sabit genlikli alternatif bir gerilimden, sabit frekanslı ve efektif değeri farklı bir alternatif gerilim elde etmek için oluşturulan güç elektroniği devrelerine Alternatif Akım (AA) Kıyıcısı denir. Genellikle birbirlerine ters paralel bağlanmış iki tristörden oluşur. Alternatif akım kıyıcı devresi ve dalga formu Şekil 2.4 de ve tetikleme açısı α 70° için harmonik spektrumu Şekil 2.5 de görülmektedir.



Şekil 2.4. AA kıyıcı (a) Bağlantı şeması, (b) Akım dalga formu.



Şekil 2.5. AA kıyıcısı harmonik spektrumu ($\alpha=70^\circ$)

2.4. Harmoniklerin Enerji Sistemi Üzerine Etkileri

Harmonik akımlarının frekansları 50 Hz'in tam katları olduğundan, bu akımların generatörler, transformatörler ve hat reaktansları üzerinde meydana getirdiği gerilim düşümleri artar. Şebeke geriliminin frekansından, farklı frekanstaki bu gerilim düşümleri, temel şebeke gerilimi üzerine binerek sinüzoidal gerilim biçimini bozarlar [24]. Harmoniklerin enerji sistemlerinde varlığı, sinüzoidal

formdaki akım ve gerilim dalga şekillerindeki bozulmalar ile anlaşılır. Harmoniklerin enerji sistemlerinde yol açtığı problemler genel olarak şöyle özetlenebilir [25];

- Generatör ve şebeke geriliminin dalga seklinin sinüs formundan sapması sebebiyle tüketicilerin çalışma koşullarının bozulması.
- Enerji sistemi elemanlarında ve yüklerde harmonikler sebebiyle ek kayıpların oluşması.
- Akımın harmonik bileşenleri sebebiyle gerilim düşümünün artması.
- Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri sebebiyle aşırı yüklenmeleri ve dielektrik zorlanma sebebiyle hasar görmeleri.
- Senkron ve asenkron motorlarda salınımların meydana gelmesi ve bu nedenle aşırı ısınmalar.
- Koruma ve kontrol sistemlerinin harmonikler sebebiyle hatalı çalışmaları.
- Elektromekanik sayaçların hatalı ölçüm yapması.
- Yüksek harmoniklerin bulunduğu bir şebekede toprak kısa devre akımlarının daha büyük efektif değerlere yükselmesi.
- Harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması [25];

Elektrik güç sistemlerinde harmonikler sebebiyle ortaya çıkan problemler arasında en dikkat çekici olanları kayıpların artması ile ölçü ve koruma sistemlerinin hatalı çalışmasıdır. Harmoniklerin tez çalışmamızda inceleyeceğimiz ölçü akım transformatörü üzerine etkilerine bakacak olursak;

- Akım harmonikleri kaçak akı kayıplarında ve bakır kayıplarında artışa neden olmaktadır [1].
- Temel frekansın altındaki harmonikler ölçü akım transformatörünün sınıfını dışında çalışmasına sebep olmaktadır [11], [13].
- Primer akım dalga formundaki bozulmalar ölçü akım trafosunun doğruluğunu etkilemektedir [14].

- Harmonik aktif gücü ölçmede ölçü akım transformatörü faz hatasında çok büyük belirsizlikler göstermektedir [15].
- Doğru akım bileşen içeren akım dalga formlarında ölçü akım transformatörü hem genlik hem de faz hatasında sınıfının dışında çalışmaktadır [11], [12].

Harmonik akım bileşenleri omik direnç içeren tüm tesis elemanları üzerinde ek harmonik kayıplara yol açmaktadır. Harmonikler sebebiyle oluşan ek kayıpları azaltmak için harmonik kaynağı durumundaki doğrusal olmayan yüklerin filtreler ile donatılması, dönüştürücüler gibi güç elektroniği devrelerinin tasarımında ise darbe sayısının mümkün olduğu kadar yüksek tutulması ile büyük genlikli harmonik bileşenlerinin şebekeye geçmesi önlenabilir. 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, doğrusal olmayan yüklerin Toplam Harmonik Bozulması (THD) ve harmoniklerin temel bileşene oranı her ülke tarafından sınırlandırılmaktadır [1]. IEEE tarafından getirilen IEEE 519-1992 nolu standart ve IEC tarafından IEC 50160 gibi standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim distorsiyonunu ve müşteriler için nonlineer yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırları vurgulamaktadırlar. Çeşitli ülkeler tarafından harmonikler için tanımlanmış sınır değerleri Tablo 2.2’de verilmiştir [1].

Tablo 2.2. Çeşitli ülkelerin harmonik standartları

Ülke	Gerilim (kV)	(THD) _v (%)	V _h /V ₁ (Tek)	V _h /V ₁ (Çift)
A.B.D	Genel			
	2.4-69	5		
	115≤	1.5		
	Özel 2.4-69	8		
Avustralya	Dağıtım			
	33≥	5	4	2
	İletim			
	22, 33, 66	3	2	1
Fransa	110≤	1.5	1	0.5
	Tüm Gerilimler	1.6	1	0.6
İngiltere	0.415	5	4	2
	6.6-11	4	3	1.75
	33-66	3	2	1
	132	1.5	1	0.5
İsveç	0.43-0.25	4		
	3.3-24	3		
	84≥	1		

2.5. Sistemdeki Harmoniklerin Engellenmesi

Harmonikler sebebiyle oluşacak zararların önlenmesi sadece tasarımda alınacak tedbirlerle mümkün olmamaktadır. Harmonik akımların şebekeye geçmesini engellemek için ek devrelere ihtiyaç vardır. Devreye yerleştirilen ve istenen harmonik akımının süzülmesini sağlayan bu devrelere “harmonik filtresi” adı verilir. Harmonik filtrelerin amacı bir yada daha fazla frekanstaki akım veya gerilimlerin yani harmoniklerin etkisini azaltmaktır. Harmonik filtrelerinin görevleri harmonik üreten bir cihazdan beslenen yükün gerilim dalgasını düzeltmek, AA sisteme katılan istenmeyen harmonik bileşenleri önlemek ve radyo frekans girişimlerini elemek şeklinde özetlenebilir [24].

İşlev bakımından filtreler ikiye ayrılır;

- Filtrelerin kontrollü ya da gerilim kaynağına sahip olduğu aktif filtreler
- Filtre bileşenlerinin direnç, endüktans ve kondansatör gibi pasif elemanlardan oluşturulduğu pasif filtreler

2.6. Sonuç ve Değerlendirme

Harmonikler, genel olarak lineer olmayan elemanlar ile sinüzoidal olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Oluşan bu harmoniklerin engellenmemesi durumunda güç sistemlerinde kayıpların artması, ölçü ve koruma sistemlerinin hatalı çalışması, elektromekanik sayaçların hatalı ölçüm yapması, harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması gibi birçok olumsuz etkiye sebep olur. Oluşacak bu olumsuz etkilerin giderilmesi için harmonik filtre denilen devreler kullanılır.

3. AKIM TRANSFORMATÖRLERİ

3.1. Giriş

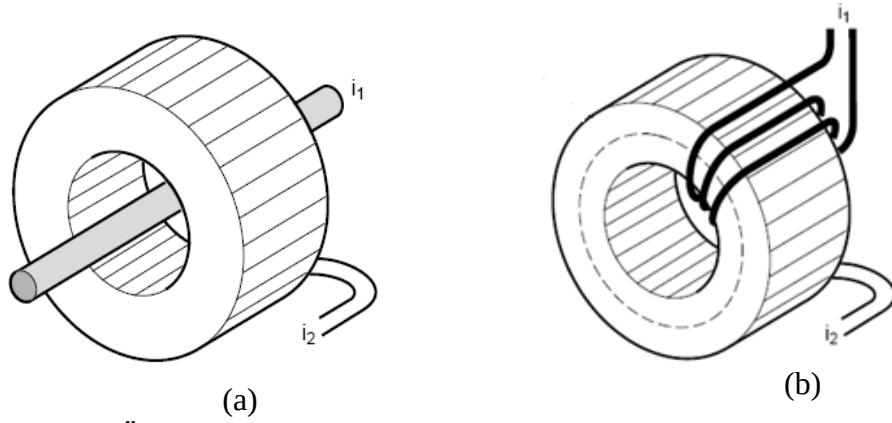
Güç sistemlerinde akım ve gerilimin izlenmesi ölçü, koruma, planlama gibi birçok farklı amaçla yapılmaktadır. Akım ve gerilimi doğrudan ölçmek mümkündür. Bununla birlikte yalıtım problemleri ve buna bağlı olarak yüksek maliyeti sebebiyle tercih edilmemektedir. Bu sebeple transformatörler aracılığı ile indirgeyerek ölçme metodu kullanılmaktadır.

Akım transformatörleri, seri bağlı oldukları sistemden geçen akımı primer (birincil) devreden geçirerek manyetik bir kuplaj ile sekonder (ikincil) devreye küçülterek aktarır. Akım transformatörleri aracılığı ile yapılan ölçümler sayesinde sekonder devreye bağlanan cihazlar ana elektrik sisteminden izole edilmiş ve büyük akımlarla zorlanması engellenmiş olur. Ayrıca cihazlar üzerinde çalışma yapan personelin can güvenliği de sağlanmış olmakla birlikte, ölçme işlemi sürekli ve daha ekonomik olmaktadır.

3.2. Akım Transformatörünün Yapısı

Bir akım transformatörünü oluşturan temel birimler primer sargı, sekonder sargı, manyetik nüve ve izolasyondur.

Akım transformatöründe ölçülmek istenen akımın uygulandığı iletken bölüm primer devre olarak tanımlanır. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi primer devre tek sipirli ya da sarmal yapıda olabilir. Genelde imalat problemlerinden ve kısa devre anında oluşabilecek kuvvetlerden dolayı primer sipir sayısının az olması istenir. Ama primer akımının küçük olduğu durumlarda istenen hassasiyeti yakalamak için primer sipir sayısı arttırılabilir.



Şekil 3.1. Ölçü akım transformatörünün iç yapısı; (a) Tek geçişli primer (b) Sarmal yapılı primer [26].

Sekonder sargı, genellikle toroid biçimindeki manyetik nüve üzerine sarılmış ve primer sargının etrafını çevreleyen sarımlardan oluşur. Nüvenin özelliğine ve amper-sarım oranına bağlı olarak primere uygulanan akımı indirgeyerek rölelere, ölçü aletlerine ileten kısımdır. Akım transformatörü, sekonder sargı uçları boştaki çok yüksek gerilimler indükleneneğinden dolayı ya yüksüz çalıştırılmamalı ya da kısa devre edilmelidir.

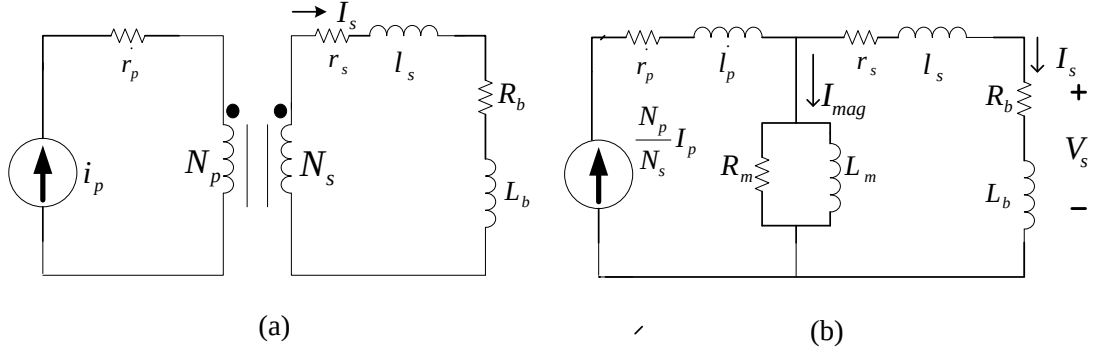
Primer sargı şebekeye seri olarak bağlandığından primer sargının sekonder sargıdan ve gövdeden yalıtılması gerekmektedir. Bu yalıtım işlemi, reçine, transformatör yağı gibi dielektrik dayanımı yüksek olan izolasyon malzemeleri ile yapılmaktadır.

3.3. Akım Transformatörü Çalışma Prensibi

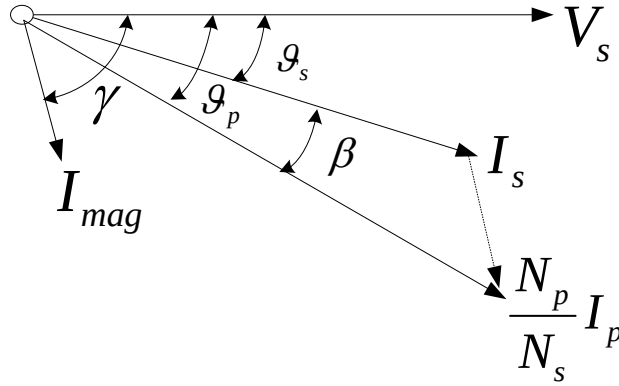
Akım transformatörünün primerine ölçülmek istenen şebeke akımı uygulandığında, bu akımla primer çevresinde bir manyetik alan oluşur. Oluşan bu manyetik alan toroid şeklindeki nüveye etki eder ve bu etki nüvede bir manyetik akı oluşmasını sağlar. Nüvede oluşan bu manyetik akı, nüvenin manyetik geçirgenliği ve kesiti ile doğru orantılıdır. Bu manyetik akı sekonder sargı uçlarında zıt elektromotor kuvvet indüklenmesine neden olur. İndüklenen bu zıt elektromotor kuvvet ile bir yük üzerinden devresi tamamlanan sekonder sargıdan akım geçer. Bu sayede primerden geçen şebeke akımı çevirme oranına bağlı olarak sekondere aktarılmış olur. Akım transformatörü eşdeğer devresi ve fazör diyagramı sırası ile Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de görülmektedir. Akım transformatörün temel eşitliği amper-tur prensibine dayanmaktadır [27].

$$N_p i_p = N_s i_s \quad (3.1)$$

N_p ve N_s sırası ile primer ve sekonder sarım sayıları, i_p ve i_s ise sırası ile primer ve sekonder akımını ifade etmektedir. Sekonder devreye bağlanan ölçü aletlerini temsil eden, $Z_b = R_b + j\omega L_b$ empedansı Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Akım transformatörü (a) Bağlantı şeması (b) Eşdeğer devresi (lineer model).



Şekil 3.3. Akım transformatörü fazör diyagramı.

Burada;

$(N_p/N_s)I_p$ primer akımının sekonder tarafa indirgenmiş hali,

r_p ' primer sargı direncinin sekonder tarafa indirgenmiş hali,

l_p ' primer kaçak endüktansının sekonder tarafa indirgenmiş hali,

r_s sekonder sargı direnci,

l_s sekonder kaçak endüktansı,

L_m mıknatıslanma endüktansı,

R_m , manyetik nüve direnci ΔP_{Fe} manyetik çekirdekteki histerisiz ve eddy

akım kayıplarını göstermek üzere $R_m = V_s^2 / \Delta P_{Fe}$ olarak tanımlanmıştır.

Kirchhoff akım yasasına göre;

$$\frac{N_p}{N_s} I_p = I_s + I_{mag} \quad (3.2)$$

olduğu görülmektedir.

Sekonder gerilimi V_s ;

$$V_s = (R_b + j\omega L_b) I_s \quad (3.3)$$

olarak ifade edilir.

Denklem (3.2)'de sekonder tarafta ölçülen akımın $(N_p/N_s)I_p$ yerine I_s akımı olduğu, bu iki akım arasındaki bağıntı ve aralarındaki farkın mıknatıslanma akımından kaynaklandığı görülmektedir. Akı, mıknatıslanma akımının doğrusal olmayan bir fonksiyon olduğu için, manyetik hata doğrusal değildir. Yük, frekans ve nominal dönüştürme oranının bir fonksiyonudur. Bu bağıntı Şekil 3.2 (b)'de görülmektedir. Burada, yük ile buna paralel olan manyetik devrede var olan endüktanslar frekansla değişir ve bu sebeple mıknatıslanma akımı artar veya azalır. Mıknatıslanma akımının akım transformatöründe iki ana hataya sebep olur. Bunlardan biri primer ve sekonder akımları arasındaki faz kayması olarak tanımlanan faz hatası diğeri de akım transformatörünün beyan dönüştürme oranının gerçek dönüştürme oranına eşit olmadığı genlik hatasıdır.

Bu hatalar Denklem (3.4) ve Denklem (3.5) deki gibi formüle edilirler;

i. Faz hatası

$$\beta \approx \tan^{-1} \left[\frac{I_{mag} \sin(\gamma - \vartheta)}{\frac{N_p}{N_s} I_p - I_{mag} \cos(\gamma - \vartheta)} \right] \quad (3.4)$$

ii. Genlik hatası (Oran Düzeltme Faktörü olarak karakterize edilmiştir)

$$ODF = \frac{N_p}{N_s} \frac{|I_p|}{|I_s|} \quad (3.5)$$

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

Bu hatalar, özellikle faz açısı hatası β , güç ölçümünün doğruluğunu etkilemektedir.

Ayrıca akım transformatörünün manyetik devresinde bulunan L_m endüktansı, histeresiz etkisinden dolayı manyetik devreden geçen akıya bağlı olarak lineer olmayan bir özellik gösterir. Bu durum da akım transformatörünün hata değerlerini değiştirmektedir. Yani akım transformatörünün çalışması manyetik devrenin lineer olmayan özelliğinden de etkilenmektedir. Histeresiz ve saturasyon etkisinin incelenmesi için öncelikle L_m endüktansının lineer olmayan değişimi ifade edilmelidir.

L_m endüktansının bağıntısı sinüzoidal şartlar için elektrik devre temellerinden bilinen endüktans akımı bağıntısı yardımıyla çıkarılabilir. R_m , ihmal edilebileceği için uyartım akımı I_{mag} , L_m 'den geçen mıknatıslanma akımı i_m 'ye eşit kabul edilebilir.

$$i_m = \frac{1}{L_m} \int e \cdot dt \quad (3.6)$$

$$e = N \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.7)$$

Denlem (3.6), Denklem (3.7) aracılığıyla yeniden düzenlenirse

$$i_m = \frac{1}{L_m} \cdot N \cdot \varphi \quad (3.8)$$

elde edilir.

$\varphi = B \cdot A_c$, $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$ ve $H = \frac{N_2 \cdot I_m}{l_c}$ olduğundan Denklem (3.8) Denklem

(3.9)'daki gibi yazılarak L_m 'nin değişimini gösteren bağıntı elde edilmiş olur.

$$L_m = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_2^2 \cdot A_c \cdot \frac{1}{L_c} \quad (3.9)$$

L_m ; nüvenin endüktansı [H],

φ ; manyetik akı [Tesla.cm²],

μ_0 ; boşluğun geçirgenliği (permeability) $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m],

μ_r ; nüvenin bağıl manyetik geçirgenliği,

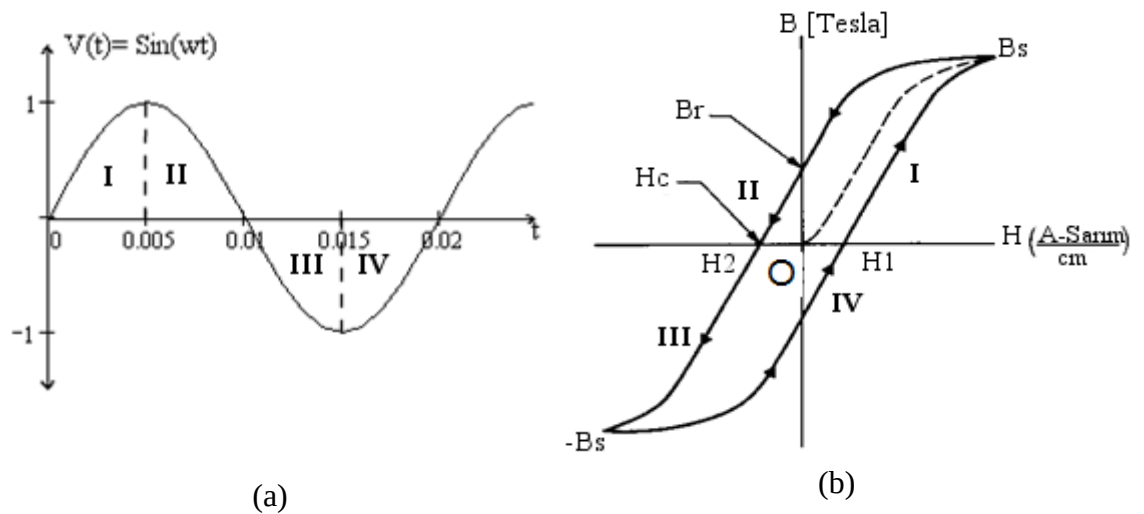
N_2 ; akım transformatörünün sekonderinin siper sayısı,

A_c ; nüvenin kesiti [m²],

l_c ; nüvedeki ortalama akı yolu [m] ifade etmektedir.

Nüvenin manyetik geçirgenliğini ifade eden μ_r hariç Denklem (3.9) daki diğer ifadeler sabit değerlerdir. Nüveyi oluşturan malzemenin cinsine ve ferromanyetik malzemenin domeyn (bölge) yapısına bağlı olarak μ_r farklılık gösterebilir. Manyetik akının geçebilmesi ve nüvenin mıknatıslanması için domeynlerin yönlenmesi gerekir [28]. Bu yönelme sırasında nüvede kayıplar meydana gelir. Bu kayıplar manyetik çekirdeğin mıknatıslanmasını sağlayan reaktif kayıplar ve malzemenin ısınmasına yol açan demir kayıplarıdır.

Nüvenin bağıl manyetik geçirgenliği, nüveden geçen akının şiddetine, yoğunluğuna, akı kaynağının özelliğine (AA, DA...vb) bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim doğrusal olmayıp son konumuna bağlı olarak ardıl izlem gösteren histresiz eğrisi ya da diğer bir deyişle B-H eğrisi ile ifade edilebilmektedir [28] [29].

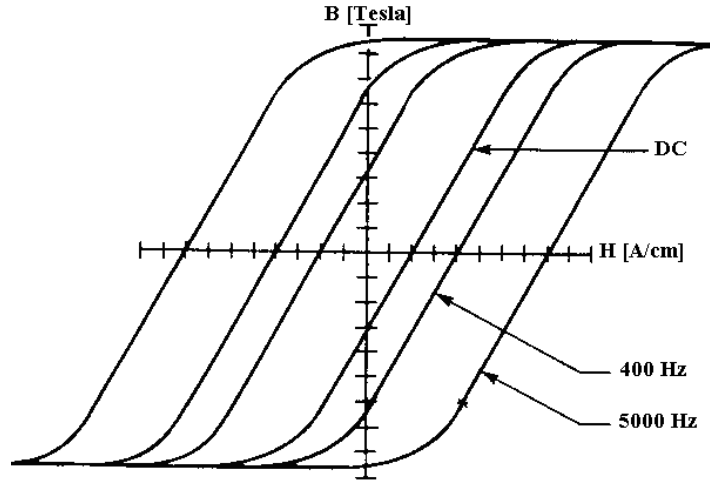


Şekil 3.4. (a) Sinüzoidal kaynak, (b) Ferromanyetik nüvenin histresiz çevrimi[12].

Sinüzoidal kaynak için manyetik bir malzemenin mıknatıslanma eğrisi ile ilgili tam çevrim Şekil 3.4 (b)'de görülmektedir. Nüve Şekil 3.4 (a)'da görüldüğü gibi sinüzoidal bir kaynak tarafından üretilen bir manyetik alan şiddetine maruz kaldığında kaynağın her çeyrek alternansı için histeresiz çevriminin bir bölgesindeki eğri elde edilmektedir.

Nüve histeresiz çevriminin başlangıcında nötrdür. Yani domeynlerinin hiç yönlenmemiş olduğu kabul edilir. Manyetik alan şiddeti H arttırıldıkça, manyetik akı yoğunluğu B artar ve O noktasından B_s saturasyon noktasına kadar lineer olmayan bir eğri elde edilir. Elde edilen bu ilk eğri mıknatıslanma eğrisi olarak kabul edilebilir. Sonrasında manyetik alan H azaltılarak sıfır yapılsa bile B sıfır olmaz. B_r 'ye kadar bir azalma gösterir. Buna çekirdekteki artık (remenans) akı yoğunluğu denir. Mıknatısiyetin ortadan kalkabilmesi için negatif yönde H_2 noktasına denk gelen H_c (coercive force) kadar zorlayıcı manyetik alan şiddetinin uygulanması gerekmektedir. Negatif yönde doyuma gidene kadar H azaltılmaya devam edilirse malzeme birinci eğrinin tam tersi konumunda mıknatıslanır. Ters yöndeki bu mıknatıslanma sıfırlanmak üzere H arttırıldığında H_1 noktasına gelinerek dördüncü eğri çizilir. Böylece Şekil 3.4 (a) gösterilen bir tam dalganın nüvede oluşturduğu uyarım eğrisi elde edilir. Nüvenin bir kez mıknatıslandıktan sonra mıknatısiyetini ortadan kaldırmak için zorlayıcı (coercive) manyetik alan şiddetinin uygulanmasının gerekmesi enerji kaybı anlamına gelmektedir. Bu nedenle histeresiz çevriminin içindeki kapalı alan nüvedeki enerji kaybını göstermektedir [28], [29].

Akım transformatörün nüvesindeki bütün domenler yönlendikten sonra manyetik alan şiddeti ne kadar arttırılırsa arttırılsın magnetik akı yoğunluğu B belli bir değerin üstüne çıkmaz. Bu duruma nüvenin doyuma, saturasyona girmesi adı verilir. Böylece sekonder sargıda belli bir değerden sonra daha fazla gerilim endüklenmez. Doyum bölgesinde veya yüksek frekanslarla çalışan nüvede, lineer bölgedekine oranla daha fazla ısınmalar söz konusu olur [29], hatta uzun süreli çalışmalarda aşırı ısınmalar ortaya çıkarak akım trafosunun sekonder devresinin izolasyonun zarar görmesine neden olabilir. B - H çevrimi kaynak frekansından da etkilenir; frekansın artması nüvenin daha geç doyuma girmesini sebep olur. Şekil 3.5'de aynı nüvenin farklı frekanslar için çıkartılmış histeresiz eğrisi yer almaktadır. Şekilde görüldüğü gibi frekans arttıkça nüveyi mıknatıslamak ve saturasyona sokmak için uygulanması gereken manyetik alan şiddeti ve artık mıknatısiyet de artmaktadır.



Şekil 3.5. Farklı frekanslar için B-H çevrimi [14].

3.4. Akım Transformatörünün Çeşitleri

Akım transformatörlerini kullanım amacına ve fiziksel yapı farklılıklarına göre iki farklı sınıflandırma yapmak mümkündür.

Kullanım amacına göre [30];

- Ölçü akım transformatörleri
- Koruma akım transformatörleri

Fiziksel yapı farklılıkları bakımından [31];

- Bara tipi
- Geçiş izolatör tipi
- Kablo tipi
- Mesnet tipi
- Manyetik devresi açılan (split core)

Bölümün son iki başlığında akım transformatörünün kullanım amacına göre sınıflandırılması hakkında kısaca bilgi verilecektir.

3.4.1. Ölçü Akım Transformatörü

Normal işletme koşullarında belirli bir sınıra kadar olan sistem akımını ölçme amacıyla kullanılan akım transformatörlerine ölçü akım transformatörü denir. Bu transformatörlere ampermetre, wattmetrelerin akım bobinleri, elektrik sayaçları, güç faktörü ölçüm cihazları vb. cihazlar bağlanır. Böylece enerji üretim ve tüketim miktarlarının ölçülmesi sağlanır. Ayrıca akım transformatörünün sekonderine bağlı

olan bu cihazların izolasyon dayanımı ve akım kapasiteleri sınırlı olduğu için bunların zarar görmesi de engellenmiş olur.

Akım transformatörlerini tanımlayan temel parametreler mevcuttur. Transformatörler seçilirken bu parametrelere dikkat edilmesi gereklidir.

Bunlar;

- Cihazın azami gerilimi; Akım transformatörünün çalıştırılabileceği azami gerilim seviyesini göstermektedir. Transformatörün dizaynı, izolasyon mesafeleri ve boyutları bu gerilim seviyesi dikkate alınarak yapılır.
- Çevirme oranı; Transformatör sargıları arasındaki nominal akım çevirme oranını belirtmektedir.
- Sekonder Yük (burden); Akım transformatörünün doğruluk sınıfına uygun olarak sekonderinde tüketilebilecek azami güç değerini VA olarak belirtir. Bu güç değeri sekonder devreye bağlanacak olan ölçü aletleri, röleler ve bağlantı kabloları için gereken toplam güçtür. Eğer bu güç değerinin altında veya üstünde güç tüketilirse akım transformatörü doğruluk sınıfına uygun çalışmaz.
- Hassasiyet (doğruluk) sınıfı; Primer sargıdan geçen akımın sekonder akımına indirgenmesi sırasında sekonder akımında oluşabilecek hata miktarının sınırlarını belirlemektedir. Ölçü akım transformatörü primer akımı sekonder akıma dönüştürürken oluşabilecek iki tip temel hata vardır:

1. Faz hatası (FH); ölçüm sırasında oluşan faz farkı hatasıdır, birimi dakika veya santiradyan'dır.

$$\varphi_{FH} = \varphi_P - \varphi_S \quad (3.10)$$

φ_P ; primer akımının açısı

φ_S ; sekonder akımının açısı

2. Genlik hatası ($\%GH$); efektif dönüştürme oranı hatasıdır,

$$\%GH = \frac{(K_n \cdot I_S - I_P) \cdot 100}{I_P} \quad (3.11)$$

K_n ; nominal dönüştürme oranı ($150/5A=30$),

I_P ; primerden geçen gerçek (actual) akım değeri,

I_S ; primerden I_P akımı geçerken sekonderden ölçülen akımdır.

Ölçü akım transformatörünün hassasiyet sınıfı primer akımı nominal akımın %5 ile %120'si arasında iken, sekonder yükünün %25 ile %100 değerleri için verilir [32].

Tablo 3.1’de ölçü akım transformatörünün bazı doğruluk sınıflarına göre akım ve faz hatası sınırları verilmiştir.

Tablo 3.1. Ölçü akım transformatörü akım hatası ve faz hatası sınırları [32].

Doğruluk sınıfı (Accuracy class)	(±) Nominal akım yüzdesine göre akım hatası (%)				(±) Nominal akım yüzdesine göre faz açısı hatası (dakika)			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0.1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5
0.2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0.5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30
1.0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60

- Emniyet faktörü “n”(FS); Sekondere bağlanan ölçü aletlerinin aşırı akımlar ile zarar görmesini engellemek için belirlenmiştir. Bu katsayı ile primer akımının nominal değerinin belli bir katından büyük değerlerde transformatörün doyuma gitmesi sağlanmaktadır. Örneğin 150/5A’lık bir akım transformatöründe, eğer FS faktörü 5 olarak belirlenmişse, buna göre primer devrede nominal akımın 10 misli bir akım (1.5kA) geçtiğinde sekonderde, nominal sekonder akımının beş mislinden daha büyük (25A) ve üzerinde- bir akım değeri görülmelidir. Bunun için primerden 750A geçmeden önce transformatör doyuma girmelidir. Böylece sekonder akımının primer akımı ile aynı oranda yükselmesi ve sekondere bağlı ölçü aletlerinin aşırı akımlara maruz kalması sonucunda zarar görmesi engellenmiş olur.
- Sürekli termik akımı (I_{cth}); Akım transformatörünün çalışabileceği sürekli termal akım değerini belirler. Nominal akım değerinin katları olarak belirlenir.
- Kısa devre akımı (I_{th}); Transformatörün kısa süreli arıza akımlarında fiziksel olarak dayanabileceği maksimum akım değerini belirler. Bu akımlar genellikle 1sn ya da 3sn olarak belirlenir.

3.4.2. Koruma Akım Transformatörü

Koruma akım transformatörleri enerji sisteminde, normal işletme koşulları dışında oluşabilecek aşırı akımları sekonder tarafa bağlı koruma ekipmanları ve rölelere belirli bir oranda iletirler. Koruma akım transformatörlerinin sistemde istenmeyen böyle durumlarda koruma ekipmanlarına kısa süre içinde ve doğru bilgi

vermeleri hem enerji sisteminin hem de elektrik makinelerinin korunması açısından hayati önem taşımaktadır. Bu transformatörlerin normal işletme koşullarında da sınıflarına uygun ölçüm yapmaları için, ölçü transformatörleri gibi doyuma gitmeleri istenmez, daha geniş bir bölgede çalışmaktadırlar.

Koruma tipi akım transformatörleri genlik ve faz hatasına ek olarak bileşik hata ile de tanımlanırlar.

Bileşik hata ($\% \varepsilon_b$); koruma akım transformatörlerinin; aşırı akımları, harmonikli akımları ve kısa devre akımlarını belirlenmiş bir değere kadar sekondere iletmesi gerekmektedir. Bu iletim sırasında oluşabilecek hata, bileşik hata ile tanımlanmaktadır. Diğer hata tipleri gibi kararlı hal (steady state) için geçerlidir. Primer ve sekonder akımlarının anlık değerleri dikkate alınarak hesaplanır. Bunu sebebi kısa devre ve aşırı akım durumlarında, primer akımının veya nüvenin ya da her ikisinin saturasyon bölgesine yaklaşmasıyla sekonder akımının bozulmasıdır.

$$\varepsilon_b = \frac{100}{I_p} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n \cdot i_s - i_p)^2 dt} \quad (3.12)$$

Burada;

i_p ; anlık primer akımını,

i_s ; anlık sekonder akımını

I_p ; primerden geçen gerçek (actual) akım değerini temsil etmektedir.

Faz hatası ve bileşik hatada anlık akım değerlerinden yararlanılmaktadır. Böylece hem sinüzoidal hem de sinüzoidal olmayan şartları bir ölçüde yansıtabilmektedir. Genlik hatasın da efektif değerler ile hesaplamalar yapıldığından sinüzoidal olmayan şartlar yeterince yansıtılamamaktadır.

Koruma akım transformatörlerinin hassasiyet sınıfları ve hata miktarları Tablo 3.2’de sunulmuştur. Koruma akım transformatörleri ölçü akım transformatörlerinden farklı olarak hata ölçümü nominal akım ve nominal yükte yapılmaktadır.

Tablo 3.2. Koruma akım transformatörlerinin hata sınırları [30].

Doğruluk sınıfı	Nominal primer akımındaki hata (%)	Nominal primer akımında faz açısı hatası		Hassasiyet sınıfı aşırı akım faktöründeki bileşik hata değeri (%)
		Dakika	Santiradyan	
5P	± 1	± 60	± 1.8	5
10P	± 3	-	-	10

3.5. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde akım transformatörlerinin tanımı, çeşitleri, içyapısı, temel çalışma prensibi hakkında bilgi verilmiştir. Lineer devre modeli çıkarılarak akım transformatörünün yaptığı ölçüm hatalarına kısaca değinilmiştir.

4. AKIM TRANSFORMATÖRÜNÜN DOĞRULUĞUNUN SİMÜLASYONLA İNCELENMESİ

4.1. Giriş

Bu bölümde ölçü akım transformatörünün doğruluğunun sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlarda nasıl bir değişim gösterdiği EMTP'nin ATP versiyonunda yapılacak simülasyon çalışmalarıyla incelenecektir. Öncelikle gerçek bir akım transformatöründen elde edilen veriler kullanılarak, bir akım transformatörü modeli oluşturulacak ve oluşturulan akım transformatörü modelinin sağlaması yapıldıktan sonra yukarıda belirtilen şartlar altında akım transformatörünün doğruluğu incelenecektir. Akım transformatörünün doğruluğu incelenirken, histeresiz olgusu ihmal edilip saturasyon etkisi dikkate alınacaktır [33].

4.2. ATP Paket Programı

ATP, elektrik güç sistemlerinde elektromanyetik geçiciliklerin (Transient) ve elektromekanik olayların dijital simülasyonunda kullanılan EMTP programının bugün en yaygın kullanılan versiyonudur. ATP programı iki farklı metot ile lineer olmayan elemanların kullanımına imkan sağlamaktadır. Bunlar, Gerçek Lineer olmayan Model (Type-93) ve Yaklaşık Lineer olmayan (Pseudo-Nonlinear) modeller (Type-96 ve Type-98) dir.

Gerçek lineer olmayan modelde lineer olmayan karakteristik lineer olmayan bir fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Bu akının akıma bağlı bir fonksiyonu gibi ($\psi=f(i)$) olabilir. Böylece iteratif Newton-Raphson metodu ile lineer olmayan denklemler çözümlenmektedir. Pseudo-lineer olmayan modelinde ise elemanların lineer olmayan karakteristiği küçük lineer parçalar olarak tanımlanır. Bu doğrusal parçalar, program içinde akım kaynağına paralel bağlı dirençlerle gösterilir. Böylece devreden geçen akım adım adım izlenerek, her bir adım için endüktansın hesaplanmasında kullanılacak en uygun lineer kısım belirlenmeye çalışılır. Ama bu metot her lineer parçacığı bir önceki lineer kısma bağlı olarak belirlediği için gerçek

bir model değildir. Bunun için bu metot da lineer olmayan karakteristiğın doğru bir simülasyonu için küçük akım aralıkları kullanmak gerekir.

Ayrıca ATP’de iki farklı manyetik saturasyon rutini bulunmaktadır:

- Saturasyon alt rutini, rms saturasyon eğrisini histeresiz çevrimi gözardı edilerek tepe değeri ψ -i datasına dönüştürür.
- Histeresiz alt rutini Type-96 Pseudo-lineer olmayan modelinde gerekli olan histeresiz çevrimini sağlamak üzere tasarlanmıştır.

Pseudo modeli, akım transformatörünün mıknatıslanma eğrisinin V_{rms} - I_{rms} datalarının CONVERT ile tepe değeri ψ -i datasına dönüştürülmüş halini kullanmaktadır. Ancak mıknatıslanma eğrisi 10 veya daha az nokta ile tanımlana bilmektedir. Zaten bu nedenle parçalı lineer model elde edilebilmektedir. Başlıca dezavantajı ise Type-96 histeretik reaktör modeli için data oluştururken akım transformatörünün mıknatıslanma eğrisine ait noktaların (tepe değeri ψ -i olarak) işlenmesinin gerekmesidir [34].

4.3. İncelenen Akım Transformatörü ve ATP Test Devresinin Oluşturulması

Doğruluğu incelenen ölçü akım transformatörüne ait bilgiler sırası ile Tablo 4.1 ve Şekil 4.1 de verilmiştir.

Tablo 4.1. Kullanılan ölçü akım transformatörüne ait bilgiler.

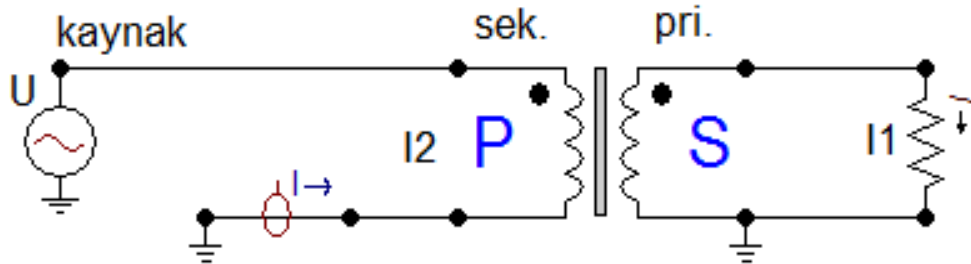
Akım transformatörü bilgileri	200/5A cl 0,5 10VA $I_{dyn}=2.5 \times I_{th}$ $I_{th}=60I_n$
Çevirme oranı	2005A
Hassasiyet sınıfı	0.5
Hassasiyet sınır aşırı akım faktörü “n”	5
Sekonder yükü	10VA
Nominal dinamik akımı	$I_{dyn} = 2.5 \times I_{th}$
Kısa devre akımı	$I_{th}=60kA$ (1sn)



Şekil 4.1. Kullanılan ölçü akım transformatörü resmi.

Akım transformatörünün doğrulunun testi için yapılacak simülasyon çalışmalarında “saturable transformer (saturable 1 phase)” modeli kullanılacak ve öncelikle modelin mıknatıslanma eğrisine göre dönüştürme oranı doğruluğu test edilecektir.

ATP, simülasyon için akı-akım verisini kullanmaktadır. Yani girilen V-I datasını kendi içinde akı-akım datasına dönüştürür [34]. Bu dönüştürmede hata olma olasılığına karşın transformatör modunun test edilmesi gerekmektedir [35]. Böylece sekonder sargının mıknatıslanma eğrine göre çalışıp çalışmadığı test edilmiş olacaktır. Şekil 4.2’de bu test için kurulan devre görülmektedir. ATP ‘de saturable 1 phase modeli gerilim transformatörü mantığına göre düzenlendiğinden simülasyonda “P” sekonder tarafı, “S” ise primer devreyi göstermektedir.



Şekil 4.2. Transformatör test devresi.

Test devresi kurulduktan sonra saturable transformatörünün özellikleri Tablo 4.2 ‘ye göre girilir [32], [33].

Tablo 4.2. Saturable transformatör için girilen veriler.

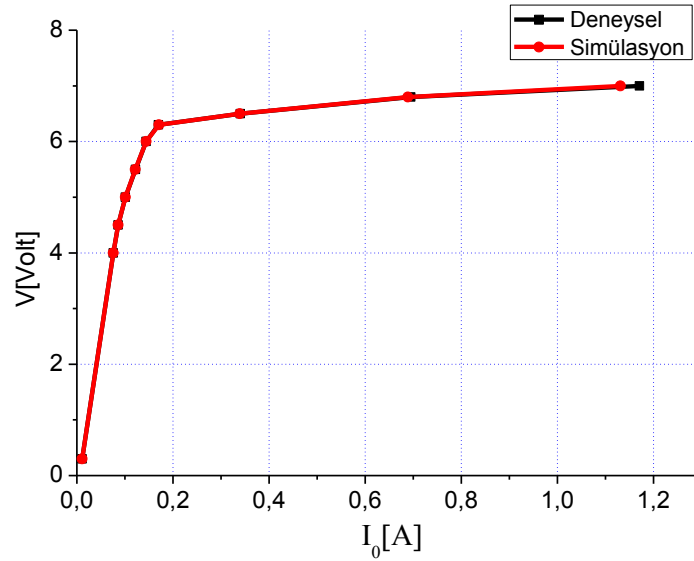
DEĞER	TANIMI
I0=0	Kararlı halde (steady state) nüvedeki akım
F0=0	Kararlı halde nüvedeki akı (Wb-sarım)
RMAG=0	Nüvenin direnci (Ω)
RP=0.2	Akım trf.'nün 75°deki sekonder sargısının direnci (Ω)
LP=0	Sekonder endüktansı.(Eğer “Xopt=power freq.” (Ω), “Xopt=0” (mH)
VRP=40	Sekonder akımı 1A kabul edilmek üzere primer akımı (200A / 5A = 40A/1A)
RS=0	Primer sargısının direnci [ohm]
LS=1E-7	Primer sargısının endüktansı.
VRS=1	Sekonder akımı
RMS=1	Mıknatıslanma eğrisi (0→i / Ø (akım/ akı), 1→ I/V (akım/volt))

Test devresinde saturable transformatörünün “attributes” kısmına Tablo 4.2 ‘deki veriler girildikten sonra karakteristik kısmına da Tablo 4.3’de verilen ve incelenen akım transformatörüne ait deneysel olarak elde edilmiş mıknatıslanma eğrisinden belirlenen maksimum 10 nokta seçilerek girilir. Bunun sebebi EMTP/ATP’de mıknatıslanma eğrisinin maksimum 10 nokta ile tanımlanmasındandır.

Tablo 4.3. Akım transformatörünün mıknatıslanma eğrisi noktaları.

Deneysel Veriler		Simülasyon sonucu
V (volt)	I (Amp)	I (Amp)
0,3	0,011	0,011
4	0,076	0,076
4,5	0,086	0,086
5	0,101	0,101
5,5	0,122	0,121
6	0,144	0,144
6,3	0,17	0,171
6,5	0,34	0,338
6,8	0,695	0,689
7	1,171	1,131

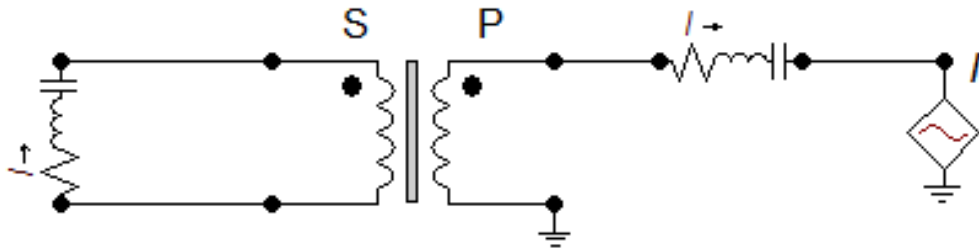
Deneyisel ve simülasyon verilerinin tutarlılığı Şekil 4.3'den de görülmektedir. Bu sonuçlar akım transformatörü modelinin doğru çalıştığını göstermektedir.



Şekil 4.3. Ölçüm ve simülasyon sonucu elde edilen mıknatıslanma akımı.

4.4. Akım Transformatörünün Simülasyon Devresi ve Kaynak Dalga Şeklinin Doğruluğa Etkisi

Bu bölümde akım transformatörünün doğruluğu test edilmiş modeli ile simülasyon devresi oluşturulacak ve kaynak dalga şekline göre genlik ve faz hatası değişimi incelenecektir. Şekil 4.4'de akım transformatörünün hata tespiti için kullanılan model görülmektedir.



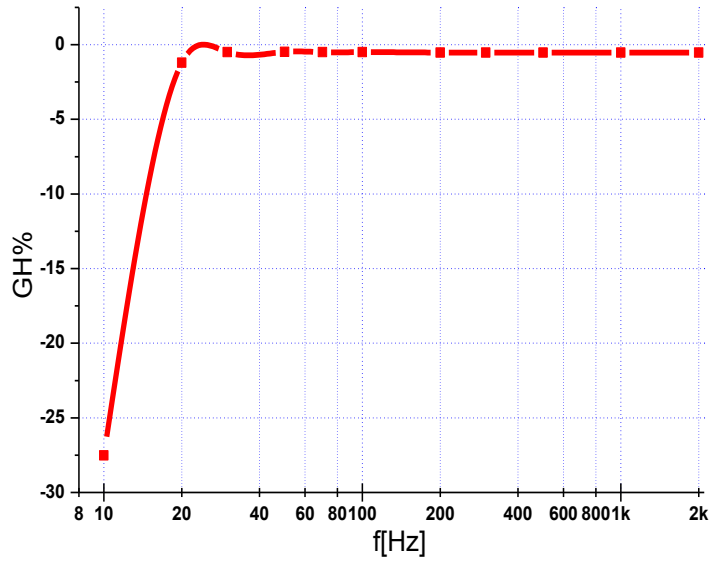
Şekil 4.4. Akım transformatörü doğruluk testi modeli.

Şekil 4.4'de görüldüğü gibi primer ve sekonder tarafa RLC yük bağlanmıştır. Burada akım kaynağı bağlı taraf primer devredir. Simülasyonda primer ait yükler, etkisi olmadığından ihmal edilmiştir. Sekonder tarafa bağlı RLC ise bu tarafa bağlanan sekonder yüklerini (röleler, ölçü aletleri, kablolar, vs.) ifade eder. Tablo 4.1'e göre

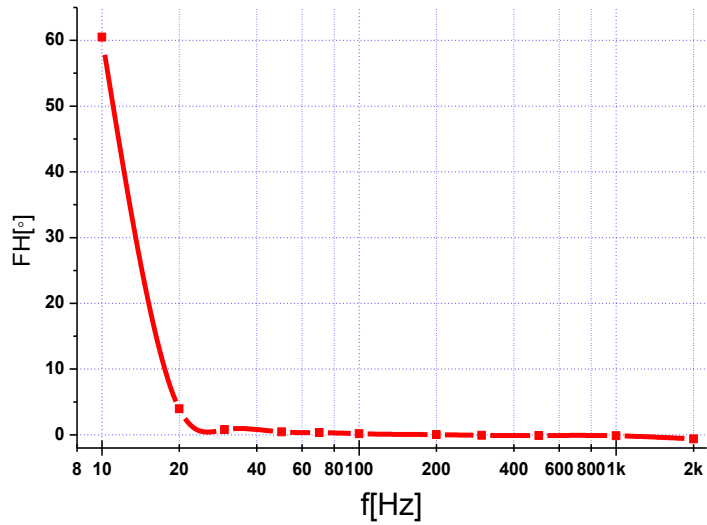
test edilen akım transformatörü sekonder yükü 10VA'dır ve $\cos\phi$ 0,8 için $R_y=0,32\ \Omega$ ve $L_y=0,764\text{mH}$ olarak hesaplanır.

4.4.1. Sinüzoidal Şartların Etkisi

Sinüzoidal şartların akım transformatörünün doğruluğuna etkisi nominal akım 200A(rms) sabit iken frekansa bağlı olarak incelenmiştir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sırası ile frekansa bağlı olarak genlik ve faz hatası değişimi verilmiştir. Faz hatası Denklem (3.10) da verildiği gibi primer ve sekonder akımları arasındaki faz farkından ve genlik hatası ise Denklem (3.11) den hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. Frekansa bağlı genlik hatası değişimi.

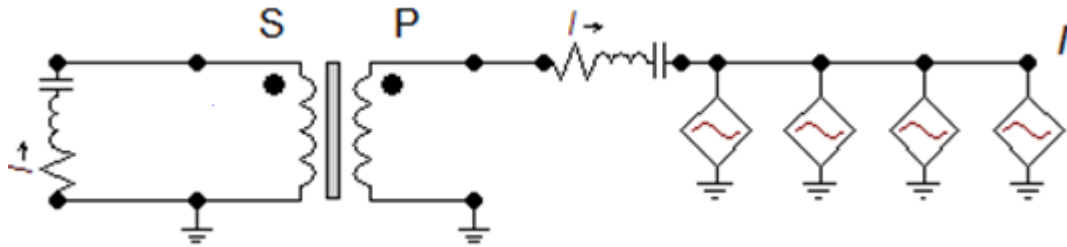


Şekil 4.6. Frekansa bağlı faz hatası değişimi.

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 birlikte incelendiğinde frekansa bağlı olarak genlik ve faz hatasının temel frekansın (50 Hz) altında büyük oranda arttığı ve bu frekansın üstünde ise giderek azaldığı görülmektedir [35].

4.4.2. Sinüzoidal Olmayan Şartların Etkisi

Sinüzoidal olmayan dalgaların şebekede nasıl oluştuğu ve sistemi nasıl etkilediği hakkında geniş bilgi Bölüm 2’de verilmiştir. Şekil 4.7’de verilen simülasyon devresiyle bu tip dalga formlarının akım transformatörüne etkileri incelenmiştir.



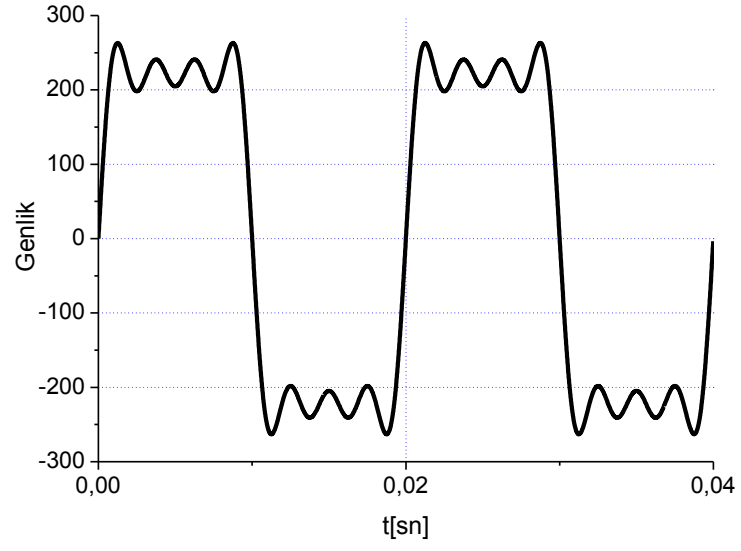
Şekil 4.7. Sinüzoidal olmayan şartlarda akım transformatörü modeli.

Analizler nominal akımın yüzdesine bağlı olarak ve frekansı 50 Hz iken, önce tek sayılı harmonikler ile (3., 5., 7.,...) daha sonra çift sayılı harmonikler (2., 4., 6.,...) harmonik akımları I_{temel}/I_h olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.4’de akım transformatörüne uygulanan akımların harmonik içerikleri verilmiştir.

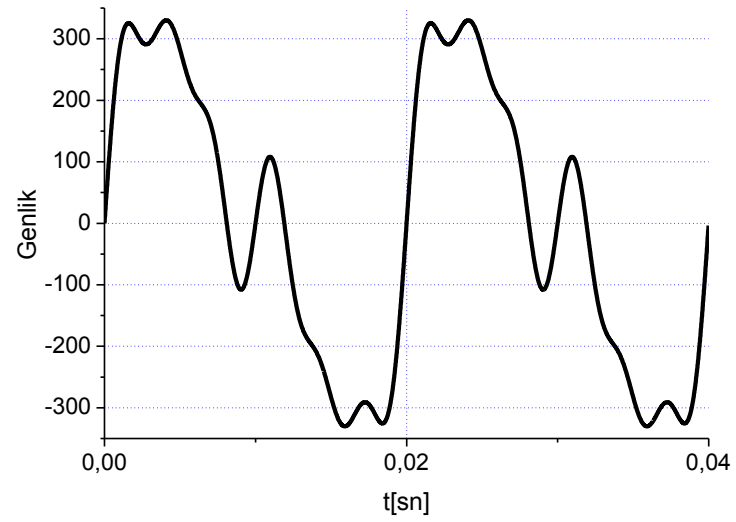
Tablo 4.4. Akım transformatörüne uygulanan akımların harmonik içerikleri.

Test Adı	Harmonik numarası									%THD
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Tek harmonikler	%100		%33,3		%20		%14,2		%11,1	%41
Çift harmonikler	%100	%50		%25		%16,6		%12,5		%58

Akım transformatörüne uygulanan ve detayları Tablo 4.4’de verilen sinüzoidal olmayan dalga formları Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.9’daki sonuçlar incelendiğinde doğru akım bileşeni içermeyen temel frekansın (50Hz) üzerindeki tek ve çift sayılı harmoniklerin akım transformatörünün genlik ve faz hatasına olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Özellikle faz hatası 0,45°’den 0,09° seviyelerine inmektedir.

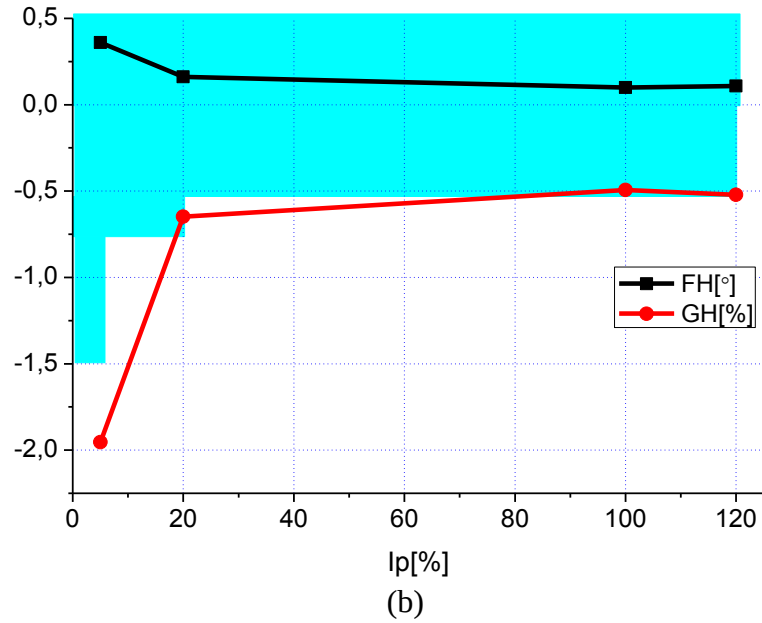
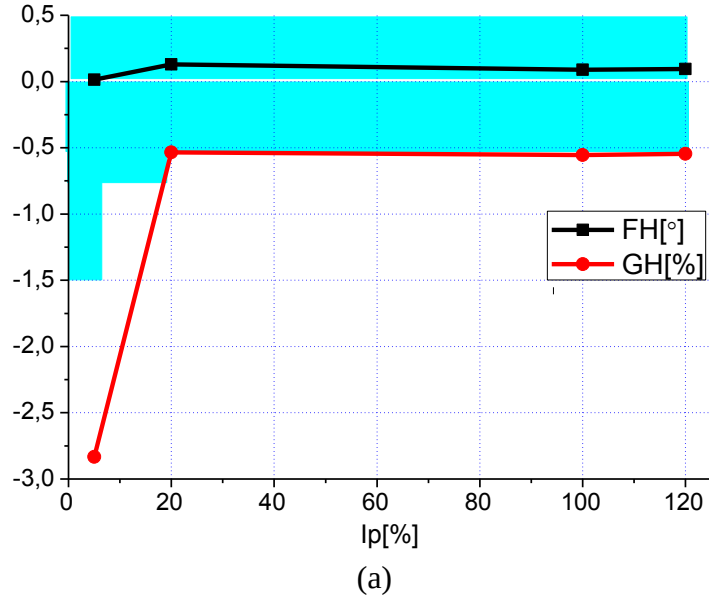


(a)



(b)

Şekil 4.8. Sinüzoidal olmayan dalga formları (a) Tek harmonikler (b) Çift harmonikler



Şekil 4.9. Genlik ve Faz hatası a) Teksayılı harmonikler b) Çift sayılı harmonikler.

4.5. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde ATP aracılığıyla histerezis olgusu ihmal edilip saturasyon etkisi dikkate alınarak akım transformatörünün modeli oluşturulmuştur. Modeli oluşturulan akım transformatörü kısaca tanıtılmış ve modelin hassasiyeti, sinüzoidal uyarımda yapılan laboratuvar testleri ile doğrulanmıştır. Sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlarda parametrik analiz yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde alt harmoniklerin ölçü tipi akım transformatörünün performansını olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir.

5. AKIM TRANSFORMATÖRÜNÜN DOĞRULUĞUNUN DENEYSEL İNCELENMESİ

5.1. Giriş

Bir önceki bölümde akım transformatörünün doğruluğu simülasyon ile incelenmişti. Simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi alt harmoniklerin ölçü tipi akım transformatörünün performansını olumsuz yönde etkilediği belirlenmişti. Simülasyon çalışmalarında histerezis olayı yeterli veri olmadığı için modellenememişti. Ancak bu bölümde ölçü akım transformatörünün doğruluğu sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan durumlarda deneysel olarak inceleneceği için histerezis olayının da etkisi incelenmiş olacaktır.

Bu bölümde öncelikle analizler için kullanılacak deney sistemi hakkında bilgi verilecektir. Yeterli hassasiyetin sağlanabilmesi için yapılan düzenlemeler detaylandırıldıktan sonra sistemde yapılan testler detaylandırılacaktır.

5.2. Deney Sisteminin Belirlenmesi

Akım transformatörünün doğruluk analizinin iki farklı deney sistemi ile gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Aşağıda sırası ile verilecek bu deney sistemlerinden ilk kurulan deney sistemi 1, analiz için gerek ve yeterli olan ölçüm hassasiyetine sahip olmadığı için ikinci bir deney sistemi kurulmuştur. Bu deney sistemi için yapılan hassasiyet ölçümleri olumlu sonuçlandığından analizler deney sistemi 2 ile gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. Deney Sistemi 1

Akım transformatörünün doğruluk analizini deneysel olarak incelemek için kurulan deney sistemi 1’de iki alçak gerilim ölçü akım transformatörü Şekil 5.1’deki gibi kaskat bağlanmıştır. Kullanılan akım transformatörlerine ait bilgiler Tablo 5.1’de verilmiştir.



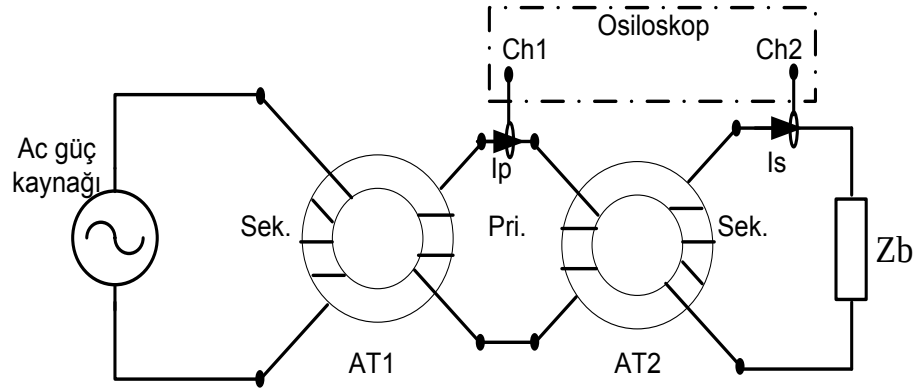
Şekil 5.1. Kullanılan ölçü akım transformatörlerinin resmi.

Tablo 5.1. Kullanılan ölçü akım transformatörlerine ait bilgiler.

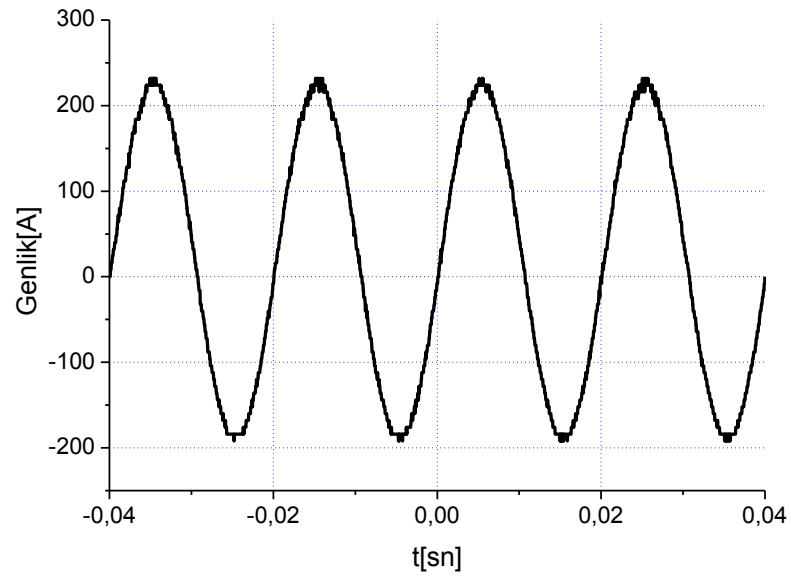
$k=I_{pn}/I_{sn}$	200/5 A/A	150/5 A/A
Nominal yük	10 VA	10 VA
Sınıf	0.5	0.5
Frekans	50 Hz	50 Hz

Transformatörlerden 200/5A dönüştürme oranına sahip akım transformatörü yükseltici transformatör olarak, 150/5A dönüştürme oranına sahip akım transformatörü ise doğruluk analizi yapılacak olan transformatör olarak kullanılmıştır. Transformatörlerin farklı dönüştürme oranlarında seçilmesi, standartlarda performans analizinin nominal akımının %5'i ile %120'si arasında yapılması sebebiyledir. Böylece performansı incelenen 150A/5A ölçü akım transformatörünün nominal akımının %120'si olan 180A'de deneyler gerçekleştirilebilecektir. Deney sistemin bağlantı şeması Şekil 5.2'deki gibidir.

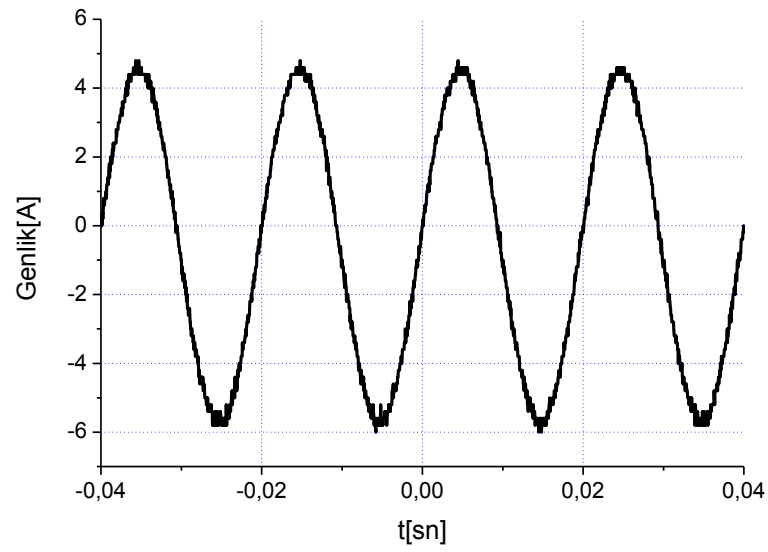
Ölçümler öncelikle deney sisteminin hassasiyetini belirlemek için yapılmıştır. Bunun için doğruluk analizi gerçekleştirilecek olan ölçü akım transformatörünün (150A/5A) nominal akımı olan 150 amper primer devreye uygulanmış ve nominal akımdaki hata ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları Şekil 5.3'de görülmektedir. Ölçüm için gerekli olan 150A primer akımı, yükseltici olarak kullanılan akım transformatörünün sekonderine alternatif gerilim uygulanarak elde edilmiştir. Deney sisteminde California Instruments 3001ix 3kVA programlanabilir güç kaynağı, tekroniks osiloskop ve i1000s fluke aa akım probu kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Deney sistemi bağlantı şeması.



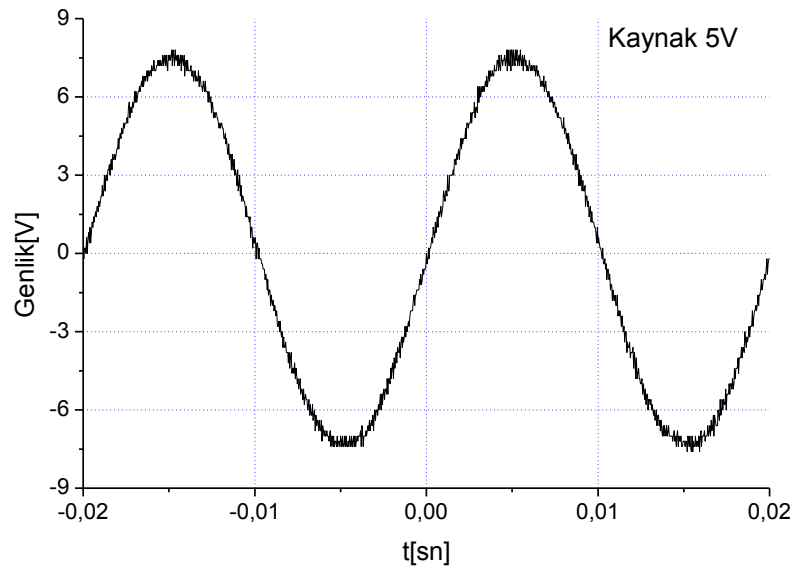
(a)



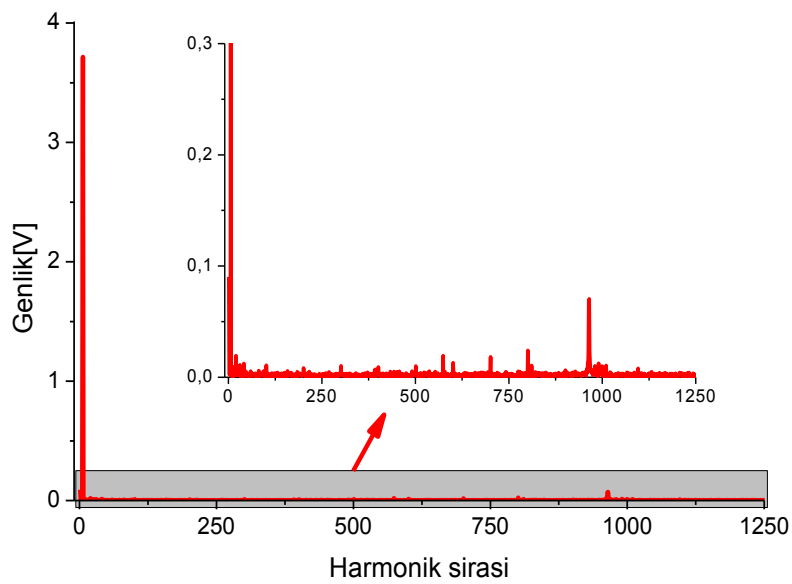
(b)

Şekil 5.3. AT2 transformatörü (a) Primer akımı (b) Sekonder akımı.

Şekil 5.3'den görülen sekonder ve primer akımlarıyla 50Hz frekansta hesaplanan genlik hatası %1,175'dir. Akım transformatörü bu ölçüm sistemiyle nominal akım, nominal yük ve 50Hz frekansta standartta [32] %0,5 olması gereken genlik hata sınırının çok üstündedir. Bunun sebebi doğruluk analizi için akım transformatörüne uygulanan primer akımının yükseltici transformatöre uygulanan aa gerilimle elde edilmesidir. Yükseltici transformatöre uygulana bu alternatif gerilim 0,3volt ile 6,0volt aralığında değişmektedir. Programlanabilir güç kaynağı tarafından uygulanan bu gerilim dalga formu Şekil 5.4'de, bu dalga formuna ait harmonik spektrumu ise Şekil 5.5'de görülmektedir.

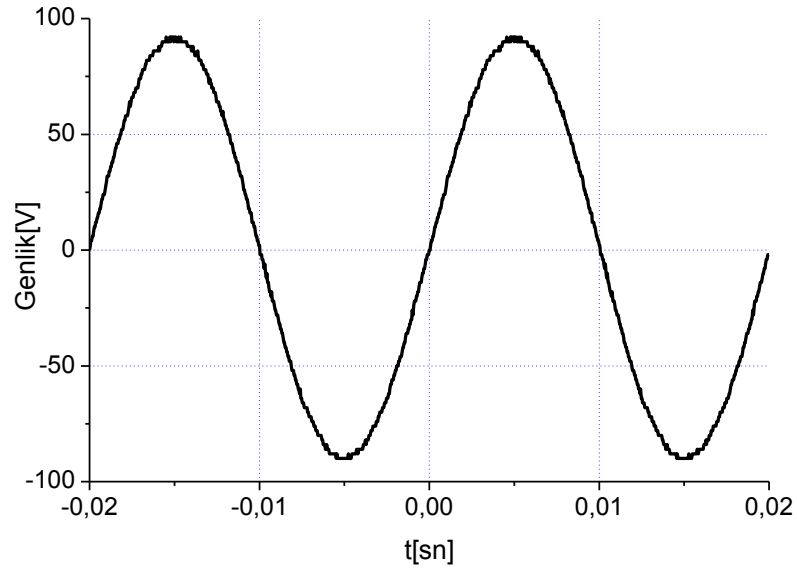


Şekil 5.4. Güç kaynağı çıkış gerilimi dalga formu.

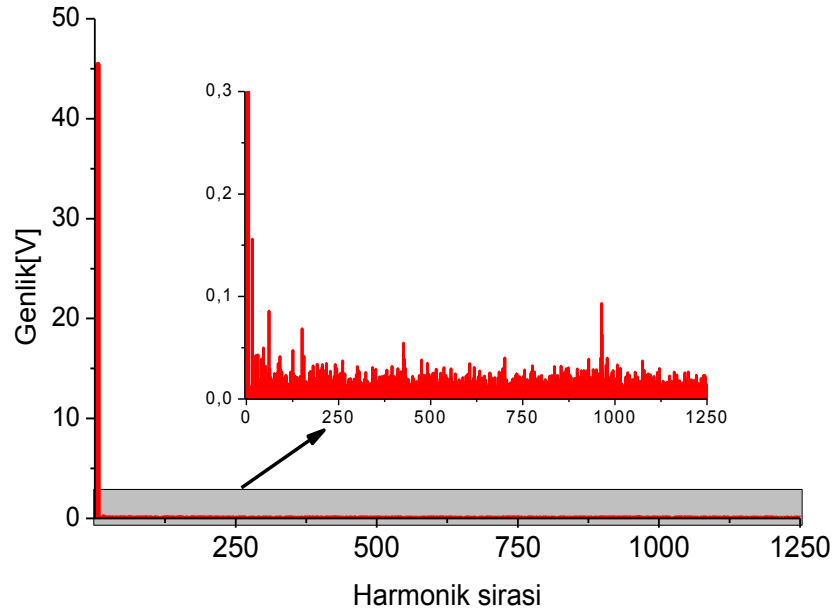


Şekil 5.5. Kaynak gerilimi harmonik spektrumu (5volt).

Şekil 5.4’de görülen aa gerilim, 150 amper nominal primer akımının elde edilmesi için uygulanan gerilimdir. Bu akım dalga formu için hesaplanan THD (Total harmonic distortion) %3.98’dir. Analiz için primer tarafa uygulanacak akım değeri düştükçe, yükseltici transformatörün sekonder tarafına uygulanması gereken gerilim değeri de azalmakta bununla birlikte gerilim dalga formundaki gürültü artmaktadır. Programlanabilir güç kaynağının yapısı gereği küçük gerilimlerde sebep olduğu bu gürültüden kurtulmak için kaynağın çalışma geriliminin yükseltilmesi gerekmektedir. Bu ölçüm sistemiyle analize devam etmek ve alternatif güç kaynağını yüksek gerilim değeri ile çalıştırmak için deney sistemine varyak eklenerek ölçümler tekrar gerçekleştirilmiştir. Böylece programlanabilir güç kaynağının uygulayacağı gerilim 60volt gibi bir değere yükseltilerek kaynak gürültüsü engellenebilecek ve sisteme eklenen varyak ile de bu gerilim primer akımı için gerekli olan 0,3volt ile 6volt arasında ayarlanabilecektir. Programlanabilir güç kaynağının 60volt gerilim değerindeki gerilim dalga formu ve %THD’si Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir ve hesaplanan THD %1,328’dir.



Şekil 5.6. Kaynak gerilimi dalga formu (60volt)

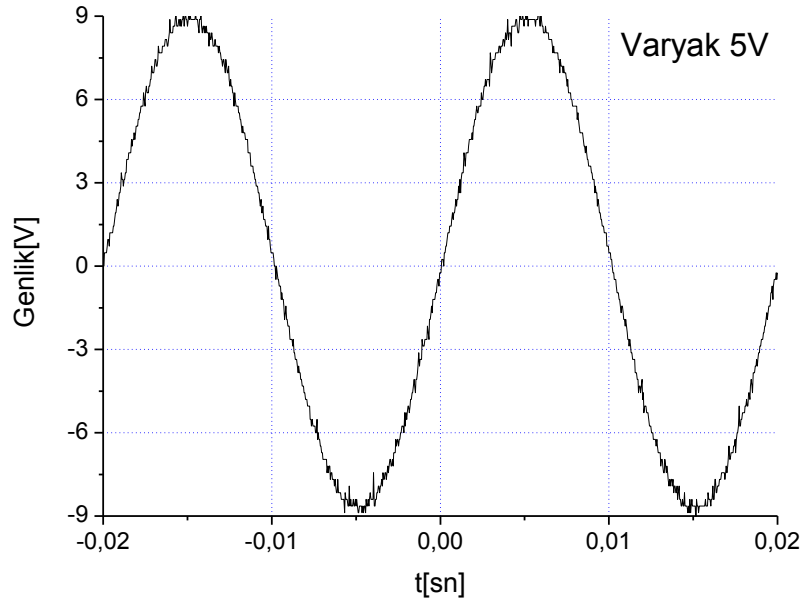


Şekil 5.7. Kaynak gerilimi harmonik spektrumu (60volt)

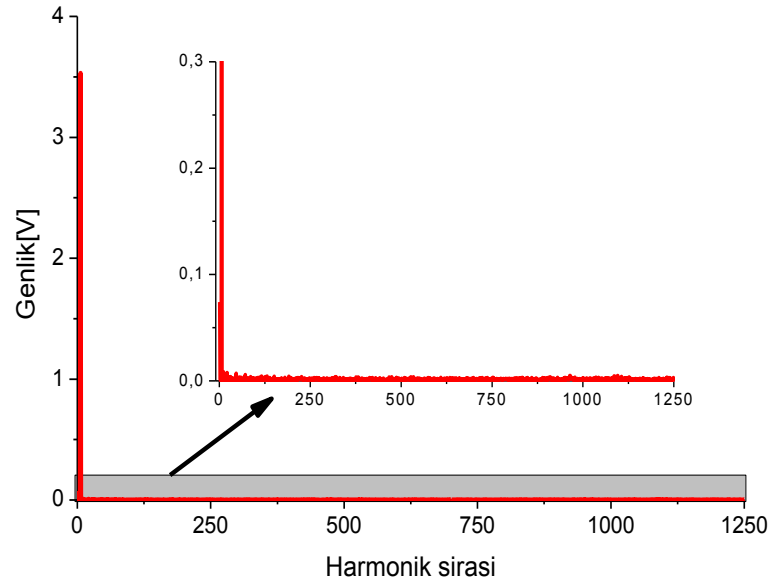
Görüldüğü gibi kaynak yüksek gerilim ile çalıştırılarak THD %2,5 oranında azaltılmıştır. Sisteme eklenen varyak resmi Şekil 5.8’de görülmektedir. Varyak aracılığı ile uygulanan gerilimin dalga formu ise Şekil 5.9’ da verilmiştir. Bu gerilim dalga formuna ait harmonik spektrumu ise Şekil 5.10’da görülmektedir ve hesaplanan THD %1.715’dir. Sistemin son halinde kullanılan varyak ile sistem THD’si %2 oranında azaltılmıştır.



Şekil 5.8. Sisteme eklenen varyak resmi



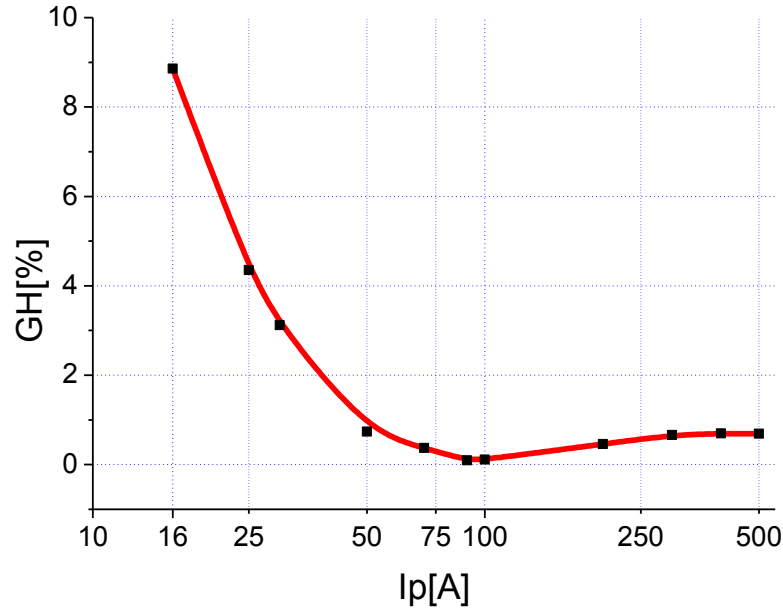
Şekil 5.9. Varyak ile uygulanan gerilim dalga formu



Şekil 5.10. Varyakgerilimi harmonik spektrumu.

Varyak ile düzenlenen bu ölçüm sistemiyle frekansa bağlı genlik hatası sonucu Şekil 5.11’de verilmiştir. Temel frekansta ölçülen genlik hatası %0,979’dur. Kullanılan varyağın ölçüm sisteminin hassasiyetini iyileştirdiği görülmektedir. Fakat akım transformatörü bu ölçüm sistemiyle de nominal akım, nominal yük ve 50Hz frekansta standartta [32] belirtilen hata sınırını üstündedir. Ayrıca frekansa bağlı yapılan analiz sonuçları da, literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında doğru sonuç vermediği görülmektedir [5]-[16]. Bu sebeple her iki ölçüm sistemi de gerekli

hassasiyete sahip olmadığından analizler için uygun olmadığına karar verilmiş ve bu sistemlerle analize devam edilmemiştir. Ancak sistem için uygun bir gerilim kaynağı ile veya kullanılan gerilim kaynağında yapılacak iyileştirmelerle bu sistemde doğruluk analizi için kullanılabilir.



Şekil 5.11. Frekansa bağlı genlik hatası

Çalışmamız için hassasiyetini teyit ettiğimiz ve akım transformatörünün doğruluk analizini gerçekleştirdiğimiz bir sonraki deney sistemi, yapılan çalışmalar ile birlikte yeni bir başlıkta incelenmiştir.

5.2.2. Deney Sistemi 2

Akım transformatörünün sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlarda doğruluğun incelenmesi için bir önceki deney sisteminde Tablo 5.1’de verildiği gibi 150/5A alçak gerilim ölçü akım transformatörü kullanılmıştı. Fakat akım transformatörünün nominal akım değerinin büyük olması ve ölçüm sisteminin hassasiyetinin yeterli olmaması nedeniyle kurulan deney sistemi 2’de detayları ve resmi sırası ile Tablo 5.2 ve Şekil 5.12’de verilen orta gerilim ölçü akım transformatörü kullanılmıştır.

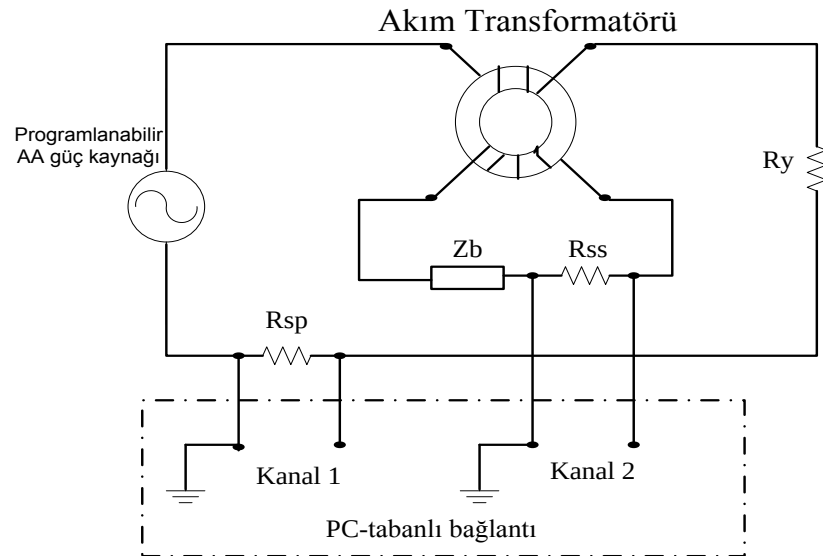
Tablo 5.2. Akım transformatörü etiket bilgileri.

$k=I_{pn}/I_{sn}$	10/5 A/A
Nominal yük	30 VA
Sınıf	0.5
Frekans	50 Hz

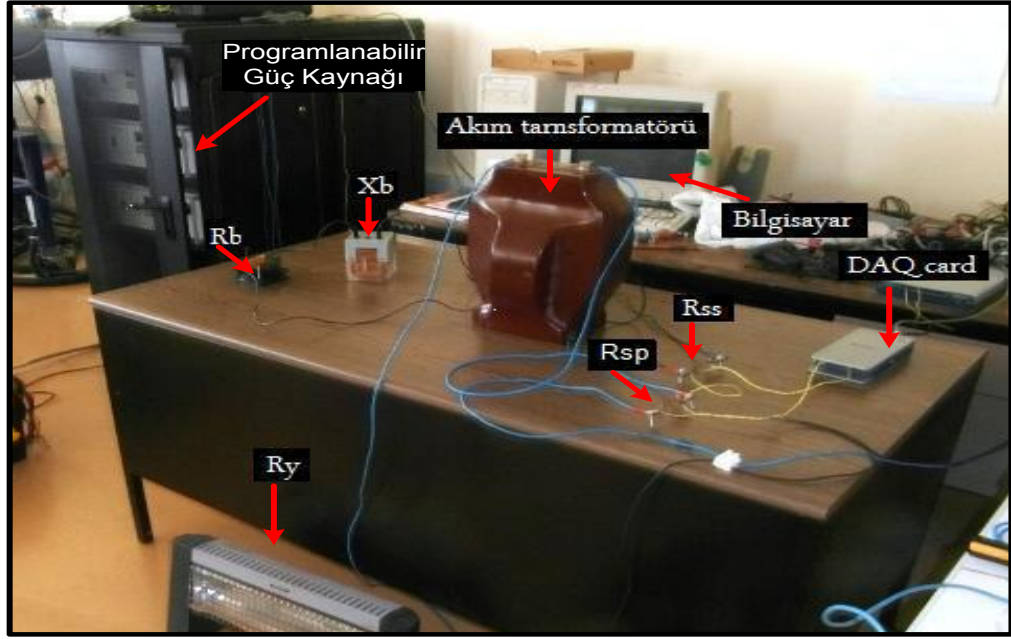


Şekil 5.12. Kullanılan ölçü akım transformatörü resmi.

Akım transformatörünün doğruluğunu incelemek için kullanılan deney sistemi prensip şeması ve resmi Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de verilmiştir.

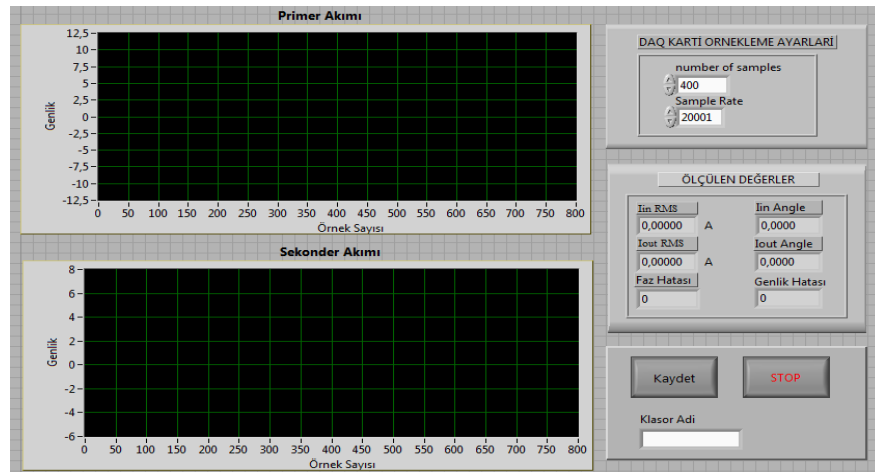


Şekil 5.13. Deney sistemi prensip şeması.

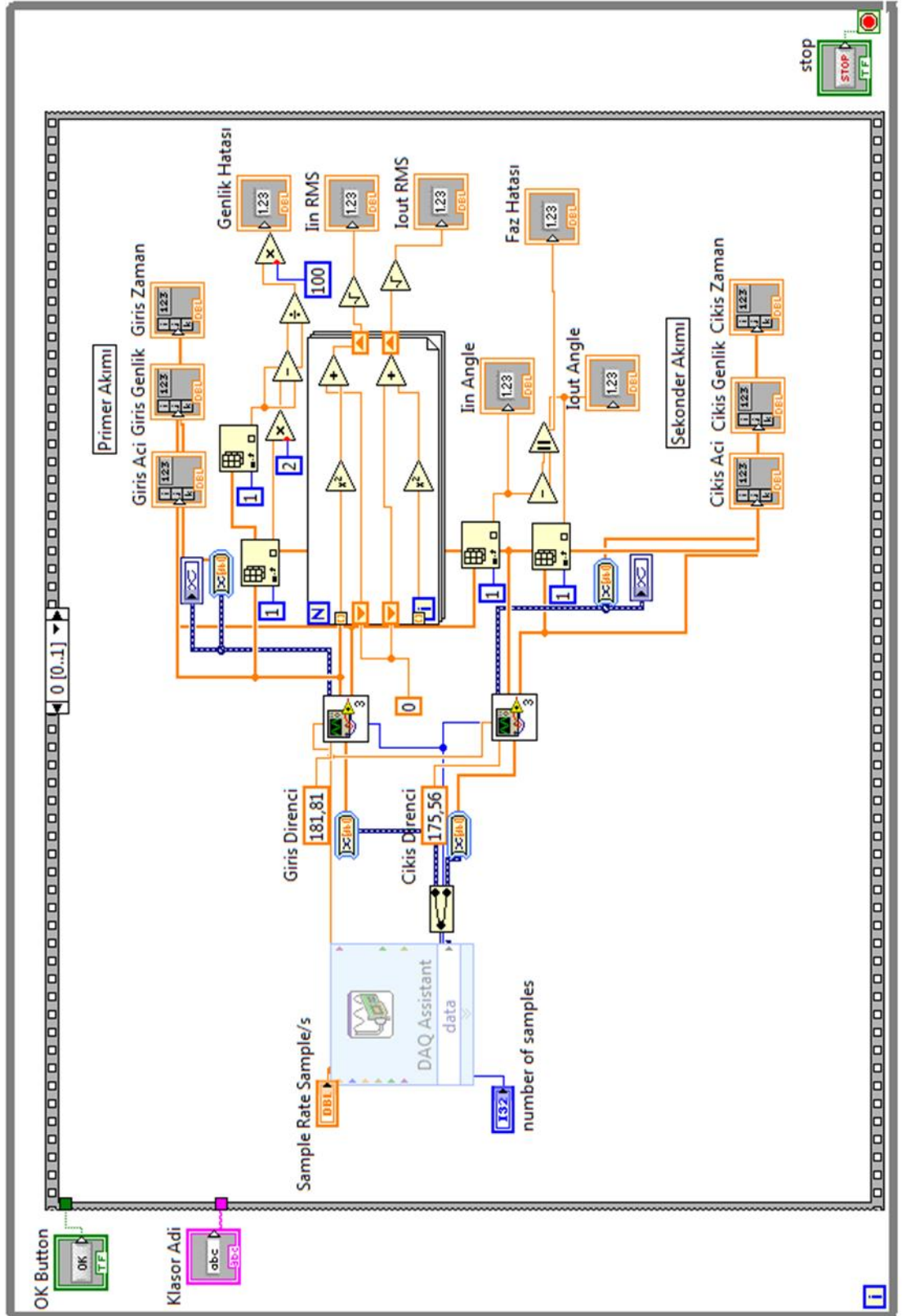


Şekil 5.14. Deney sistemi resmi.

Yapılacak ölçümler için primer akımı, California Instruments 3001ix 3kVA programlanabilir güç kaynağı ile gerilim olarak sentezlenecek ve seri bağlı sabit bir değere sahip rezistif R_y yük direncine uygulanarak aynı karakterde akım geçmesi sağlanacaktır. Ölçümler için primer ve sekonder tarafa R_{sp} ve R_{ss} akım şöntleri bağlanmıştır. Sekonder yükü, 30VA ve $\cos\phi=0,8$ için $Z_b=0,98+j0,69 \Omega$ olarak hesaplanmıştır. Sistemde 16 bit çözünürlüğe, 250 ks/s örnekleme hızına sahip NI model veri toplama kartı ve geliştirilen Labview arayüzü kullanılmıştır. Labview programına ait kontrol paneli ve blok diyagramı sırası ile Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.15. Geliştirilen labview programı kontrol paneli.



Şekil 5.16. Geliştirilen labview programı blok diyagramı.

5.3. Deneysel Çalışmalar

Yapılan deneysel çalışmalar iki ana grupta değerlendirilebilir. Birinci grup deneyler, ölçüm sisteminin doğrulunu kanıtlamayı hedeflemektedir. Bu amaçla literatürde etkisi incelenen ve bir önceki deney sisteminin hassasiyetinin de belirlenmesinde kullanılan, sinüzoidal şartlar altında frekansın etkisine bakılmıştır. İkinci grup deneyler de ise sinüzoidal olmayan şartların akım transformatörü üzerindeki etkisi incelenmektedir. Ölçüm hatası literatürde sunulmuş olan çalışmalardan farklı olarak varsayımsal harmonik akım bileşenlerin transformatör ölçüm hatasına etkisi yerine, çeşitli yüklere ait harmonikli akımların kollektif olarak transformatör ölçüm hatasına etkisi analiz edilmiştir. Öncelikli olarak simetrik ve asimetrik dalga formlarının etkisi incelenmiş, sonrasında ise günlük hayatta harmonik bozulmalara sebep olan 6 darbeli konvertör, 12 darbeli konvertör, AA kıyıcı ve yarım dalga doğrultucu ile elde edilen akım dalga formları kullanılmıştır.

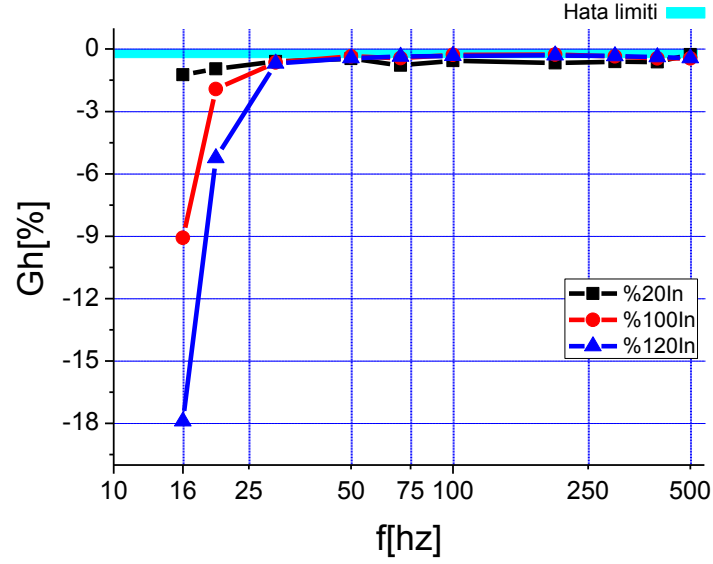
5.3.1. Sinüzoidal Şartlar Altında Frekansın Etkisi

Akım transformatörü sinüzoidal kaynağa bağlı iken frekansa bağlı hata analizi, primer akımı %20 In, %100 In ve %120 In olacak şekilde nominal yükte yapılmış ve Şekil 5.17, 5.18'deki sonuçlar elde edilmiştir.

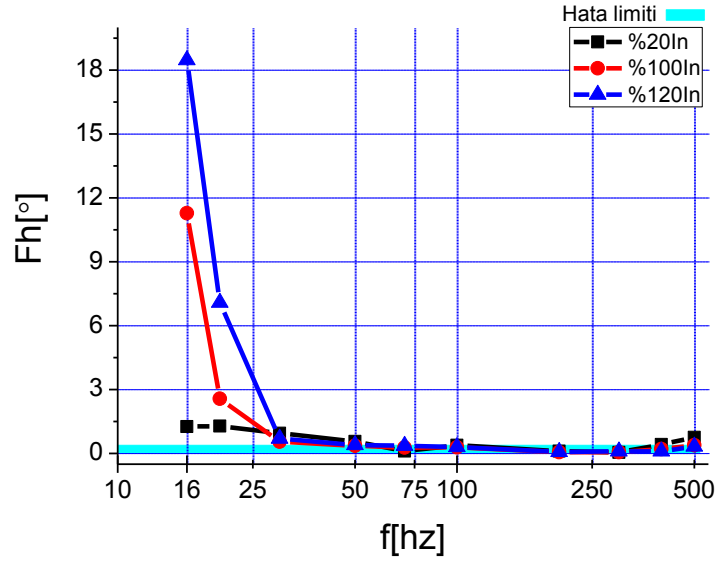
Grafikler incelendiğinde; 50Hz'in altındaki frekanslarda [13], [14], [15] genlik ve faz hatasının büyük oranda arttığı ve akım transformatörünün sınıfının dışına çıktığı, 50Hz'in üzerindeki frekanslarda ise hata miktarlarının giderek azaldığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'da %100 In primer akımı ve 50Hz temel frekans için genlik ve faz hatası incelendiğinde hatanın Tablo 5.3'de görüldüğü gibi standartlarda verilen sınırlar içinde olduğu gözükmemektedir ve buda ölçüm sisteminin hassasiyetinin güvenilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca sistemin nominal akımda ve temel frekanstaki akım dalga formu ve harmonik spektrumu Şekil 5.20'de verilmiştir. Bu akım dalga formunun THD'si %1,55'dir ve bu değerinde sistem hassasiyeti için uygun bir değerdir.

Tablo 5.3. Ölçüm sistemi hassasiyeti.

50Hz & In	Standart	DeneySEL Sonuç
GH (%)	0,5	-0,352
FH (°)	0,5	0,365



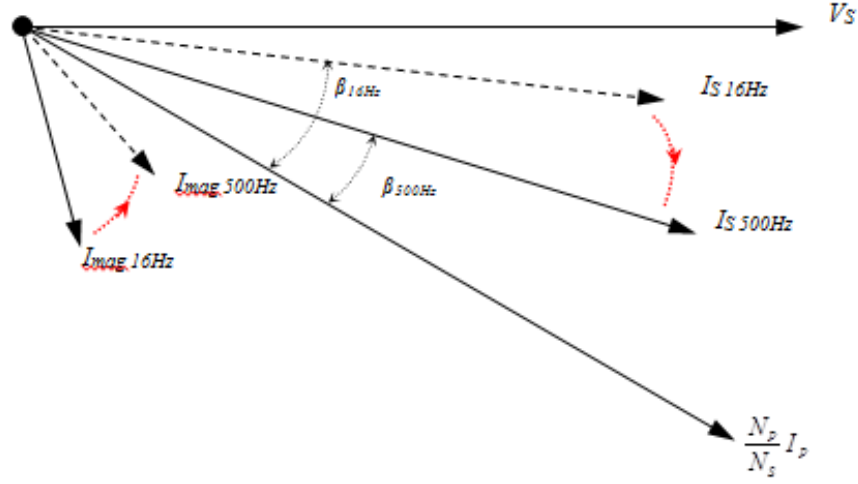
Şekil 5.17. Frekansa bağlı genlik hatası değişimi.



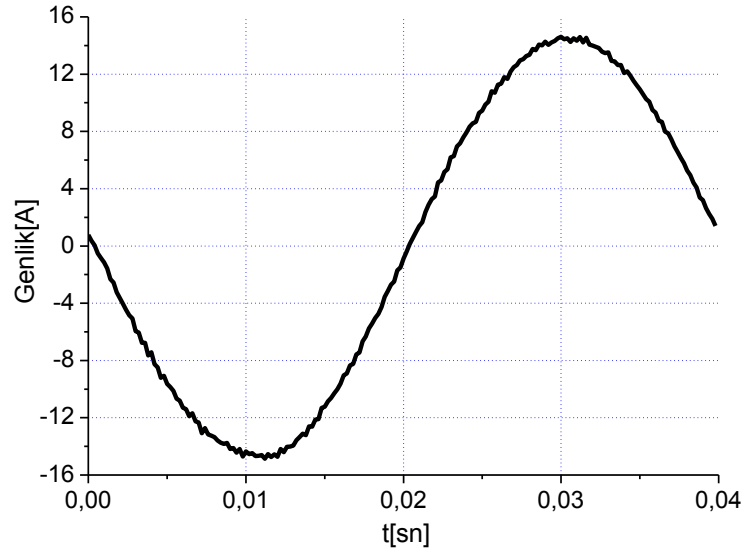
Şekil 5.18. Frekansa bağlı faz hatası değişimi.

Frekans bağılı olarak akım transformatörünün genlik ve faz hatasındaki bu değişim X_m magnetizasyon reaktansı ile açıklanabilir. X_m magnetizasyon reaktansı

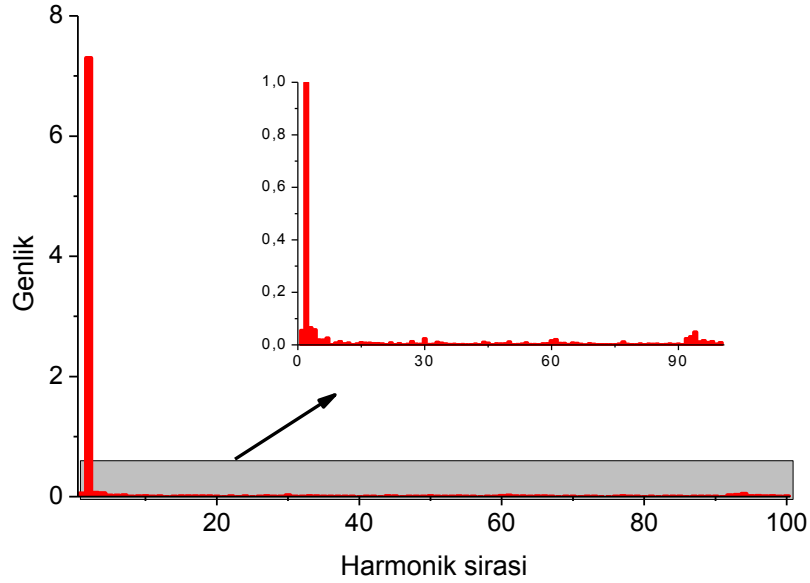
frekans arttıkça artmaktadır. Şekil 5.19'daki fazör diyagramında da görüldüğü gibi ölçüm frekansı 16Hz'den 500Hz'e arttırılırken I_{mag} , magnetizasyon akımı azalmakta, bununla birlikte I_S sekonder akımı artmaktadır. Akımlardaki bu değişime bağlı olarak genlik hatası ve faz hatası azalmaktadır.



Şekil 5.19. Hata fazör diagramı.



Şekil 5.20. Primer akımı dalga formu(10A)



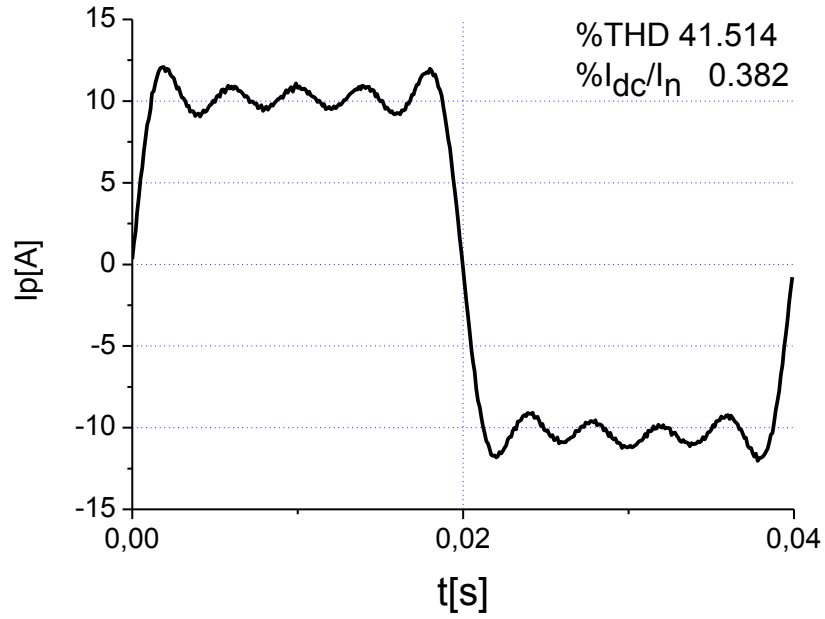
Şekil 5.21. Primer akımı harmonik spektrumu

5.3.2. Sinüzoidal Olmayan Şartların Etkisi

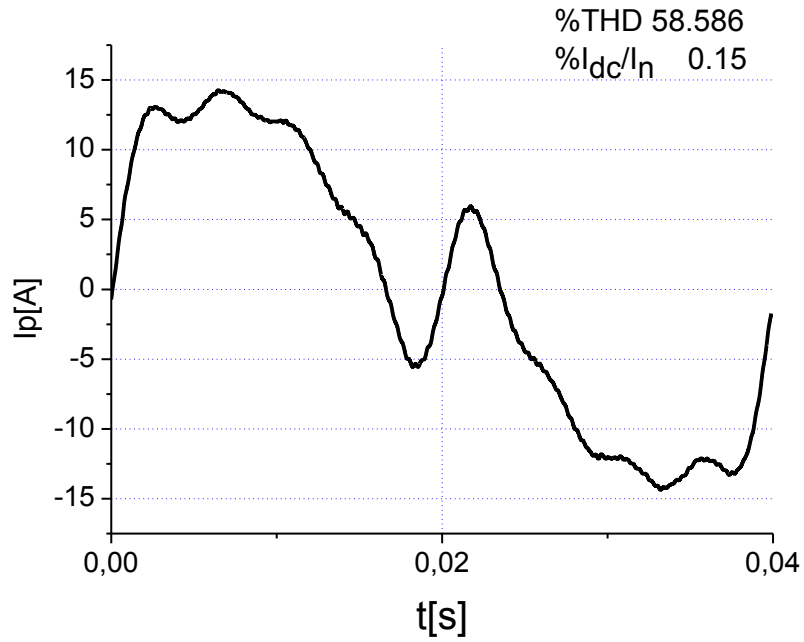
Sinüzoidal şartlarda frekansa bağlı olarak akım transformatörünün doğruluğunu inceleyip, deney sisteminin de hassasiyetini test ettikten sonra sinüzoidal olmayan şartların akım transformatörünün doğruluğuna etkisini incelemek için yüke bağımlı olarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Daha öncede bahsettiğimiz gibi sinüzoidal olmayan dalgalar sistemde, zaman eksenine göre periyodik simetrik veya periyodik asimetrik olabilir. Sinüzoidal olmayan dalga formu tek sayılı harmoniklerden oluşuyorsa periyodik simetrik, çift sayılı harmoniklerden oluşuyorsa periyodik asimetrik. Periyodik asimetrik dalgaların ortalama değeri sıfırdan farklı ise DA bileşen ortaya çıkmaktadır. Tipik olarak harmonikler, harmonik numarasının tersi büyüklüğünde değer alırlar [1]. Bu sebeple hata analizi yapılırken öncelikle harmonik akımları I_{temel}/I_h olacak şekilde belirlenip sırası ile tek sayılı harmonikler (THD_I %41) ve çift sayılı harmonikler (THD_I %58) olacak şekilde nominal akımın %5'i ve %120'si arasında akım dalga formları oluşturulmuş ve akım transformatörüne uygulanmıştır.

50Hz'in üzerindeki frekanslarda tek ve çift harmoniklere sahip akım dalga formları sırasıyla Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'de verilmiştir. Bu akım dalga formlarına sahip primer akımları için genlik ve faz hataları Şekil 5.24'de verilmiştir.



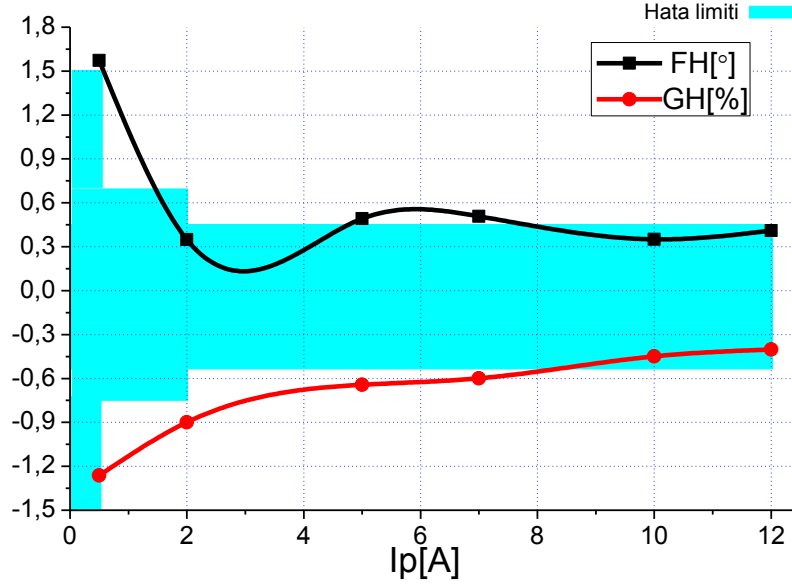
Şekil 5.22. Tek sayılı harmonikler primer akımı.



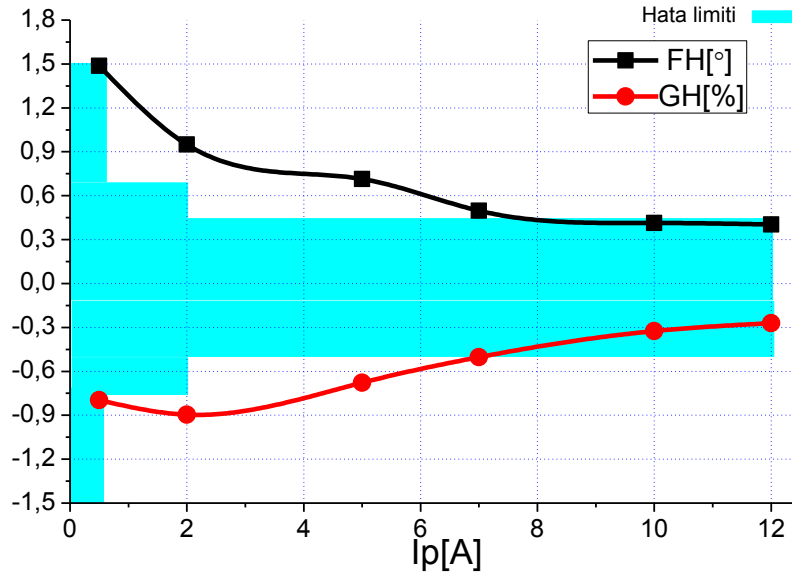
Şekil 5.23. Çift sayılı harmonikler primer akımı.

Genlik ve faz hatası Tablo 3.1 de verildiği gibi nominal akımının yüzdesine göre hesaplanmıştır. Şekil 5.24'deki sonuç grafiklerinde yer alan yeşil bölgeler akım transformatörünün nominal akımın oranına göre yapabileceği ve Tablo 3.1'de verilen hata limitlerini göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde her iki akım dalga formu için genlik hatasının nominal akımın altındaki akımlarda standartlarda verilen

limitlerin üstüne çıktığı, tek sayılı harmonikleri içeren akım dalga formunda faz hatasının standart da uygun olduğu buna karşın çift sayılı harmonikleri içeren akım dalga formunda ise nominal akımın altındaki değerlerde dikkate alınması gerektiği görülmektedir.



(a)

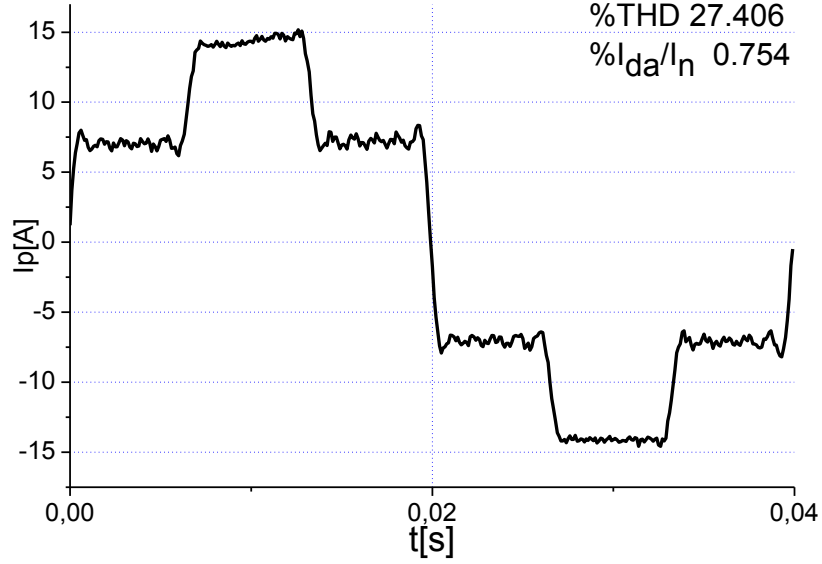


(b)

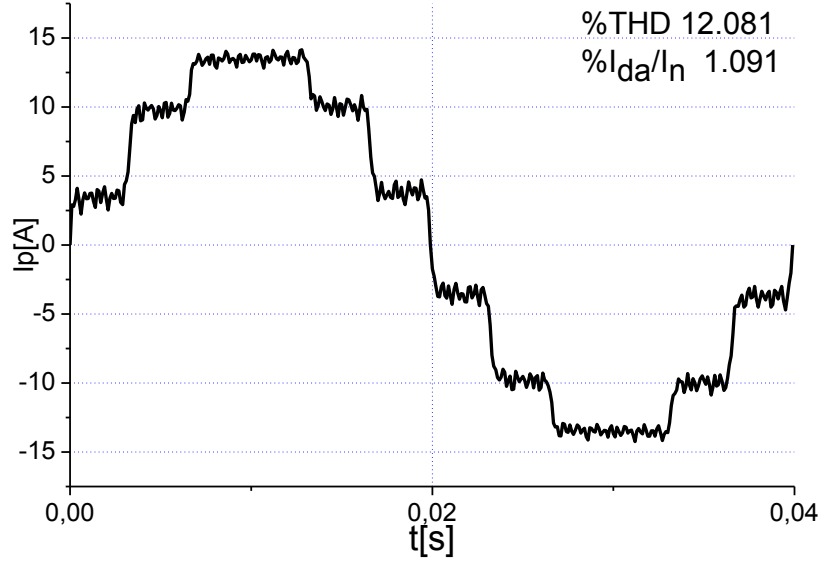
Şekil 5.24. Primer akımına karşılık akım ve faz hatası. (a) Temel harmonik ve tek harmonikler. (b) Temel hamonik ve çift harmonikler.

Daha sonra sistemde harmonik bozulmalara sebep olan 6 darbeli konvertör, 12 darbeli konvertör, AA kıyıcı ve yarım dalga doğrultucu harmonik kaynaklarının akım dalga formları akım transformatörünün primerine uygulanmıştır. Akım

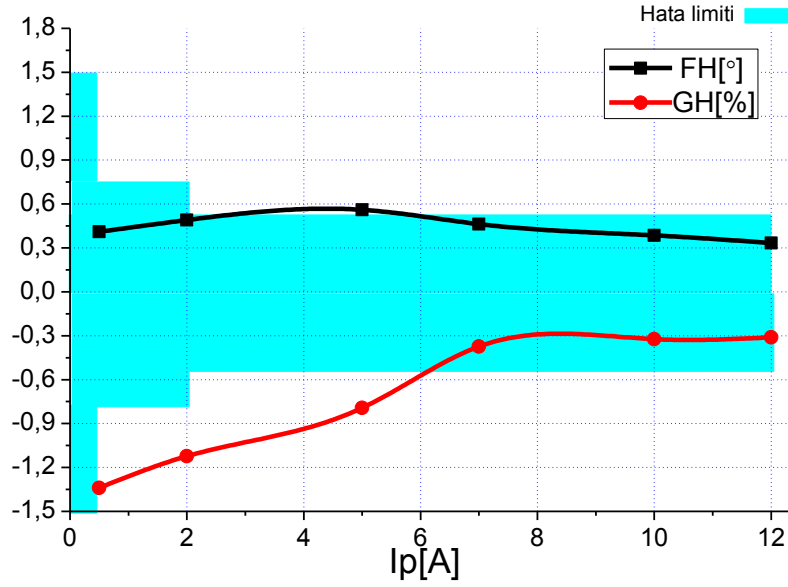
transformatörünün primerine uygulanan 6 ve 12 darbeli konvertöre ait akım dalga formları Şekil 5.25, Şekil 5.26'da görülmektedir. 6 ve 12 darbeli konvertör akım dalga formları programlanabilir güç kaynağı ile üretilip nominal akımın %5 I_n - %120 I_n arasında uygulanmıştır.



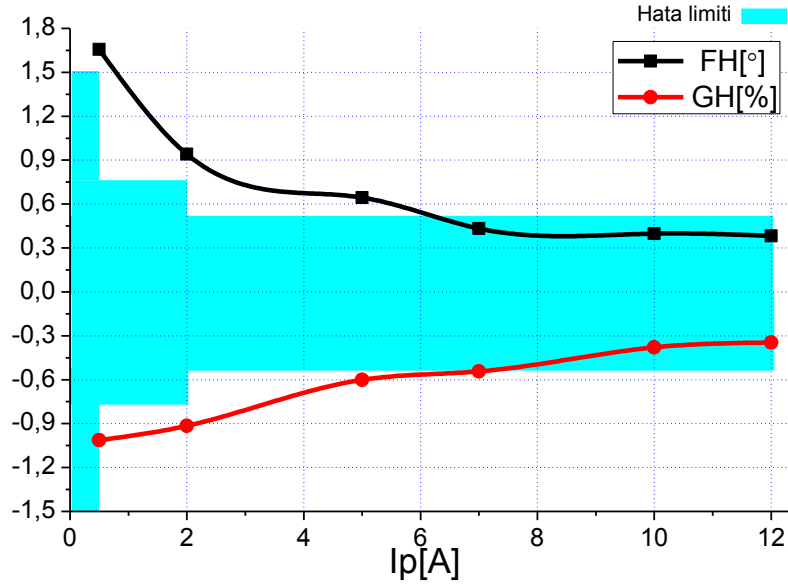
Şekil 5.25. 6 darbeli konvertör primer akımı.



Şekil 5.26. 12 darbeli konvertör primer akımı.



(a)



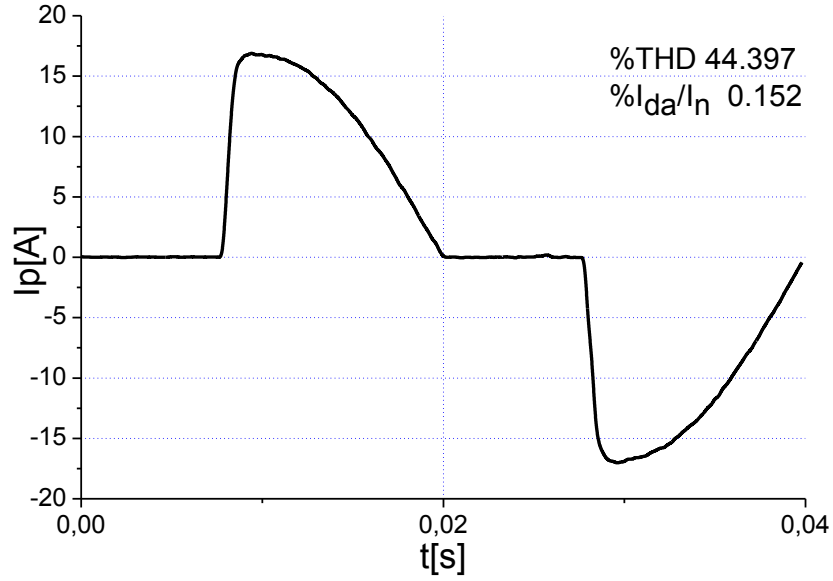
(b)

Şekil 5.27. Primer akımına karşılık akım ve faz hatası. (a) 6 darbeli konvertör
(b) 12 darbeli konvertör.

Konvertör akımlarına ait akım transformatörünün doğruluğu Şekil 5.27’de görülmektedir. 6 darbeli konvertör de faz hatası nominal akımın %5In ile %120In arasında standartlarda belirtilen limitler içinde ama genlik hatası nominal akımın altına düşüktün üstüne çıkmaktadır. 12 darbeli konvertörde ise hem genlik hem de faz hatası nominal akımın altında standartlarda verilen limitleri aşmaktadır.

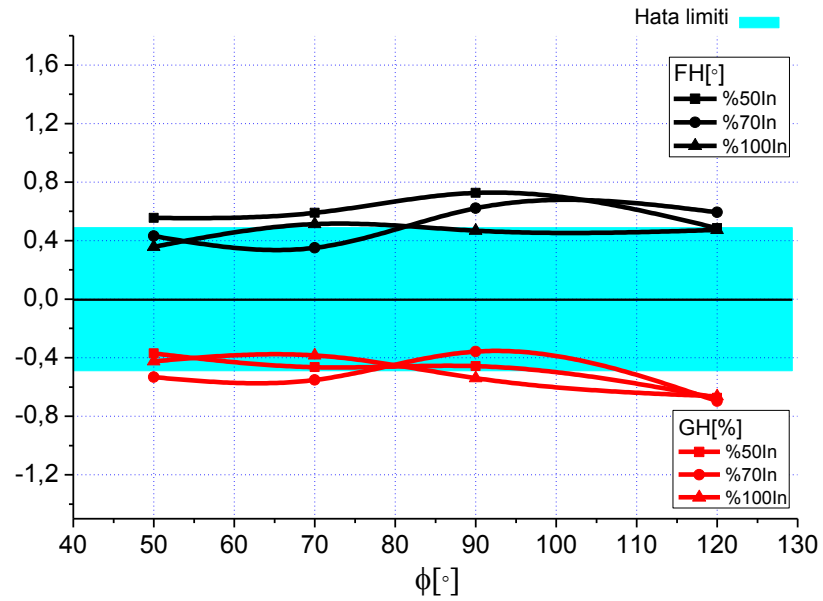
Alternatif akım kısıyıcısı ölçümleri için yapılmış kısıyıcı devre güç kaynağı ile primer devre arasına bağlanmış ve kaynağının limitleri dâhilinde 50Hz frekansta

nominal akımın %50In, %70In, %100In arasında ölçümler yapılmıştır. Tetikleme açısı 70° olan AA kıyıcısına ait akım dalga formu ise Şekil 5.28'de verilmiştir.



Şekil 5.28. AA Kıyıcısı primer akımı ($\theta=70^\circ$).

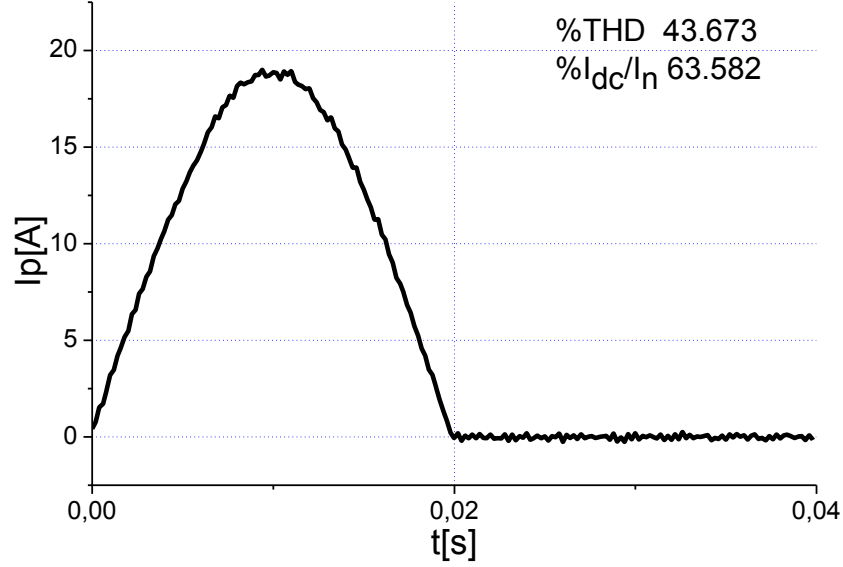
Alternatif akım kıyıcısının doğruluğa etkisi Şekil 5.29'da görülmektedir. Kesme açısına ve nominal akım yüzdesine bağlı olarak genlik ve faz hatası standart limitlerin dışına çıkabilmektedir.



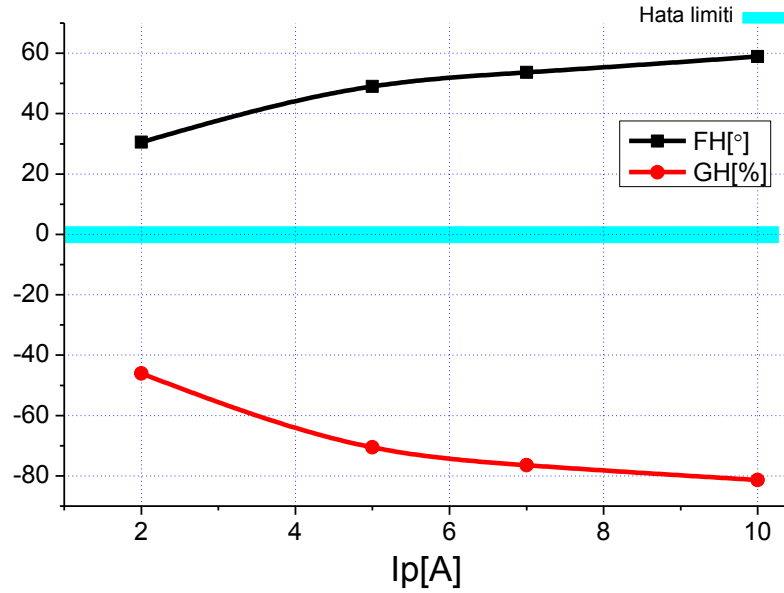
Şekil 5.29. AA Kıyıcısı genlik ve faz hatası.

Ortalama değeri sıfırdan farklı yani doğru akım bileşeni içeren dalgaların etkisini incelemek için ise Şekil 5.30'daki yarım dalga doğrultulmuş akım, primer

devresine uygulanmıştır. Analiz için U1560 diyotu güç kaynağı ile akım transformatörünün primer devresine seri bağlanmıştır. Ölçümler 50Hz frekansta ve nominal akımın %20In, %50In, %70In, %100In olacak şekilde yapılmıştır. Akım transformatörüne uygulanan akım %63 gibi bir doğru akım bileşenine sahiptir.



Şekil 5.30. Doğru akım bileşen içeren harmonik primer akımı.



Şekil 5.31. Doğru akım bileşen içeren harmonik genlik ve faz hatası.

Şekil 5.31'deki grafik incelendiğinde doğru akım bileşeni içeren harmonikli akımda akım transformatörünün hem genlik hem de faz hatası, hata limitlerinin dışına çıkmaktadır.

5.4. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde ölçü akım transformatörünün doğruluğu sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlarda deneysel olarak incelenmiştir. Analiz için kullanılacak deney sisteminin hassasiyeti sinüzoidal şartlarda belirlendikten ve uygunluğu gözlemlendikten sonra sinüzoidal şartlarda doğruluk analizi yapılmıştır. Analizler değişik harmonik kaynaklar kullanılarak yüke bağlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Deneysel sonuçlarına göre ölçü akım transformatörü, 50Hz'in altındaki frekanslarda, sinüzoidal olmayan şartlarda nominal akımın altındaki akım değerlerinde ve/veya doğru akım bileşene bağlı olarak sınıfının dışında çalıştığı belirlenmiştir. Simülasyon çalışmaları ile deneysel çalışmalar birlikte incelendiğinde sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel çalışmalarda simülasyon çalışmalarından farklı olarak histerezis olgusunun da akım transformatörünün performansına etkisi incelenmiştir ve sonuçlar karşılaştırıldığında histerezisin ihmalinin büyük bir önem taşımadığı görülmektedir.

6. SONUÇ

Bu tez kapsamında sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan akım dalga formlarının ölçü akım transformatörlerinin doğruluğuna etkileri hem ATP ortamında yapılan simülasyon çalışmalarıyla hem de laboratuvar ortamında yapılan testlerle deneysel olarak incelenmiştir.

Simülasyon çalışmalarında, akım transformatöründen yapılan testler sonucu elde edilen veriler kullanılarak akım transformatörü modeli oluşturulmuş ve modelin sağlıklı çalışıp çalışmadığı test edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde akım transformatörünün teorik olarak beklenen çalışma karakteristiğinin örtüşmekte olduğu tespit edilmiş daha sonra bu verilere dayanarak akım transformatörünün sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlarda ki doğruluk analizi yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda ise akım transformatörünün hem frekansa bağlı karakterizasyonu gerçekleştirilmiş hem de farklı harmonik kaynaklarına bağlı olarak sinüzoidal olmayan şartlarda doğruluğu incelenmiştir. Doğruluk ölçümü için kurulan iki ayrı deney sisteminin hassasiyeti standartlarda belirtilen 50Hz temel frekansta ve nominal akımın yüzdesi cinsinden yapılan analizler ile test edilmiş ve ölçümler için uygun bir sistem olup olmadığı gözlemlenmiştir. İlk kurulan deney sistemi 1’de iki ölçü akım transformatörü kaskat bağlanmış ve bu transformatörlerden yüksek dönüştürme oranına sahip olan akım transformatörü ölçümler için gerekli olan akımın elde edilmesinde kullanılmıştır. Ölçümler için gerekli olan akım, yükseltici transformatörün sekonderine uygun gerilimin uygulanmasıyla elde edilmiştir. Ancak gerilim kaynağının hassasiyetinin ölçüm için uygun olmamasından ikinci deney sistemi kurulmuştur. Deney sistemi 2 ‘de nominal akımı 10A olan akım transformatörü kullanılmıştır ve ölçümler için gerekli olan primer akımı, gerilim kaynağına bağlı R_y saf rezistif sabit yük direnci ile sağlanmıştır. Deney sistemi 2’ nin hassasiyeti tespit edildikten sonra analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalar neticesinde, temel frekansın (50Hz) altındaki frekanslarda ve/veya doğru akım bileşenin oranına bağlı olarak akım transformatörünün sınıfının ve çalışma şartlarının olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür. Standartlarda akım transformatörü hata sınıfı nominal akımın %5’i ile %120’si arasında tanımlanmaktadır. Farklı harmonik kaynaklarla yapılan doğruluk

analizlerine göre, akım transformatörü nominal akımının altındaki akımlarda harmonikli şartlarda çalıştırılması durumunda hata sınırlarının dışına çıkmaktadır. Bununla birlikte nominal akımı ve üstündeki akımlar için hata oranlarını aşmamaktadır.

Bu çalışmanın devamında farklı sekonder yüklerine bağlı olarak akım transformatörünün sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan durumlardaki hata analizlerine devam edilecek ve akım dalga formuna bağlı olarak düzeltme katsayısı belirlenmesi üzerine çalışılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Kocatepe, C., (2003) Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [2] M. Izhar, C.M.Hadzer, S.Masri And S.Idris, A Study Of The Fundamental Principles to Power System Harmonic, National Power And Energy Conference (Pecon), Malaysia, 2003, Pp. 225-232.
- [3] R. Yacamini, Power System Harmonics, Iee Power Engineering Journal, August 1994, Pp. 193-198.
- [4] IEC 60044-1, Current Transformers, Edition 1.2,
- [5] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- [6] D. W. Ackermann, "Current Transformer Measurement Of Distorted Current Waveforms With Secondary Load Impedance," Ieee Africon 1999, Vol. 2, Pp. 765-768, Oct. 1999..
- [7] 2003N. Locci, C. Muscas, "Comparative Analysis Between Active And Passive Current Transducers In Sinusoidal And Distorted Conditions," In Proc. Of Imtc1999, Venezia, Italy, May 1999, Pp. 993-998
- [8] D. W. Ackermann, "Current Transformer Measurement Of Distorted Current Waveforms With Secondary Load Impedance," Ieee Africon 1999, Vol. 2, Pp. 765-768, Oct. 1999..
- [9] G. Mahesh, B. George, V. Jayashankar, V. Jagadeesh Kumar, "Instrument Transformer Performance Under Distorted Conditions" Ieee India Annual Conference 2004, Pp. 468-471
- [10] T. Leibfried, "Determination Of Phase Angle And Amplitude Error Of Voltage And Current Transformers Up To Some 100 Hz For Loss Measurement On Power Transformers" Electrical Engineering, Vol. 83, P.47-54, Springer Verlag, 2001
- [11] S. Yıldız, M.H. Hocaoglu, "Akım Transformatörlerinin Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Performansının Simülasyon İle İncelenmesi", Elektrik, Elektronik, Bil. Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, 2005, İstanbul, Sayfa: 437-441

- [12] S. Yıldız, "Akım Transformatörlerinin Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Performansının Simülasyon İle İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, 2005.
- [13] A. Cataliotti, D. Di Cara, P. A. Di Franco, A. E. Emanuel, S. Nuccio, "Frequency response of Measurement Current Transformers" IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Victoria, Vancouver Island, Canada, May 12-15, 2008
- [14] A. Cataliotti, D. Di Cara, A. E. Emanuel, S. Nuccio, "Characterization of Current Transformers in the Presence of Harmonic Distortion" IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Victoria, Vancouver Island, Canada, May 12-15, 2008
- [15] A. E. Emanuel, J.A. Orr, "Current Harmonics Measurement By Means Of Current Transformer" Ieee Transaction On Power Delivery, Vol.22, No.3, July 2007, Pp. 13 18-25.
- [16] Antonio Cataliotti, Dario Di Cara, Alexander E. Emanuel, Salvatore Nuccio, "Current Transformers Effects on the Measurement of Harmonic Active Power in LV and MV Networks" IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 26, No. 1, January 2011
- [17] Erkan, E., (1996) "Nonlinear Yüklerde Güç Faktörünün İyileştirilmesi", M.Ü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- [18] E.L.Owen, A History Of Harmonics İn Power Systems, Ieee Industry Applications Magazine, January/February 1998, P. 6-12
- [19] T. A. Haskew J. Ray Ann B. Horn, Harmonic Filter Design And Installation: A Case Study With Resonance, Electric Power Systems Research, 40, 1997, Pp. 121-125.
- [20] S. R. Kaprielian, A.E.Emanuel, R.V.Dwyer And H.Melita, Predicting Voltage Distortion İn A System With Multiple Random Harmonic Sources, Ieee Transactions On Power Delivery, Vol.9, No.3, July 1994, Pp. 1632-1638
- [21] L.Sainz, J.Pedra And J.J.Mesas, Single- Phase Full-Wave Rectifier Study With Experimental Measurements , Electric Power System Research 77, 2007, Pp. 339-351
- [22] Dugan, R.C., Mcgranaghan, M.F. Ve Beaty, H.W., (1996), Electrical Power Systems Quality, Mcgraw-Hill

- [23] Dommel, H.W., Yan, A. Ve Wei, S., (1986), “Harmonics From Transformer Saturation”, Ieee Trans. On Power Systems, 1(2):209-215
- [24] Mcpherson, G. Ve Laramore, R.D., (1990), An Introduction To Electrical Machines And Transformers, John Wiley & Sons, Singapoure.
- [25] 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..
- [26] M. Orlhac, Current Transformer For Hv Protection, Merlin Gerin Cahier Technique N.164, 1995.
- [27] Alexander E. Emanuel, John A. Orr, Current Harmonics Measurement By Means Of Current Transformers: Ieee Transactions On Power Delivery, Vol. 22, No. 3, July 2000
- [28] M. Orlhac, Current Transformer For Hv Protection, Merlin Gerin Cahier Technique N.164, 1995.
- [29] R. Boll, Soft Magnetic Materials, Vacuumschmelze Handbook, Pp 33, 309-310, 1979.
- [30] P. Mira , Instrument Transformers, Kappa Electricals, 2nd Edition, 2000.
- [31] C. Denizoğlu, Abc Ölçü Transformatörleri El Kitabçığı, Alce Elektrik A.Ş., 2001.
- [32] Iec 60044-1, Current Transformers, Edition 1.2, 2003
- [33] L. Prikler, H. K. Høidalen, User’s Manual, Atpdraw For Windows Version 3.5, 2002
- [34] Can/Am Emtip User Group: Alternative Transients Program (Atp) Rule Book: Iv.E. Saturable Transformer Component’, Canadian/American Emtip User Group, 1992
- [35] Ralph F., Determine Current Transformer Suitability Using Emtip Models, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, Wa Usa.
- [36] V. L. Pham, K. P. Wong, N. Watson, J. Arrilaga, Sub-Harmonic State Estimation In Power Systems, Ieee 0-7803-5935-6, Pp. 1168-1173, 2000.

ÖZGEÇMİŞ

Emrah ANİĞİ, 1982 yılında Ankara’da doğdu. İlk ve orta öğretimini 1987-1999 yılları arasında Ankara’da tamamladı. 2001 yılında girmeye hak kazandığı Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği Bölümü’nden 2006 yılında başarıyla mezun oldu. 2008 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik bölümünde çalışmaktadır.