

T.C.

171710

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖLÇÜ AKIM TRANSFORMATÖRLERİNİN
MATEMATİKSEL MODELİ VE SİNİZOIDAL
OLMAYAN ŞARTLARDA
PERFORMANSININ SİMULASYON İLE
İNCELENMESİ

Seher YILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

Yrd. Doç.Dr. M. Hakan HOCAOĞLU

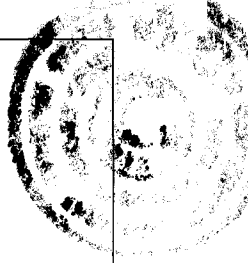
GEBZE

2005



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU



Seher YILDIZ'ın tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 25/07/2005 Tarih ve 2005 / 26 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

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

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAYRAK

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Abdülkadir BALIKÇI

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
24.11.2005..... Tarih ve 2005.../....40.... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

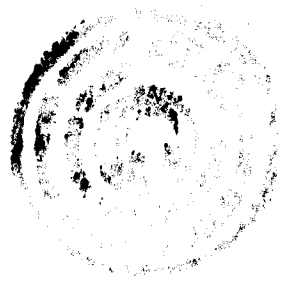
ÖZET

Enerji sistemlerinde; seçici ve hassas koruma uygulamalarına verilen önemin artmasıyla seçici korumada çok önemli görevler üstlenen röleler üzerine yapılan araştırmalara ağırlık verilmiştir. Ancak bilindiği üzere röleler kendilerine iletilen akım ve/veya gerilim verilerine bağlı olarak çalışmaktadır ve rölelerdeki hızlı gelişmelere karşılık akım ve gerilim bilgisini ileten transformatörlerdeki (instrument transformers) gelişmeler daha yavaş seyir etmektedir. Bu sebeple, son teknolojiye göre geliştirilen rölelerin güvenilir olarak fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri için, transformatörler ile çalışma şekillerinin, uyumunun incelenmesi gerekliliği doğmaktadır.

Bu tezde, akım transformatörlerinin yapısı, çalışma prensibi, özellikle manyetik devresi incelenmekte ve akım transformatörünün matematiksel modeli araştırılmıştır. Ayrıca hayati önemi olan koruma akım transformatörlerinin sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlarda performansı; EMTP/ATP'de histeresiz olgusu ihmal edilip saturasyon etkisi dikkate alınarak simulasyon ile incelenmiştir.

Çalışmanın sonucunda; manyetik devre modeline ilişkin iki ayrı metod teorik olarak oluşturulmuştur. Bu iki metodun akım transformatörlerinin matematiksel modelinde uygulanabilirliğinin sayısal örneklerle ispatı ve deneyle doğrulanması ile ilgili çalışmalar halen devam etmektedir.

EMTP/ATP'de gerçekleştirilen parametrik analiz sonucunda ise DC bileşen içeren dalga formunun, akım transformatörünün sınıfını olumsuz yönde en çok etkileyen parametre olduğu anlaşılmıştır. Bu simülasyon çalışması, akım transformatörünün modeline histeresiz etkisi eklenerek detaylandırılabilir, geçici rejimlerdeki dalga formlarının akım transformatörünün sınıfına etkisinin ve transformatörün kayıplarındaki değişimin incelenmesi ile daha da geliştirilebilir.



SUMMARY

Following the increase of importance of the selective, sensitive and reliable protection applications on energy systems, the volume of the researches and improvements on relays also increased. On the other hand, although the relays work depending on the current and/or voltage information that one provided from instrument transformers, improvements on the instrument transformers progress slower than the relays. This is the main motivation on the studies about modern instrument transformers and relays that works under nonsinusoidal conditions.

In this thesis; construction and working principle, especially magnetic circuits of current transformers are investigated and examined by using mathematical model of the current transformers.

In addition, performance of the current transformers under sinusoidal and nonsinusoidal conditions are investigated by EMTP/ATP including saturation but ignoring the hysteresis effect of ferromagnetic material. Studies about application of those methods on mathematical model of current transformers are still under development.

As a result of parametrical analysis which are under taken by means of ATP/EMTP, it is concluded that performance of the current transformer is under influence of DC components of current waveform. The studies on simulation will be extended by considering hysteresis and transformer losses as a future work.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince yardımını ve hoşgörüsünü esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na, laboratuvar ortamını sağlayan çalışmakta olduğum ALCE Elektrik A.Ş.'ye, her zaman maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan aileme ve eşim Mehmet Ali GÜNALTAY'a teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

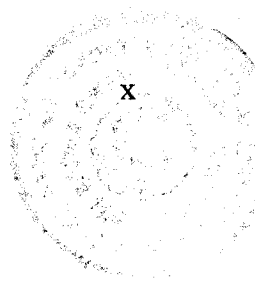
Sayfa

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1.Tezin Amacı	2
1.2.Tezin Sınırları	2
1.3.Tezin Yapısı	3
2. ÖLÇÜ AKIM TRANSFORMATÖRLERİ	5
2.1.GİRİŞ	5
2.2.Akım Ölçü Transformatörlerinin Çeşitleri	6
2.2.1. Ölçü Akım Transformatörleri	7
2.2.2. Koruma Akım Transformatörleri	10
2.3.Akım Ölçü Transformatörlerinin İç Yapısı	13
2.3.1.Primer Devre	13
2.3.2.Sekonder Devre	13
2.3.3.Dielektrik İzolasyon	14
2.4.Akım Transformatörünün Temel Çalışma Prensibi	14
2.5.Manyetik Devrenin İncelenmesi	17
2.5.1.Histeresiz ve Saturasyon Etkisi	17
2.5.2.Saturasyon Etkisi	22
2.6.Akım Transformatörünün Mıknatıslanma Eğrisi	23
2.6.1.B-H Eğrisine Göre V-I _m Eğrisinin Elde Edilmesi	24
2.7.Koruma Akım Transformatörlerinin Kullanım Yerleri	26
2.8.Özet ve Değerlendirme	29
3. AKIM TRANSFORMATÖRLERİNİN MODELLENMESİ	30

3.1.Giriş	30
3.2.Akım Transformatörü Modelinin Oluşturulması	30
3.3.Manyetik Devrenin Modeli	32
3.3.1. EMTP ve ATP Endüktör Modeli	32
3.3.2.EMTDC Modeli	34
3.3.3.Jiles-Atherton Modeli	36
3.3.4.Seetee Modeli	36
3.4.Nüve Endüktansının Matematiksel Modeli	38
3.4.1.Seetee Modeli ile Nüve	38
3.4.2.Nüve Üreticisinin Belirlediği B-H Eğrisi ile Nüve Endüktansının Matematiksel Modeli	40
3.5.Akım Transformatörünün Matematiksel Modelinin Elde Edilmesi	46
3.6.Sonuç	49
4. AKIM TRANSFORMATÖRÜNÜN SİNİZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA PERFORMANSININ SİMULASYON İLE İNCELENMESİ	50
4.1.Giriş	50
4.2.Performansı İncelenen Akım Transformatörü	50
4.3.Akım Transformatörü Simulasyon Modelinin Oluşturulması	54
4.3.1. EMTP/ATPdraw'da Akım Ölçü Transformatörünün test Devresinin Oluşturulması	54
4.3.2.EMTP/ATPdraw'da Akım Transformatörünün Simulasyon Devresi	57
4.4.Kaynak Dalga Şeklinin Akım Transformatörünün Sınıfına Etkisi	59
4.4.1. Sinüzoidal Şartlar	59
4.2.2. Nonsinüzoidal Şartların Etkisi	61
4.5.Sonuçlar	65
5. SONUÇ	66
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	71

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklaması</u>
ATP	Alternative Transient Program
EMTP	Electromagnetic Transient Program
AT	Akım Transformatörü
VT	Gerilim Transformatörü
Trf.	Transformatör



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Ölçü transformatörlerinin sınıflandırılması	6
2.2. Akım ölçü transformatörünün iç yapısı; (a) tek geçişli primer, (b) sarmalı primer [7].	13
2.3. Reçine izolasyonlu kuru tip akım transformatörü kesiti	14
2.4. Akım transformatörü eşdeğer devresi	15
2.5. (a) Mıknatıslanmamış (dömenleri yönlendirilmemiş) ferromanyetik nüve,19 (b) Kısmi olarak mıknatıslanmış ferromanyetik nüve	
2.6. (a) Sinizoidal kaynak, (b) AC uyartımlı ferromanyetik nüvenin histeresiz çevrimi.	20
2.7. (a) Sinizoidal dalga için histeresiz, (b) Kare dalga için histeresiz eğrisi, 21 (c) Ortalama değeri sıfırdan farklı kare dalga için histeresiz eğrisi	
2.8. Doyuma girmiş ferromanyetik nüve	22
2.9. Farklı frekanslar için B-H çevrimi.	23
2.10. Mıknatıslanma eğrisinin başlıca bölgeleri	24
2.11. B-H eğrisi ve buna bağlı olarak uyartım akımının değişimi	26
2.12. Aşırı akım korumasında akım transformatörünün bağlantı şekli	27
2.13. Akım transformatörünün toprak kaçağı korumasındaki bağlantı şekli	27
2.14. (a) Tek bir akım transformatörü sıfır bileşen koruma bağlantısı 28 (b) Üç adet tek fazlı akım transformatörü ile sıfır bileşeni koruma bağlantısı	28
3.1. Akım transformatörünün elektrik eşdeğer devresi	30
3.2. Akım transformatörünün sadeleştirilmiş elektrik eşdeğer devresi	31
3.3. Manyetik devrenin eşdeğer devresi ve akım kaynağı	35
3.4. (a) Tipik histeresiz çevrimi , 42 (b) $F=50\text{Hz}$ için B-H eğrisi	43

(c) Bağıl manyetik geçirgenlik-manyetik alan şiddeti eğrisi	43
(d) Bağıl manyetik geçirgenlik-manyetik alan yoğunluğu eğrisi	44
4.1. İncelenen akım transformatörü	51
4.2. Uyarım eğrisinin çıkartıldığı test cihazı	52
4.3. Çevirme oranı 300/5A olan akım trf.'nun uyarım eğrisi	53
4.4. Hassasiyet sınıfının tespitinde kullanılan test cihazı	54
4.5. ATPdraw'da transformatörün test devresi	55
4.6. Test devresi çalıştırıldığında elde edilen sekonder akımı	57
4.7. Akım transformatörü modeli	57
4.8. Frekansa bağlı akım hatası değişimi	60
4.9. Frekansa bağlı açı hatası değişimi	60
4.10. Frekansa bağlı bileşik hata değişimi	61
4.11. Harmonikli şartlar için akım transformatörü modeli	62
4.12. Temel kaynağa DC bileşen eklenmesi	63
4.13. DC bileşen oranına bağlı akım hatası	63
4.14. DC bileşen oranına bağlı açı hatası	64
4.15. DC bileşen oranına bağlı bileşke hata	64

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Ölçü akım transformatörünü tanımlayan temel parametreler	7
2.2. IEC 60044-1'E göre ölçü akım transformatörlerinde doğruluk sınıfına göre akım ve faz hatası	9
2.3. Koruma akım transformatörünü tanımlayan temel parametreler	11
2.4. IEC 60044-1'e göre koruma akım transformatörlerinin hata limitleri	12
3.1. Şekil 3.4'teki eğrilere ilişkin noktasal datalar	44
4.1 Akım transformatörünü tanımlayan temel parametreler	51
4.2 Saturable transformatörünün "attributes" kısmına girilen veriler	55
4.3. 300/5A olan akım trf.'nun mıknatıslanma akımı eğrisi noktaları	56
4.4. Akım dalga şeklinin hataya etkisi	62

1. GİRİŞ

Enerji sistemlerinde; seçici ve hassas koruma uygulamalarına verilen önemin artmasıyla seçici korumada çok önemli görevler üstlenen röleler üzerine yapılan araştırmalara ağırlık verilmiştir. Bunun yanında elektronik alandaki gelişmelerle birlikte yapısı, konumu birbirinden farklı enerji sistemlerinde yaşanabilecek pek çok tip arıza ya da dengesizlik senaryolarına karşı beklenen cevabı verebilecek nitelikte hızlı, hassas, çok fonksiyonlu ve güç tüketimi az olan elektronik röleler geliştirilmiştir [1].

Bilindiği üzere röleler kendilerine iletilen akım ve/veya gerilim verilerine bağlı olarak çalışmaktadır. Rölelere akım ve gerilim bilgisini ileten ölçü transformatörlerindeki (instrument transformers) gelişmeler ise rölelerdeki hızlı gelişmelere nazaran daha yavaş seyir etmektedir. Bunun nedeni ölçü transformatörlerinin primerlerinden yüksek gerilim ve/veya yüksek akımların geçmesi sebebiyle hayati önem taşıyan izolasyon konusunun ön planda olmasıdır. Orta gerilim veya yüksek gerilim tekniği gereği izolasyon koşullarının sağlanması şartı mevcut klasik ölçü transformatörlerinde yapılabilecek gelişmeleri yavaşlatmıştır. Bununla birlikte günümüzde klasik ölçü transformatörlerinin, izolasyon problemini en aza indirgeyerek, koruma ve ölçme ekipmanlarındaki hızlı gelişmelere uyum sağlayabilmeleri için yeni tip ölçü transformatörleri üzerine çalışmalar sürmektedir [2].

Bu sebeple, son teknolojiye uygun olarak geliştirilen rölelerin güvenilir olarak fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri için, transformatörler ile çalışma şekillerinin, uyumunun incelenmesi gerekliliği doğmaktadır. Şimdiye kadar bu konudaki araştırmalarda büyük çoğunlukla röleler esas alınarak rölelere uygun transformatör yaklaşımı görülmektedir. Ancak bu konunun, zor izolasyon koşulları ve nonlineer özellik gösteren transformatörlerin davranışı esas alınarak da irdelenmesinin röle ve transformatörlerin uyumlu çalışmasını sağlamada faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu düşünce, tezin odak noktasını oluşturmaktadır.

Bu konuda literatürde, genellikle EMTP aracılığıyla simulasyon ve/veya deneysel çalışmalar yer almaktadır. Bunlardan [3]'de, laboratuvar ortamında oluşturulan kısa devre anında koruma akım transformatörünün primer ve sekonder akımları, sekonder gerilimi ve akı yoğunluğu ölçülmektedir. Böylece kısa devrede durumunun IEEE standardına [4] göre tasarlanmış akım transformatörünün performansına etkisi tespit

edilmektedir. Ayrıca aynı koşullar EMTP’de simüle edilerek oluşturulduğunda elde edilen sonuçlar ile EMTP sonuçları karşılaştırılmaktadır.

Başka bir çalışmada [5] ise sadece deneysel olarak farklı özelliklerde [4]’ e göre üretilmiş koruma akım transformatörlerinin performansı; frekans, burden (sekonder devre yükü) ve oran düzeltme faktörü (ratio correction factor [4]) parametrelerine bağlı olarak incelenmiştir.

2005 tarihli bir çalışmada [6] ise; geçici rejimlerde ve yüksek kısa devre akımlarının olduğu durumlarda, yine [4]’e göre üretilmiş koruma akım transformatörlerinin performansı EMTP simülasyonu aracılığıyla incelenmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak EMTP’de histerisiz ve saturasyon etkisi dikkate alınarak akım transformatörü modeli oluşturulmuştur.

Bu çalışmalarda doğrulamaktadır ki enerji sistemlerinde seçici, hassas, hızlı ve en önemlisi güvenilir koruma yapılabilmesi için öncelikle ölçü transformatörlerinin performans analizinin yapılması büyük önem taşımaktadır. Zira koruma ekipmanları birinci dereceden ölçü transformatörlerinin performansına bağlı olarak işlevlerini yerine getirmektedir.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı; enerji sistemlerinde büyük önem taşıyan ölçü transformatörlerinden koruma amaçlı akım transformatörünün matematiksel modelinin oluşturulması ve simülasyonla performansının incelenmesidir. Bu sayede akım transformatörleri aracılığıyla elde edilen sistem akım bilgisinin incelenmesine, güvenilir ve seçici koruma uygulamalarına ilişkin yapılacak çalışmalara zemin hazırlamaktır.

1.2. Tezin Sınırları

Enerji sistemlerinde oluşabilecek çeşitli dengesiz yüklenmeler, aşırı akımlar, nonlineer yükler, hat gerilim ve / veya akımının harmonikli olması, anahtarlamalar ve kısa devre akımlarının söz konusu olduğu durumlarda, akım transformatörlerinin

performansı önem kazanmaktadır. Ölçü (measuring) akım transformatörleri, kendilerine bağlı ölçü aletlerinin zarar görmemesi için belirli bir akım değerinden daha büyük akımları sekondere iletmemeleri gerekmektedir. Koruma (protective, relaying) akım transformatörleri ise tam tersine sekonderlerine bağlı koruma, izleme, kontrol amaçlı çeşitli ekipmanlara enerji sistemindeki istenmeyen şartları, belirlenen bir oranda iletmeleri gerekmektedir. Bu sebeple koruma akım transformatörlerinin performansı hayati önem taşıdığından tezimizde koruma amaçlı transformatörler incelenmiştir.

Günümüzde en yaygın olarak kullanılmakta olan akım transformatörleri IEC 60044-1 standardına [7] göre üretilmekte olduklarından söz konusu standart referans alınmıştır.

IEC 60044-1 standardına uygun koruma akım transformatörleri ele alındığından gerek matematiksel modelde ve gerekse simülasyonlarda manyetik malzemenin histerisiz etkisi, artık mıknatısıyeti, kayıplarının frekansa bağıllığı ihmal edilip saturasyon etkisi dikkate alınmıştır. Bununla birlikte bu etkileri en aza indirmek için de yüksek frekans uygulamalarında kullanılabilen ve kayıpları az olan özel nüveli bir akım transformatörü üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Yine bu nedenle akım transformatörlerinin kararlı haldeki performansı incelenmiştir. Anahtarlama, kısa devre anı gibi geçici rejimlerdeki performansının ise daha sonraki çalışmalarda [8] standardı referans alınarak incelenmesi düşünülmektedir.

Enerji sistemlerinde meydana gelebilecek istenmeyen şartları oluşturarak deneysel inceleme yapmak mümkün olmasına rağmen zahmetli ve maliyetli olması sebebiyle simülasyon ile inceleme tercih edilmiştir. Bunun için EMTP-ATP (Electromagnetic Transient Program - Alternative Transient Program) [9], ATPdraw [10] arayüzü kullanılarak güvenilir bir simülasyon ortamı oluşturulmuştur.

1.3. Tezin Yapısı

Tez beş bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde ölçü akım transformatörlerinin; tanımı, amacına göre çeşitleri, iç yapısı hakkında bilgiler özet olarak, çalışma prensibi, manyetik devrelerin önemli özellikleri ise daha detaylı olarak verilmiştir. Son olarak incelenen akım transformatörünün genel özelliklerine değinilmiştir.

Üçüncü bölümde akım transformatörünün modellenmesi üzerinde çalışılmıştır. Bunun için öncelikle akım transformatörünün manyetik devresinin modelinin elde edilmesinde, bugüne kadar kullanılmış başlıca modeller hakkında genel bilgi verilmiştir. Daha sonra ise gerek bu modellerden yararlanarak, gerekse özgün bir çalışma ile teorik olarak kullanılabilirliği araştırılması gereken bir matematiksel model, ayrıca pratikte kullanılabilecek bir manyetik devre modeli elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen manyetik devre modeli aracılığıyla akım transformatörünün matematiksel modeli oluşturulmuştur.

Dördüncü bölümde akım transformatörünün, EMTP-ATPdraw'da simülasyon modelinin oluşturulması hakkında bilgi verilmiştir. Modelin doğruluğunu tespit etmek amacı ile laboratuvar ortamında testler gerçekleştirilmiştir. ATPdraw'daki modelin hassasiyeti, sinüzoidal uyartımda yapılan laboratuvar testleri ile doğrulandıktan sonra sinüzoidal ve nonsinüzoidal şartlarda akım transformatörlerinin kararlı haldeki performansına ilişkin parametrik analiz yapılmıştır.

2. ÖLÇÜ AKIM TRANSFORMATÖRLERİ

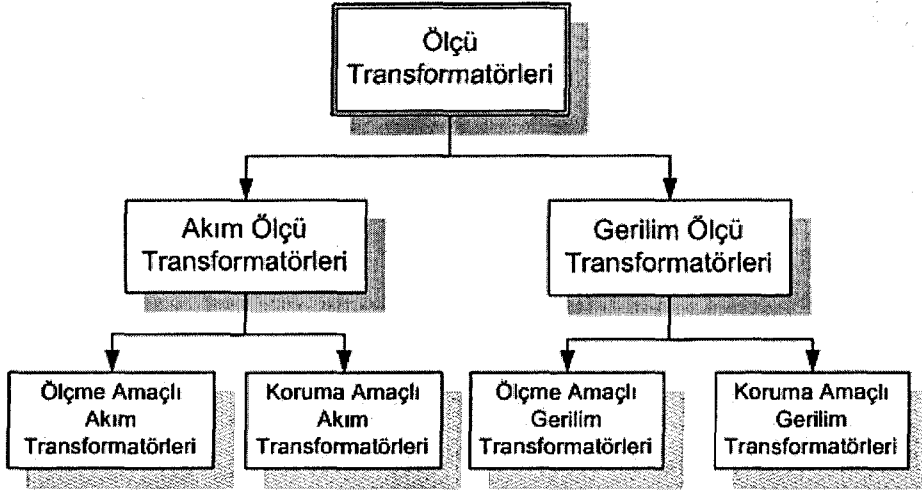
2.1. Giriş

Enerji sistemlerinde, sistemin akım ve gerilim değerini doğrudan ölçmek mümkün olmasına rağmen izolasyon problemleri, yüksek maliyetli ve külfetli olması sebebiyle tercih edilmemektedir. Bu nedenle doğrudan ölçüm yerine transformatörler aracılığıyla indirgeyerek ölçme metodu kullanılmaktadır.

Ölçü aletlerinin (voltmetre, ampermetre, $\cos\phi$ metre, çeşitli röleler vb.) güçleri düşük olduğu için indirgeyerek ölçmede kullanılan transformatörler, güç transformatörlerinden farklı olarak; küçük güçlerle (VA seviyesinde) ve belirli bir hassasiyetle çalışırlar. Bu sebeple söz konusu bu transformatörlere “ölçü transformatörleri (instrument transformers)” adı verilmektedir. Ölçü transformatörleri, ölçü akım ve ölçü gerilim transformatörleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Ölçü gerilim transformatörleri, çalışma prensibi olarak güç transformatörlerine benzemesi buna karşın ölçü akım transformatörlerinin çalışma prensibinin daha farklı olması sebebiyle tezde ölçü akım transformatörleri inceleme konusu olarak ele alınmıştır.

Ölçü akım transformatörlerinin görevi, elektrik sistemindeki yüksek akım değerlerini, ölçülebilir akım değerlerine (5A-1A) indirgeyerek ölçüm yapılmasını sağlamaktır. Bununla birlikte orta gerilim ya da yüksek gerilim şebekesindeki ölçülmek istenen büyük akım değerleri, akım transformatörleri aracılığıyla ölçüldüğünde, ölçü aletleri ve röleler ana elektrik sisteminden izole edilmiş olurlar. Böylece kullanıcılar için tehlike arz edebilecek gerilim seviyeleri minimize edilmiş olmakta, ölçme işlemi sürekli ve daha ekonomik olabilmektedir.

Ölçü akım transformatörleri, amaç bakımından; ölçme amaçlı akım transformatörleri ve koruma amaçlı akım transformatörleri olmak üzere ikiye ayrılır. Bu noktada ölçü transformatörleri kavramı karıştırılabilmektedir. Şöyle ki; enerji sisteminin ister akım isterse gerilim bilgisini indirgeyip ölçme işlemine aracı olan transformatörlere genel olarak ölçü transformatörleri adı verilmektedir. Ölçü transformatörleri daha sonra ölçebildiği sistem parametresine göre akım ölçü ve gerilim ölçü transformatörü adını almaktadır. Bunlar da kendi aralarında amacına göre ölçme ve koruma amaçlı olarak ayrılmaktadır. Bu isimlendirmeler Şema 2.1’de daha net görülebilmektedir.



Şema 2.1. Ölçü transformatörlerinin sınıflandırılması

Tezde ölçme amaçlı akım transformatörlerinden bahsederken “ölçü akım transformatörü”, koruma amaçlı gerilim transformatöründen bahsederken de “koruma akım transformatörü” isimleri kullanılacaktır.

2.2. Akım Ölçü Transformatörünün Çeşitleri

Akım transformatörleri kullanım amacına göre ölçü akım transformatörleri ve koruma akım transformatörleri olarak iki gruba ayrılırlar [11]. Ayrıca kullanım yerine göre fiziksel yapı farklılıkları bakımından da bu transformatörleri çeşitli gruplara ayırmak mümkündür [12]:

Geçiş izolatör tipi; primer sargısı için geçiş izolatörü kullanılabilecek şekilde imal edilir.

Bara tipi; primer iletkeni (sargısı) bulunmayan, ancak primer yalıtımı olan, doğrudan bir iletken ya da bara üzerinden bağlanabilen akım transformatörüdür.

Kablo tipi; kendi primer iletkeni ve primer yalıtımı bulunmayan, yalıtılmış bir kablo üzerinden monte edilebilen akım transformatörüdür.

Manyetik devresi açılabilen (split core); kendi primer iletkeni ve primer yalıtımı bulunmayan, manyetik devresi iki bölüme ayrılmış ve açılabilir yapıdadır. Böylece enerji sistemindeki baraların bağlantılarına dokunmadan akımı ölçülmek istenen baraya kolaylıkla monte edilmesini sağlar.

Mesnet tipi; primer devre iletkeni için bir taşıyıcı (mesnet) görevi yapacak şekilde düzenlenmiş akım transformatörüdür.

2.2.1. Ölçü Akım Transformatörleri

Ölçü amaçlı akım transformatörleri; normal işletme koşullarında sınırlı bir aralıktaki sistem akımını sadece ölçme amacı taşımaktadır. Ölçme akım aralığı genellikle [7]'e göre nominal akımın %5 ile %120'sidir. Ancak bu aralığın en küçük değeri laboratuvar tipi transformatörler için %1 ve azami değeri de farklı uygulamalar için %200 olabilmektedir. Ayrıca ölçü akım transformatörlerinin, sekonderlerine bağlı ölçü aletlerinin izolasyon dayanımı ve akım taşıma kapasiteleri sınırlı olduğu için bunların zarar görmesini engellemesi gerekmektedir. Bu nedenle belirli bir akım değerinin üzerindeki akım değerlerini sekonder devreye yansıtmayacak şekilde tasarlanırlar.

Ölçü akım transformatörlerinden alınan akım bilgisi ile ampermetre, wattmetre vb. ölçü aletleri ile sayaçlar beslenmektedir. Bunun sonucu olarak enerji üretim ve tüketim miktarlarının doğru olarak belirlenmesi, izlenmesi sağlanmaktadır.

Örnek olarak bir ölçü transformatörünü tanımlayan temel parametreler Tablo 2.1'de yer alan etiket değerleri ile açıklanabilir:

Tablo 2.1. Ölçü akım transformatörünü tanımlayan temel parametreler

Etiket Değerleri	24/50/125 kV 300/5A Cl.0.2 FS5 5VA $I_{cth}=1.2 \times I_n$ $I_{th}=25kA$ 1 sn.
Cihazın azami gerilimi U_m , (highest voltage for equipment)	24 kV
İşletme gerilimi U_n , (operation voltage)	22 – 20 kV olabilir
1 dk. süreli şebeke frekanslı izolasyon dayanım gerilimi, (power-frequency withstand voltage)	50 kV
Darbe dayanım gerilimi, (impulse withstand voltage)	95 kV
Nominal çevirme oranı, (rated transformation ratio)	300/5A
Hassasiyet sınıfı, (accuracy class)	0.2
Aşırı akım koruma faktörü, (safety factor)	FS5
Sekonder yükü, (burden)	5VA
Sürekli termik akımı, (continuous thermal current)	$I_{cth} = 1.2 \times I_n (=360A)$
Kısa devre akımı, (short circuit current)	$I_{th}=25kA$ (1 sn)

Cihazın azami gerilimi; akım transformatörünün işletmeye alınabileceği sistemin azami gerilim seviyesini göstermektedir. Transformatörün dizaynı, izolasyon mesafeleri ve boyutları bu gerilim seviyesi dikkate alınarak yapılır. Bu gerilim değerine göre akım transformatörlerinin işletme gerilim seviyeleri [13] bir dakika süreli şebeke frekanslı izolasyon gerilim seviyeleri ve darbe gerilim seviyeleri ise [7]'de belirlenmiştir.

Çevirme oranı : Primer ve sekonder sargılar arasındaki nominal akım çevirme oranını belirtmektedir.

Hassasiyet (doğruluk) sınıfı: Primer akımının sekonder akımına indirgenmesi sırasında sekonder akımında oluşabilecek hata miktarının sınırlarını belirlemektedir. Akım ölçü transformatörü primer akımını sekonder akımına dönüştürülürken oluşabilecek iki tip temel hata vardır:

1. Akım hatası (%AH); efektif dönüştürme oranı hatasıdır,

$$\% AH = \frac{(K_n \cdot I_s - I_p) \cdot 100}{I_p} \quad (2.1)$$

(2.1)'de K_n , nominal dönüştürme oranıdır ($300/5A=60$), I_p ; primerden geçen gerçek (actual) akım değeri; transformatörün primerinden geçen akım değeri bağlı olduğu işletmenin/cihazın, yük durumuna bağlı olarak değişkenlik gösterdiğinden hatanın ölçüldüğü durumdaki primerden geçen akım değeri, I_s ; primerden I_p akımı geçerken sekonderden ölçülen akımdır.

2. Faz hatası (FH), ölçümdeki reaktif kayıplar nedeniyle oluşan faz farkı hatasıdır, birimi [dakika] veya [santiradyan]'dır.

$$\varphi_{FH} = \varphi_P - \varphi_S \quad (2.2)$$

(2.2) bağıntısındaki gibi primer akımının açısı ile sekonder akımının açısı arasındaki fark derece veya radyan cinsinden hesaplanarak dakika ya da santiradyana dönüştürülerek hesaplanır.

Tablo 2.2'de akım transformatörlerinde bazı doğruluk (hassasiyet) sınıflarına göre sağlaması gereken hata miktarları gösterilmiştir. Bu tabloda belirtilen hassasiyet sınıflarının tespiti için primer akımı, nominal akımının %5 ile %120'si arasında iken sekonder yükü %25 ile %100 arasında değiştirilerek yapılır. Böylece olası primer akımı

ve sekonder yükü değişimlerinde de transformatörün istenen hassasiyeti sağlayıp sağlamadığı test edilmiş olmaktadır.

Tablo 2.2. IEC 60044-1'e göre ölçü akım transformatörlerinde bazı doğruluk sınıflarına göre akım ve faz hatası.

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

Farklı uygulamalar için Tablo 2.2'deki hassasiyet sınıflarının dışında başka sınıflar da (örneğin 0.2S, 0.5S...) mevcuttur [7].

Emniyet faktörü “n” (Security factor “FS”): Akım ölçü transformatörünün sekonderine bağlı ölçü aletlerinin aşırı akımlar ile zarar görmesini engellemek amacıyla belirlenmiş bir parametredir. Belirlenen bu katsayı ile primer akımının nominal değerinin belli bir katından büyük değerlerde transformatörün doyuma gitmesi sağlanmalıdır. Şöyle ki 300/5A'lık bir akım transformatöründe, eğer FS faktörü 5 olarak belirlendi ise, primerden nominal akımın 100 misli bir akım -30kA- geçtiğinde sekonderde, nominal sekonder akımının beş mislinden daha büyük -25A ve üzerinde bir akım değeri görülmelidir. Bunun için primerden 1500A geçmeden önce trafo 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. Transformatörün çalışma bölgesi bu parametreye uygun olarak mıknatıslanma eğrisinin bilek bölgesinde seçilir.

Sekonder yükü (burden): Akım transformatörünün hassasiyet (doğruluk) sınıfına uygun olarak ölçüm yapabileceği durumda, sekonderinde tüketilebilecek olan azami güç değerini VA olarak belirtir. Sekonder devrenin ihtiyaç duyduğu güç, bağlanacak olan tüm ölçü aletleri ve bağlantı kabloları için gereken toplam güçtür. Sekonderdeki iç

kayıplar üretici tarafından ayrıca dikkate alınmalıdır. Belirlenen yük değerinin altında veya üzerinde güç tüketildiği durumlarda akım transformatörü doğruluk sınıfına uygun şekilde çalışamaz hale gelir.

Sürekli termik akımı (I_{cth}) : Transformatörün belirlenen ısınma sınırlarının dışına çıkmadan sürekli olarak çalışabileceği termal akım değerini belirtmektedir. Nominal çalışma akımının katları olarak belirtilir.

Kısa devre akımı (I_{th}) : Transformatörün belirlenen kısa sürelerde fiziksel olarak hasara uğramadan termal olarak dayanabileceği azami akım miktarını belirler. Genellikle 1 saniye ya da 3 saniye süreli olarak belirlenir.

2.2.2. Koruma Akım Transformatörleri

Koruma amaçlı akım transformatörlerinin görevi, normal işletme koşulları dışında sistemde oluşabilecek kısa devre ve aşırı akımları belirli bir oranda sekonderlerine bağlı koruma ekipmanlarına, rölelere iletmektir. Bu gibi istenmeyen durumlarda koruma ekipmanlarına kısa süre içinde ve doğru bilgi vermeleri enerji sisteminin veya elektrik makinelerinin zarar görmemesi açısından hayati önem taşımaktadır. Normal işletme koşullarında da sınıfına uygun ölçüm yapması gerektiğinden çok daha geniş bir bölgede çalışmaktadırlar.

Koruma akım trafolarının hataları, akım ölçü trafolarına ek olarak bileşik hata ile de tanımlanmaktadır.

Bileşik hata ($\% \epsilon_b$) : sadece koruma tipi akım transformatörleri için sınır değerleri belirlenmiş olup diğer hata tipleri gibi kararlı hal (steady state) için geçerlidir. Koruma akım transformatörlerinin; nominal akımının üzerindeki aşırı akımları, harmonikli akımları ve kısa devre akımlarını belirlenen bir değere kadar sekondere iletmeleri gerekmektedir. İşte bu iletim sırasında oluşabilecek hata, bileşik hata ile tanımlanmaktadır. Aşırı akım ve kısa devre durumlarında, primer akımının ve/veya nüvenin saturasyon bölgesine yaklaşması nedeniyle sekonder akımının dalga formunun sinüzoidalliği bozulabilir. Bu yüzden sekonder ve primer akımlarının anlık değerleri dikkate alınarak (2.3) deki gibi hesaplanır.

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

(2.3)

Burada; i_p ; anlık primer akımını, i_s ; anlık sekonder akımını temsil etmektedir. Akım hatası efektif değerler dikkate alınarak hesaplandığından nonsinüsoidal şartları yeterince yansıtamamaktadır. Buna karşın faz hatası ve bileşik hatada anlık akım değerlerinden de yararlanıldığı için hem sinüsoidal hem de nonsinüsoidal şartları (akımın dalga şeklindeki kalıcı değişiklikleri) bir ölçüde yansıtabilmektedir. Örnek olarak koruma akım transformatörünü tanımlayan temel parametreler Tablo 2.3.'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Koruma akım transformatörünü tanımlayan temel parametreler

Etiket değerleri	24/50/125 kV 300/5A 5P 10 10VA $I_{cth} = I_n$ $I_{th}=25kA$ 3sn.
Cihazın azami gerilimi U_m , (highest voltage for equipment)	24 kV
İşletme gerilimi U_n , (operation voltage)	22 – 20 kV olabilir
1 dk. süreli şebeke frekanslı izolasyon dayanım gerilimi, (power-frequency withstand voltage)	50 kV
Darbe dayanım gerilimi, (impulse withstand voltage)	125 kV
Nominal çevirme oranı, (rated transformation ratio)	300/5A
Hassasiyet sınıfı, (accuracy class)	5P
Hassasiyet sınır aşırı akım faktörü, (accuracy limit factor, ALF)	10
Sekonder yükü, (burden)	10 VA
Sürekli termik akımı, (continuous thermal current)	$I_{cth} = I_n$ (=300A)
Kısa devre akımı, (short circuit current)	$I_{th}=25kA$ (3sn)

Koruma amaçlı akım transformatörlerinde hassasiyet sınıfları ve bunlara ilişkin hata miktarları Tablo 2.4'te sunulmuştur. Tablodan da görüleceği üzere ölçü akım transformatörlerinden farklı olarak koruma akım transformatörlerinde hata ölçümü nominal akım ve nominal yükte yapılmaktadır.

Tablo 2.4. IEC 60044-1'e göre koruma akım transformatörlerinin hata limitleri

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

Hassasiyet sınır aşırı akım faktörü (ALF); akım transformatörlerinin nominal akımının belirli bir katına kadar tam doyum bölgesine girmeden, bileşik hata sınırları içinde çalışması gerekir. ALF değeri, sınır akım değerini nominal akımın çarpan katsayısı olarak ifade etmektedir.

Koruma akım transformatörlerini tanımlamak için aşağıdaki kavramları da açıklamak gerekir:

Saturasyon (doyum) akısı (Ψ_s); nüvenin saturasyon öncesi konumundan tam saturasyon konumuna gelmesi sırasında nüvede oluşan akının tepe değeridir. B/H eğrisinde B'deki %10'luk artışın H'ta %50'lik artışa neden olduğu noktadaki akı değeri olduğu kabul edilmektedir.

Kalıcı manyetik akı (remanent flux Ψ_r); akım transformatörünün manyetik devresini (nüveyi) doyuma götürebilecek miktarda bir uyartım akımının uygulanmasının ardından bu akımın kesilmesi ile birlikte 3 dakika sonunda halen nüvede bulunan (artık) manyetik akı miktarını ifade etmektedir.

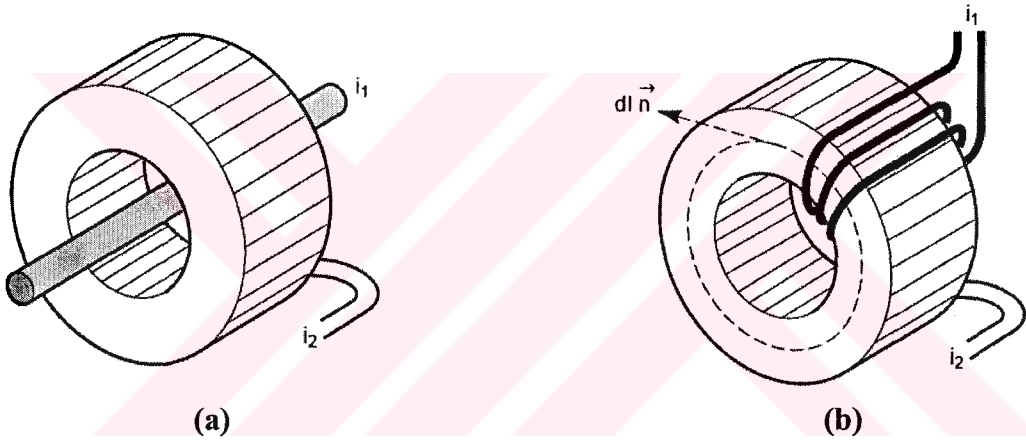
Nominal endüklenen diz gerilimi (knee point e.m.f); primer terminal açık devre iken sekondere uygulanan şebeke frekanslı gerilim uygulandığında, gerilimdeki %10'luk artışa karşılık mıknatıslanma akımında azami %50 artışın görüldüğü asgari gerilim değerine denir. Koruma trafoları bilek bölgesi ile diz noktası arasındaki bölgede çalışırlar.

2.3. Akım Ölçü Transformatörlerinin İç Yapısı

Çeşitli tipleri olmakla birlikte bir akım ölçü transformatörünü oluşturan bölümler temel olarak; primer sargı, manyetik devre (nüve), sekonder sargı ve izolasyondur.

2.3.1. Primer Devre

Akım transformatörlerinin primer devresi, ölçülmek istenen akımın uygulandığı iletken bölüm olup elektrik şebekesine seri olarak bağlanırlar. Şekil 2.2’de i_1 akımının geçtiği kısım primer barayı göstermektedir. Primer bara sarmalı yapıda olabileceği gibi şekildeki gibi tek sipirli (geçişli) de olabilir.



Şekil 2.2. Akım ölçü transformatörünün iç yapısı; (a) tek geçişli primer, (b) sarmalı primer [14].

Kısa devre anında oluşacak kuvvetler ve imalat problemleri nedeniyle primer devrenin sipir sayısının, mümkün olduğunca az olması tercih edilir. Ancak istenen hassasiyetin elde edilemediği, primer akımının küçük olduğu durumlarda amper-sarımı arttırmak gerektiğinden primer sipir sayısını artırma yoluna gidilir.

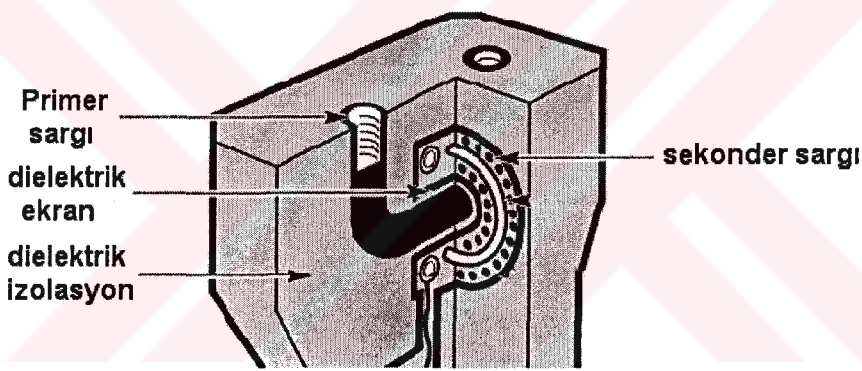
2.3.2. Sekonder Sargı

Primer sargının etrafını çevreleyen genellikle toroid biçimindeki manyetik malzeme üzerine (nüve) sarılmış sarımlardan oluşur. Primerdeki akımı, amper-

sarımına, nüvenin özelliklerine bağlı olarak belirli bir oranda indirgeyerek ölçü aletlerine, rölelere ileten kısımdır. Sekonder sargı uçları açık bırakılırsa sekonderde çok yüksek gerilimler endüklenebilir. Bunu engellemek için sekonder uçları açık bırakılmamalı ve uçlardan birisinin toprak teması sağlanmalıdır.

2.3.3. Dielektrik İzolasyon

Orta gerilim ve yüksek gerilim akım transformatörlerinde primer sargı şebekeye seri olarak bağlandığından primer sargının sekonder sargıdan ve gövdeden yalıtılması gerekmektedir. Bu yalıtım işlemi dielektrik dayanımı yüksek olan izolasyon malzemeleri ile yapılmaktadır (reçine, transformatör yağı gibi). Şekil 2.3.'te kuru tip bir akım transformatörünün kesiti görülmektedir.



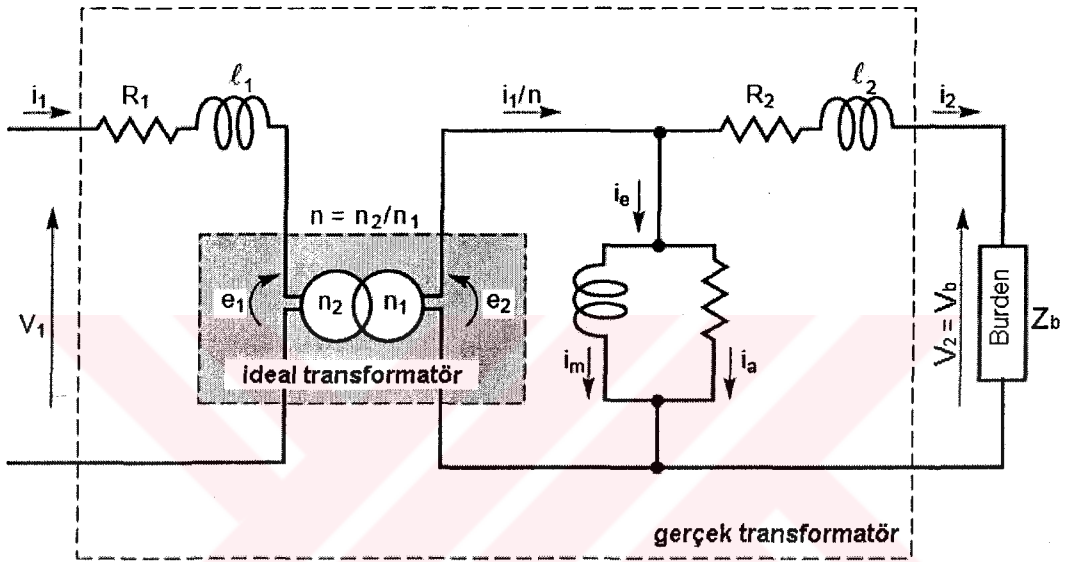
Şekil 2.3. Reçine izolasyonlu kuru tip akım transformatörü kesiti [14].

2.4. Akım Transformatörünün Temel Çalışma Prensibi

Ölçülmek istenen şebeke akımı, transformatörün primerinden geçtiğinde primer çevresinde bir manyetik alan oluşturur. Oluşan bu manyetik alan, primer çevresine düzgün biçimde yerleştirilmiş olan toroid formundaki nüveye etki eder. Bu etki nüvede bir manyetik akı oluşmasını sağlar. Oluşan akı, nüvenin manyetik geçirgenliği ve kesiti ile orantılıdır. Söz konusu manyetik akı, sekonder sargının içinden geçerek bobin uçlarında bir gerilim oluşmasına neden olur. Endüklenen bu gerilim, belli bir yük üzerinden devresi tamamlanmış sekonder sargıdan belli bir akım geçmesine neden olur. Böylece primer devreden geçen akım amper-sarım değerine bağlı olarak belirli bir

çevirme oranıyla sekondere aktarılır.

Akım transformatörlerinin primer akımları 10 – 12.5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 A ve bu değerlerin katları olacak şekilde çok çeşitli olabilir. Bununla birlikte sekonder akımları genellikle 1A ve 5A standart değerlerinde seçilmektedir [7]. Akım transformatörlerinin temel çalışma prensibi Amper teoremi ile aşağıdaki şekilde açıklanabilir [14].



Şekil 2.4. Akım transformatörü eşdeğer devresi [14].

- n_1 : Primer bobin sarım sayısı,
- i_1 : Primer akımı [A],
- ℓ_1 : Primerin kaçak endüktansı [H],
- n_2 : Sekonder bobin sarım sayısı,
- i_2 : Sekonder akımı [A],
- ℓ_2 : Sekonderin kaçak endüktansı [H],
- i_e : Uyarım akımı ya da hata akımı [A],
- H : Manyetik alan şiddeti [A/cm],
- $\vec{n}$: Manyetik alan birim vektörü.

Teorik bir akım transformatöründe; primer akımı ve sipir sayısının çarpımı ile sekonder akımı ve sipir sayısının çarpımı toplandığında, bu değer (2.3) bağıntısında görüldüğü üzere manyetik devredeki alan şiddeti ve manyetik alan birim vektörünün çarpımının integral değerine eşittir [14].

$$n_1 \cdot i_1 + n_2 \cdot i_2 = \int H \cdot \vec{n} \cdot d\vec{l} \quad (2.4)$$

İdeal transformatörde;

$$\int H \cdot \vec{n} \cdot d\vec{l} = 0 \text{ ve} \quad (2.5)$$

$$(n_1 \cdot i_1) = -(n_2 \cdot i_2) \text{ 'dir.} \quad (2.6)$$

Bu bağıntıya göre ideal transformatörde; primer amper-sarımına bağlı olarak primer çevresinde oluşan akı, hiçbir kayıba uğramadan sekonderde kendisine ters yönde ancak eşit büyüklükte bir akı oluşturur. Bu akının tümü, sekonder sarımları halkalayarak sekonder uçlarında gerilim endüklenmesi beklenir. Buna bağlı olarak ideal transformatörde sargı dirençleri ve endüktansları ihmal edildiği için i_1 akımı kayıplara maruz kalmaksızın n_2/n_1 oranında sekondere aktarılması ile sekonderde i_1/n değerinde bir akımının akacağı kabul edilir. Bu durum Şekil 2.4'te gri renkle gösterilmiş olan ideal transformatör modelinde görülmektedir.

Gerçek bir akım transformatöründe ise, primerin sekonderde oluşturduğu kendi akısına ters yöndeki akının küçük bir kısmı, manyetik malzemenin domenlerini yönlendirmek için (uyartım) için kullanılır [15]. Bu yönlendirme sırasında nüvede endüktif ve aktif kayıplar söz konusu olur. Bu nedenle sekonder sargıları halkalayan akı miktarında, nüvedeki kayıplar kadar azalma olur. Şekil 2.4'te mıknatıslanma akımı i_e (excitation current) ile gösterilmektedir. i_e akımı, manyetik akının geçmesini sağlayacak magneto motor kuvvetini (MMF) oluşturarak, gücün transformatörde bir sargıdan diğerine transferini sağlar [14]. Uyartım akımı, iki akımın vektörel toplamından oluşmaktadır.

$$\vec{I}_e = \vec{I}_a + \vec{I}_m \quad (2.7)$$

Bunlardan birincisi manyetik devrenin histerisizine bağlı demir kayıplarının ve fuko (girdap) akımlarının toplamını ifade eden I_a akımıdır. I_a akımı devrede aktif kayıplara neden olmaktadır. İkincisi ise I_m mıknatıslanma akımı olup reaktif kayıplara neden olmaktadır [14]. Rezistif kayıplar, genellikle endüktif kayıplara oranla çok daha küçük oldukları için ihmal edilebilmektedir. Uyartım kayıplarının yanında gerçek akım transformatöründe R_2 direnci ve l_2 kaçak endüktansı üzerinde küçük de olsa bir gerilim düşümü meydana gelmektedir. Eğer sekonder sargıları düzgün ve sıkı sarılmış ise l_2

kaçak empedansı ihmal edilebilir [7]. Primerdeki R_1 ve l_1 üzerindeki kayıplar akım transformatöründe, gerilim transformatöründen farklı olarak şebeke kayıplarına girdiğinden sekonder akımına etkisi bulunmamaktadır. Özetle I_2 akımının miktarını; uyarım akımı, sekonder sarımların direnci ve devredeki kaçak endüktanstan kaynaklanan kayıplar etkilemektedir.

Bunlara göre gerçek bir transformatörde primer ve sekonder devrelerin arasındaki amper-sarım dengesi ve akımlar arasındaki bağıntı (2.8) ve (2.9)'daki gibi olur.

$$n_1 \cdot i_1 = -(n_2 \cdot i_2 + n_2 \cdot i_e) \quad (2.8)$$

$$(i_1 / n) + i_e = i_2 \quad (2.9)$$

2.5. Manyetik Devrenin İncelenmesi

Manyetik devrede, i_m endüktif akımının geçmesinin sebebi, manyetik malzemenin L_m endüktansıdır. L_m endüktansı, histerisiz ve saturasyon etkisi adı verilen devreden geçen akıya bağlı olarak lineer olmayan bir değişim göstermektedir. Primerden geçen akım değiştikçe (manyetik devrenin akısı da değişeceğinden) L_m endüktansı nonlineer değişim göstereceği için mıknatıslanma kayıpları ve buna bağlı olarak akım transformatörünün hata değerleri değişebilecektir. Bu nedenle akım transformatörünün çalışma şekli, manyetik devrenin non-lineer değişimi ile doğrudan ilgili olup bu durumun ayrıca incelenmesi gerekmektedir.

2.5.1. Histerisiz ve Saturasyon Etkisi

Histerisiz ve saturasyon etkisinin irdelenebilmesi için öncelikle nüvenin endüktansının (L_m) non-lineer değişimini ifade eden bağıntı elde edilecektir. Böylece bu bağıntı üzerinden, L_m 'nin değerinin, doğrusal olmayan bir değişim göstermesinin nedeni ortaya konulmaya çalışılacaktır. Buna bağlı olarak ferromanyetik malzemenin histerisiz ve saturasyon etkisi ele alınacaktır.

Söz konusu bağıntı, sinüzoidal şartlar için endüktans tanım bağıntısı kullanılarak çıkarılabilir: R_c , ihmal edilebileceği için uyarım akımı i_e , L_m 'den geçen mıknatıslanma akımı i_m 'ye eşit kabul edilebilir.

$$i_m = \frac{1}{L_m} \int e \cdot dt \quad (2.10)$$

$$e = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.11)$$

(2.10) denklemi, (2.11) aracılığıyla yeniden düzenlenirse;

$$i_m = \frac{1}{L_m} \cdot N \cdot \phi \quad (2.12)$$

elde edilir.

$$\phi = B \cdot A_c, \quad B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad \text{ve} \quad H = \frac{N_2 \cdot I_m}{l_c} \quad \text{olduğundan (2.12) denklemi (2.13)'teki}$$

gibi yazılarak L_m 'nin değişimini gösteren bağıntı elde edilmiş olur.

$$L_m = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_2^2 \cdot A_c \cdot \frac{1}{l_c} \quad (2.13)$$

L_m ; nüvenin endüktansı [H],

ϕ ; manyetik akı [Tesla.cm²],

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

μ_r ; nüvenin bağıl manyetik geçirgenliği,

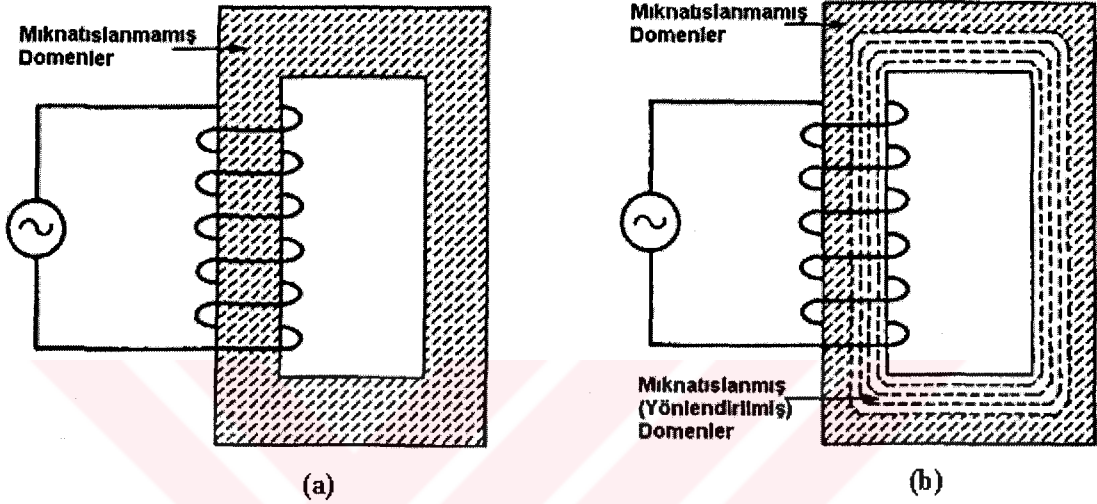
N_2 ; akım transformatörünün sekonderinin siper sayısı,

A_c ; nüvenin kesiti [m²],

l_c ; nüvedeki ortalama akı yolu [m].

(2.13)'teki bağıntıda nüvenin bağıl manyetik geçirgenliğini ifade eden μ_r haricindeki parametreler sabit katsayılardır. μ_r ise nüveyi oluşturan malzemenin cinsine ve ferromanyetik malzemenin domen yapısına bağlı olarak farklılık göstermektedir [16]. Ferromanyetik nüveden akı geçebilmesi için malzemenin domenlerinin yönlenmesi gerekmektedir. Domenleri yönlenen ferromanyetik malzeme mıknatıslanmış olur [16]. Yönlenmenin olması sırasında nüvede bir takım kayıplar ve

buna bağı olarak ısınmalar meydana gelir. Söz konusu kayıplar; çekirdeğin mıknatıslanmasını sağlayan reaktif kayıplar ve mıknatıslanması ile malzemenin ısınmasına yol açan aktif demir kayıplarıdır. Şekil 2.5'te AC kaynakla beslenen bir bobinin manyetik malzemesinin domenlerinin yönlenmesi sembolize olarak gösterilmektedir.

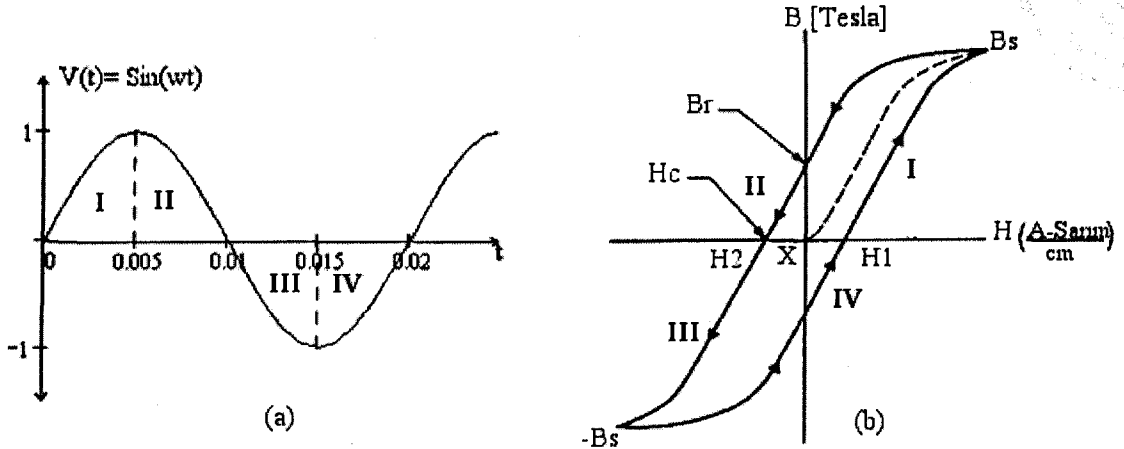


Şekil 2.5.(a) Mıknatıslanmamış (domenleri yönlendirilmemiş) ferromanyetik nüve
(b) Kısmi olarak mıknatıslanmış ferromanyetik nüve

Mıknatıslanmış domenler, nüveden geçen manyetik akıyı göstermektedir. Ferromanyetik malzemenin domenlerinin yönlenebilme kapasitesi, karakteristiği nüvenin bağıl manyetik geçirgenliği (μ_r) ile ifade edilmekte olup $\mu_r \gg 1$ 'dir. Bununla birlikte μ_r , akı iletme kapasitesi olarak da tanımlanabilir ve akı yoğunluğunun alan şiddetine oranını gösteren (2.14) bağıntısı ile hesaplanabilmektedir [16], [17].

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} \quad (2.14)$$

Çekirdeğin bağıl manyetik geçirgenliği, çekirdekten geçen akının şiddetine, yoğunluğuna, akı kaynağının özelliğine (AC, DC...vb) bağı olarak değişmektedir. Bu değişim doğrusal olmayıp son konumuna bağı olarak ardıl izlem gösteren hystresiz eğrisi ya da diğer bir deyişle B-H eğrisi ile ifade edilebilmektedir [16] [17].



Şekil 2.6.(a) Sinüzoidal kaynak, (b) AC uyarımlı ferromanyetik nüvenin histerisiz çevrimi [16].

Sinüzoidal bir kaynak için manyetik bir malzemenin mıknatıslanması ve mıknatısiyetinin kaybolması ile ilgili tam çevrim, Şekil 2.6(b)'deki histerisiz çevrimi ile gösterilmektedir. Nüve sinüzoidal bir kaynağın ürettiği manyetik alan şiddetine maruz kaldığında Şekil 2.6(a)'da gösterildiği üzere kaynağın her çeyrek alternansında, histerisiz çevriminin bir bölgesindeki eğri elde edilmektedir. Histerisiz çevrimi, manyetik malzemenin cinsine, etkisinde kaldığı ve içinden geçen manyetik alanın dalga formuna, frekansına, sıcaklığa bağlı olarak oluşmaktadır.

Çekirdeğin başlangıçta nötr olduğu (domenlerinin hiç yönlenmemiş olduğu) kabul edilirse; manyetik alan şiddeti H arttırıldıkça, manyetik akı yoğunluğu B de (başka bir ifade ile çekirdeğin endüksiyonu) artar ve X noktasından B_s saturasyon noktasına kadar kesikli çizgi boyunca nonlineer bir eğri elde edilir. Elde edilen ilk eğri mıknatıslanma eğrisi olarak düşünülebilir. Nonlineer mıknatıslanma eğrisi ancak sınırlı bir bölgede (iki kıvrılma bölgesinin arasında) lineer değişim göstermektedir.

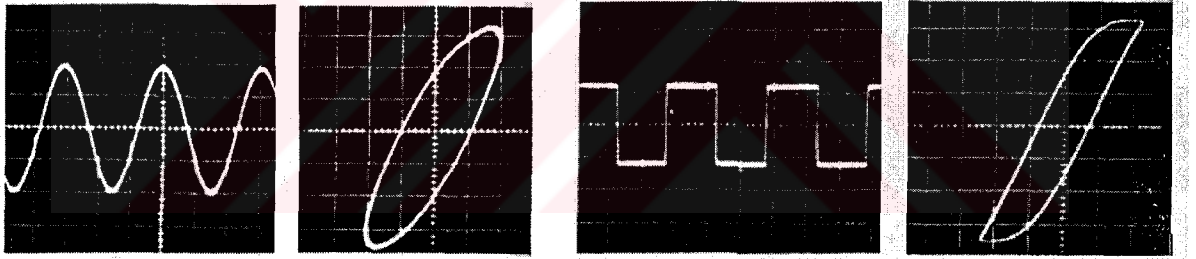
Sonrasında H azaltılacak olursa B de bir azalma gösterir ve B_s noktası ile H_2 noktası arasındaki eğri oluşur. Ancak görüldüğü üzere H azaltılarak elde edilen eğri ile, H arttırılarak elde edilen eğri çakışmamakta, tam tersine farklı bir yol izlemektedir. İkinci eğrinin B eksenini kestiği B_r noktası, $H=0$ olduğu anda çekirdekteki artık (remenans) akı yoğunluğunu göstermektedir. Bu durum malzemenin maruz kaldığı manyetik alan şiddeti ortadan kalkmasına rağmen hala B_r kadar artık akı dolayısıyla akı yoğunluğu bulunduğu anlamına gelmektedir. Mıknatısiyetin ortadan kalkabilmesi için

negatif yönde H_2 noktasına denk gelen H_c (coercive force) kadar zorlayıcı manyetik alan şiddetinin uygulanması gerekmektedir.

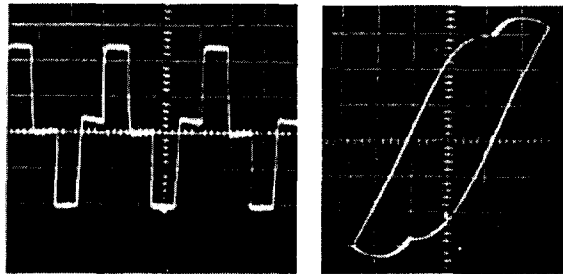
Negatif yönde doyuma gidene kadar H azaltılmaya devam edilirse malzeme birinci eğrinin tam tersi konumunda mıknatıslanır. Ters yöndeki bu mıknatıslanma sıfırlanmak üzere H artırıldığında H_1 noktasına gelinerek dördüncü eğri çizilir. Böylece Şekil 2.6(a) gösterilen bir tam dalganın nüvede oluşturduğu uyartım 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 histerisiz çevriminin içindeki kapalı alan nüvedeki enerji kaybını göstermektedir [16], [17].

Şekil 2.7'de aynı nüve için farklı dalga formuna ve şekil faktörüne sahip kaynaklar ile elde edilmiş histerisiz çevrimleri yer almaktadır [16]. Şekil faktörü, herhangi bir dalga şeklinin efektif değerinin ortalama değerine oranı hakkında bilgi vermektedir



Şekil 2.6(a) Sinüzoidal dalga için histerisiz, şekil faktörü=1.11 (b) Kare dalga için histerisiz eğrisi şekil faktörü =1



(c) Kare dalga için histerisiz eğrisi, şekil faktörü =1.31

Şekil 2.7(a)'da nüvenin maruz kaldığı manyetik alan şiddetinin dalga formu sinüzoidal (sinüzoidal dalganın şekil faktörü 1.11'dir) iken elde edilen B-H çevrimi görülmektedir. Birinci bölgedeki eğrinin H eksenine doğrultusunda hiç düz çizgi

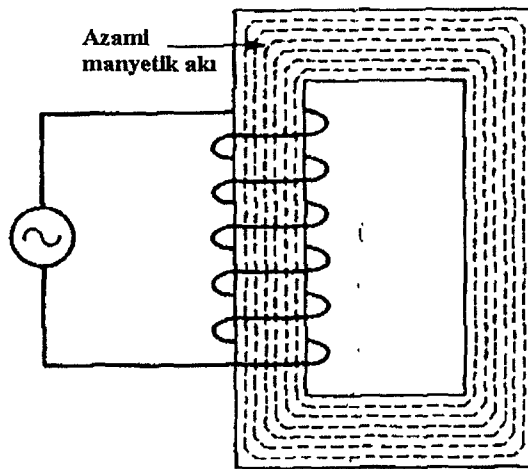
çizmeden ikinci bölgeye geri dönmesi, (aynı şekilde 3. bölgeden 4. bölgeye geçişte de) kaynağın nüveyi doyum bölgesinde çalıştırmadığı anlamına gelmektedir.

(b)'de ise şekil faktörü $=1$ olan kare dalga için B-H çevrimi görülmektedir. Sinizoidal kaynaktan farklı olarak kare dalga kaynağının nüveyi az da olsa doyum bölgesinde çalıştırdığı görülmektedir. Ayrıca kare dalganın iniş çıkış anlarına denk gelen histerisiz çevriminin birinci ve üçüncü bölgelerinde, eğrinin lineer olduğu görülmektedir.

(c)'de ise şekil faktörü $= 1.31$ ve ortalama değeri sıfırdan farklı olan kare dalganın B-H çevrimi yer almaktadır. Ortalama değeri sıfırdan farklı olduğu için diğer kare dalgadan farklı olarak DC bileşen içermektedir. Bu nedenle artık mıknatısıyeti (B_r) diğerlerine göre daha büyüktür ve kapalı çevrim alanı diğerlerine göre daha büyük olduğundan nüvede harcanan enerji de daha fazladır.

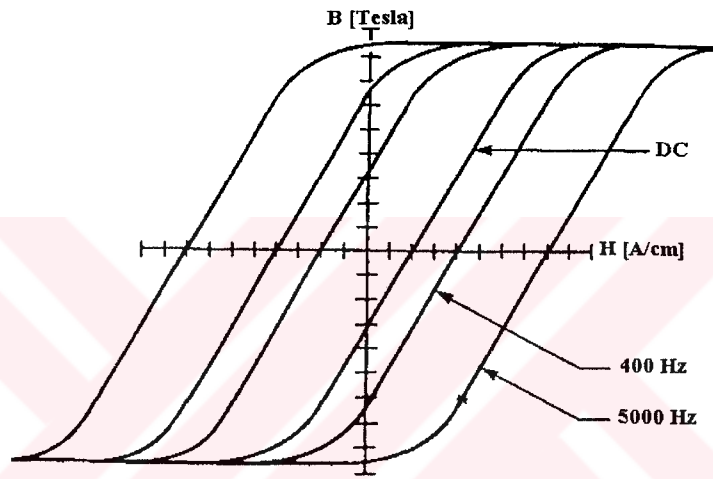
2.5.2. Saturasyon Etkisi

Çekirdeğin domenlerindeki yönlenme, bütün domenlerin yönlenmesine kadar devam eder. Bütün domenler yönlendikten sonra manyetik alan şiddeti ne kadar arttırılsa da magnetik akı yoğunluğu B_s 'den daha fazla artmaz. Bu da söz konusu çekirdeğin üzerindeki sarımlarda (akım transformatörü için sekonderde) daha fazla gerilim endüklenemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu duruma nüvenin doyuma, saturasyona (saturation) girmesi adı verilir.



Şekil 2.8. Doyuma girmiş ferromanyetik nüve

Şekil 2.8.'de bütün domenleri yönlenmiş, doyuma girmiş dolayısıyla azami akının geçmekte olduğu ferromanyetik nüve sembolize edilmektedir. Doyum bölgesinde ve/veya yüksek frekanslarla çalışan nüvede, lineer bölgedekine oranla daha fazla ısınmalar söz konusu olur [17], hatta uzun süreli çalışmalarda aşırı ısınmalar ortaya çıkarak akım trafosunun sekonder devresinin izolasyonun zarar görmesine neden olabilir. Daha öncede bahsedildiği üzere kaynağın frekansı B-H çevrimini etkiler; frekansın artması nüvenin daha geç doyuma girmesini sağlar. Şekil 2.9'da aynı nüvenin farklı frekanslar için çıkartılmış histerisiz eğrisi yer almaktadır.



Şekil 2.9. Farklı frekanslar için B-H çevrimi

Şekilde görüldüğü gibi frekans arttıkça nüveyi mıknatıslamak ve saturasyona sokmak için uygulanması gereken manyetik alan şiddeti ve artık mıknatısıyet de artmaktadır.

2.6. Akım Transformatörünün Mıknatıslanma Eğrisi

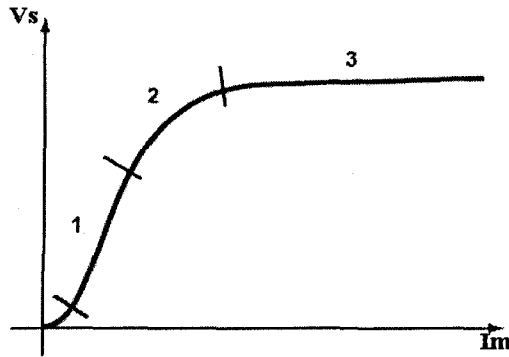
Akım transformatörünün modellenmesi ve simülasyonu çalışmasında, IEC 60044-1 gereği kararlı hal incelendiğinden, nüvenin histerisiz çevrimi yerine birinci bölgedeki mıknatıslanma eğrisi kullanılmıştır. Ayrıca kısa devre anında primerden geçen büyük akımlar nedeniyle sekonderdeki nüve doyuma girebileceği için uyartım eğrisinin saturasyon bölgesindeki etkisi de dikkate alınmıştır.

Genellikle transformatör dizaynında B-H çevrimi; kullanılacak ferromanyetik

malzemenin cinsi belirlenirken kayıplar, ısınma, artık gerilim, azami endüksiyon bakımından dikkate alınır. Uygun çekirdek cinsi belirlendikten sonra, hesaplarda özellikle ölçü transformatörü hesabında; çevirme oranı hatası, n ve FS faktörleri bakımından Şekil 2.6(b)'deki B-H çevriminin birinci bölgesindeki kesikli çizgi ile gösterilen başlangıç eğrisinden yararlanılır. Ancak B ve H'a bağımlı başlangıç eğrisi yerine nüve ve bobinin dizayn parametrelerinin (nüve kesiti, bobin sipir sayısı, bobin kayıpları) etkisini de gösteren $V-I_e$ ya da (2.5'de belirtildiği üzere I_m mıknatıslanma akımına göre) $V-I_m$ mıknatıslanma eğrisi kullanılır. V, nüve üzerindeki sarımların uçlarında elde edilen gerilim, I_m nüvede mıknatıslanma için harcanan akımdır.

2.6.1. B-H Eğrisine Göre $V-I_m$ Eğrisinin Elde Edilmesi

Histerisiz çevrimindeki manyetik alan yoğunluğu B değeri, $e = N \cdot \frac{d\phi}{dt}$ ve $\phi = B \cdot A_c$ bağıntılarıyla, nüvede endüklenen gerilim E ya da daha çok kullanılan bobin uçlarındaki gerilim V değerine dönüştürülebilir (bobindeki gerilim düşümleri nedeniyle bobin uçlarındaki gerilim, endüklenen gerilimden küçüktür). Manyetik alan şiddeti H değeri de, amper-sarım bağıntısı $H = \frac{N_2 \cdot I_m}{l_c}$ ile mıknatıslanma akımı I_m 'ye dönüştürülebilir. Akım transformatörünün mıknatıslanma eğrisi testi; primer bara açık devre iken sekonder sargı uçlarına bağlanan kaynak ile adım adım geçen akım ve buna karşılık sekonder uçlarda elde edilen gerilim ölçülerek yapılır. Akım genellikle (çevirme oranına bağlı olarak) 1A ya da 5A'e kadar artırılır, böylece nominal sekonder akımında endüklenen gerilim de ölçülmüş olur. Şekil 2.10'da bölgelere ayrılmış bir mıknatıslanma eğrisi yer almaktadır.



Şekil 2.10. Mıknatıslanma eğrisinin başlıca bölgeleri

Mıknatıslanma eğrisi genel olarak [11]'e göre 4 bölgeye, [18]'e göre de 3 bölgeye ayrılabilir. Ancak bunlardan en yaygın olanı üç bölgeye ayırmaktır;

- 1) Lineer bölge (ilk kıvrılma ile ikinci kıvrım arasındaki bölge)
- 2) Diz noktası bölgesi (knee point region)
- 3) Doyum bölgesi (saturation region)

Lineer bölge; gerilim ve hata akımı (I_m) arasındaki değişimin (yaklaşık) belirli bir orana göre seyir ettiği bölgedir. Akım transformatöründe primerden geçen akım arttıkça, sekonderin maruz kaldığı manyetik alan şiddetinin artması ve buna bağlı olarak uyartım akımının artması ile sekonderde endüklenen gerilimin doğrusal olarak artış gösterebildiği bölgedir.

Diz noktası bölgesi; V - I_m arasındaki değişim oranının lineer bölgedekine oranla azalmaya başladığı ve değişimin duraksadığı noktalar arasındaki bölgedir. Kıvrılma (diz) noktası yaklaşık bu bölgenin ortalarında olup [7]'e göre; primer ve diğer sargılar açık devre iken, nominal işletme frekansında sekondere uygulanan gerilimdeki %10'luk artışa karşılık uyartım akımındaki artışın minimum %50 olduğu bölgenin başlangıç noktasıdır.

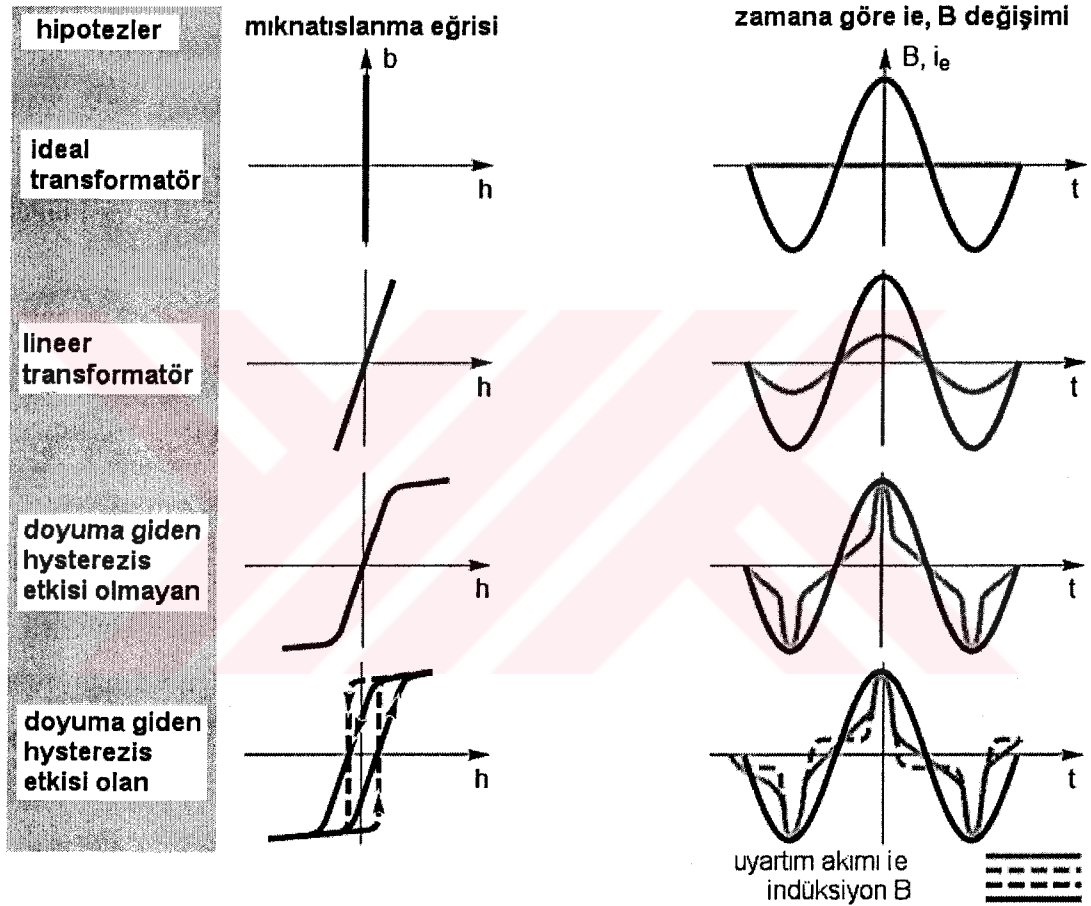
Doyum bölgesi; 2.5'de belirtildiği üzere mıknatıslanma akımındaki artışa karşılık gerilimde artışın neredeyse görülmediği, endüksiyonun değişmediği bölgedir. Başka bir deyişle, gerilimdeki %10'luk artışa karşılık uyartım akımının %100 artmaya başladığı noktadan sonraki bölgedir. Ölçü akım transformatörleri genellikle, lineer bölgenin alt kısımlarında, koruma akım transformatörleri de lineer bölge ile knee point bölgesinde çalışacak şekilde tasarlanırlar.

Sinüzoidal kaynakla beslenen bir devrede mıknatıslanma akımına, farklı B-H eğrilerinin etkisi Şekil 2.11'de yer almaktadır. Buna göre ideal transformatörde herhangi bir mıknatıslanma akımı tüketilmektedir. Bu yüzden ideal transformatörün B-H eğrisi, B (endüksiyon) ekseninde oluşur.

Lineer transformatör modelinde ise nüve doyuma gitmemekte, mıknatıslanma akımına karşılık gelen endüksiyon değeri de aynı oranda sürekli artmaktadır. Bu durumda mıknatıslanma akımının zamana bağlı değişimi, bozulmaya uğramadan kaynağın dalga şekli gibi olur.

Nüvenin gerçekte olduğu gibi belli bir endüksiyondan sonra doyuma gittiği, ancak

polarite değişimlerinde nüvede herhangi bir artık mıknatıslanma kalmadığının kabul edildiği durumda ise I_m 'nin sinizoidal dalga formu bozulur. Fakat histerisiz etkisi ihmal edildiği için dalga formundaki bozunum aynı kalır. Histerisiz etkisini taşıyan gerçek bir transformatör karakteristiği içinse, mıknatıslanma akımının dalga formundaki bozunum bir önceki durumdan farklı olarak değişmektedir.

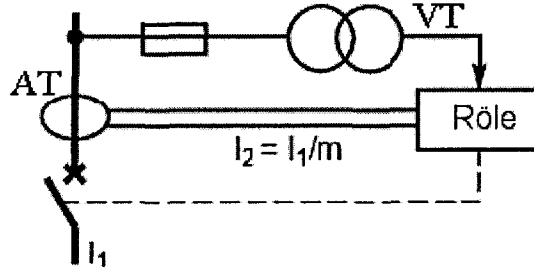


Şekil 2.11. B-H eğrisi ve buna bağlı olarak uyarım akımının değişimi [14].

2.7. Koruma Akım Transformatörlerinin Kullanım Yerleri

Koruma röleleri orta gerilim şebekelerine direk bağlanamazlar. Bu yüzden koruma akım transformatörleri şebekede sağlanmak istenen koruma tipine göre çeşitli şekillerde kullanılabilirler.

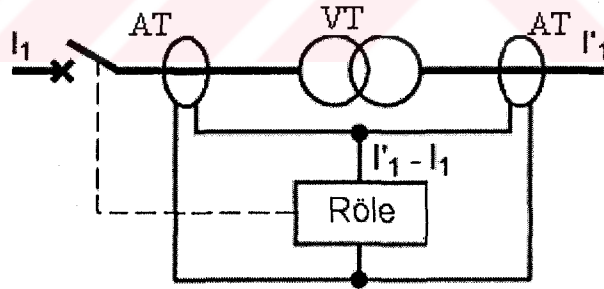
-Aşırı akım koruması (overcurrent protection)



Şekil 2.12. Aşırı akım korumasında akım transformatörünün bağlantı şekli [14].

Şekilde 2.12’de görüldüğü gibi akım transformatöründen algılanan akım bilgisi sayesinde röleye kısa devre veya aşırı akım bilgisi aktarıldığında röle açma yaparak korumayı sağlar. Burada dikkat edilmesi gereken nokta; röleye akım bilgisine ek olarak koruma amaçlı gerilim ölçü transformatörü ile gerilim bilgisinin de iletilmesi gerektiğidir [14].

- Toprak kaçağı koruması (earth leakage protection)

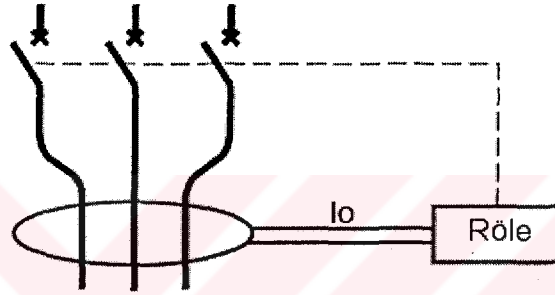


Şekil 2.13 Akım trf.’nün toprak kaçağı korumasındaki bağlantı şekli [14].

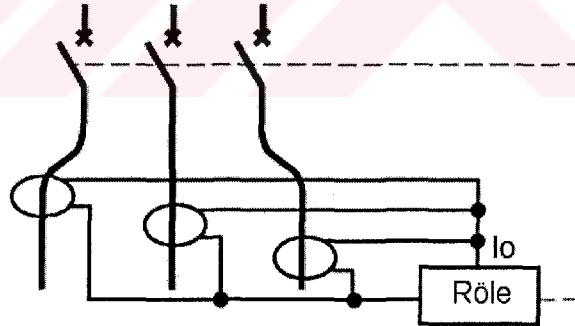
Şekil 2.13’de gösterilen koruma tipinde güç transformatörünün (VT) girişine ve çıkışına birer adet akım transformatörü bağlanmıştır. Bu akım transformatörlerinden alınan akım bilgileri arasındaki fark izlenerek toprak kaçağı koruması yapılmaktadır. İzleme yapılmak istenen sistem motor, transformatör ya da ana baralar olabilir [14]. Bu tip korumadaki önemli husus her iki akım transformatörünün mümkün olduğunca özdeş olmasıdır.

- *Sıfır bileşen koruması (zero sequence protection)*

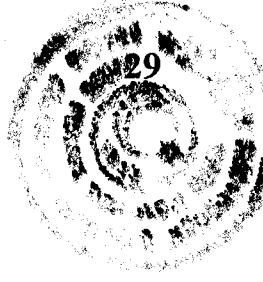
Bu koruma tipinde faz-toprak arızalarında meydana gelen I_0 sıfır bileşeni izlenmektedir. Genel olarak iki farklı şekilde yapılabilir; Şekil 2.14(a)'daki gibi tek bir toroid transformatör ile 3 fazın birden çevrelenip akım bilgileri toplanarak gerçekleştirilir. Veya bunu yapmanın mümkün olmadığı, zor olduğu durumlarda (b)'deki gibi 3 adet tek fazlı akım transformatörü ile akım bilgileri röleye iletilir [14].



Şekil 2.14(a) Tek bir akım transformatörü sıfır bileşen koruma bağlantısı [14].



Şekil 2.14(b) Üç adet tek fazlı akım trf. ile sıfır bileşeni koruma bağlantısı [14].



2.8. Özet ve Değerlendirme

Bu bölümde akım ölçü transformatörlerinin tanımı, çeşitleri, iç yapısı, temel çalışma prensibi ve tezde koruma amaçlı akım transformatörlerinin performansı inceleneceği için bu tip transformatörlerin kullanım yerleri hakkında bilgi verilmiştir.

Akım transformatörünün matematiksel modelinin elde edilmesinde çok önemli bir etken olan manyetik devrenin histerisiz olgusu ihmal edilmiş ve saturasyon etkisi incelenmiştir. Mevcut literatürde azınlıkta olmakta birlikte histeresiz olgusunun da dikkate alındığı çalışmalar da yer almaktadır. Ayrıca akım transformatörünün sekonder devresini oluşturan manyetik devre ile ilgili hesaplamalarda kullanılan mıknatıslanma eğrisine değinilmiştir.



3. AKIM TRANSFORMATÖRÜNÜN MODELLENMESİ

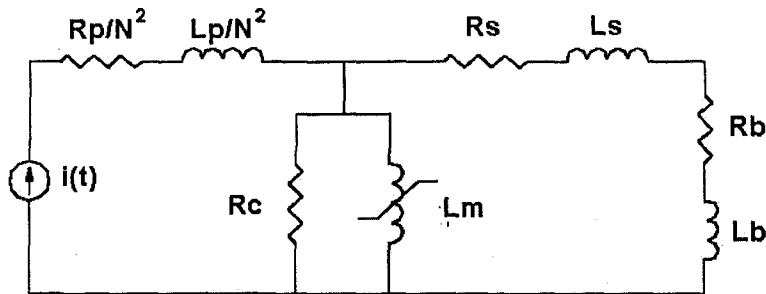
3.1.Giriş

Bu bölümde öncelikle akım transformatörünün elektriksel ifadesinden yola çıkarak matematiksel modeli elde edilmeye çalışılacaktır. Bunun için öncelikle akım transformatöründeki manyetik devre ile ilgili literatürde yer alan başlıca modellere ve bu modellerin özelliklerine değinilecektir. Daha sonra gerek bu modellerden yararlanarak gerekse bu modellerin dışında yeni metod araştırmasına ilişkin iki ayrı çalışma yer alacaktır. Bunlardan birincisi matematiksel olarak nüvenin endüktansının modellenmesi, ikincisi ise pratik hayatta kolayca kullanılabilirlik ve geniş bir kullanım sahası olan numerik olarak modelleme çalışmalarıdır. Son olarak bu iki metod aracılığıyla akım transformatörünün elektrik eşdeğer devresinin çözüm denklemleri elde edilecektir.

3.2. Akım Transformatörü Modelinin Oluşturulması

Tezin amacında belirtilen incelemeler, EMTP-ATPdraw aracılığıyla yapılacak olmasına rağmen akım transformatörü modelinin oluşturulması; çalışma biçiminin kavranabilmesi ve gerektiğinde elde edilen matematiksel modeli sistemdeki diğer elemanların modelleri ile birleştirerek sistemin bütününe ilişkin araştırmaların yapılabilmesi bakımından önem taşımaktadır.

Matematiksel modeli elde edebilmek için akım transformatörünün bilinen [19] elektrik eşdeğer devresi oluşturulur (Şekil 3.1).

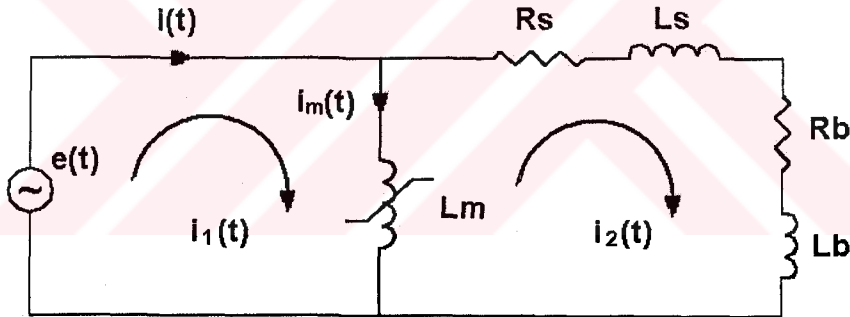


Şekil 3.1. Akım transformatörünün elektrik eşdeğer devresi

Şekil 3.1'deki $i(t)$ akım kaynağı; transformatörün primer akımını, R_p - L_p , R_s - L_s ; sırasıyla primer ve sekonderin direncini ve kaçak endüktansını göstermektedir. R_b - L_b ise sekondere bağlanan cihazların (röle, sayaç vb.) direncini ve endüktansını

göstermektedir. Kaynağa paralel kol üzerindeki R_c ve L_m ise manyetik malzeme olan nüvenin direncini ve endüktansını temsil etmektedir.

Genellikle primer baranın kesiti çok büyük olduğu için direnç değeri R_p ve çok sipirli olmadığı sürece endüktansı L_p ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Akım transformatörü üreticileri tarafından da mekanik unsurlar nedeniyle gerekmedikçe primer devrenin çok sipirli yapılması tercih edilmemektedir [5]. Ayrıca primer devrenin kayıpları 2.4'te bahsedildiği üzere şebekeye ait kayıplar olup sekonder akımına etkisi olmadığı için Şekil 3.1'deki eşdeğer devrede primere ait R_p - L_p parametrelerini ihmal etmek sonuçları genel olarak etkilemeyecektir [19]. L_s sekonderin kaçak endüktansı, sekonder sarımlar nüvenin üzerine sıkı ve düzgün sarıldığı sürece ihmal edilmesinde sakınca yoktur [14]. Ayrıca nüvenin direnci R_c de nüvenin endüktansına oranla çok küçük olduğundan ihmal edilebilmektedir. Böylece bu parametrelerin ihmal edilmesi ve akım kaynağının gerilim kaynağına dönüştürülmesi ile devre, çözülebilirliği bakımından daha sade hale getirilebilecektir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Akım transformatörünün sadeleştirilmiş elektrik eşdeğer devresi

Şekil 3.2.'deki nüveden bağımsız parametreler, herhangi bir akım transformatörü için kolaylıkla hesaplanabilir ve matematiksel modelde sabit katsayıları teşkil ederler. Buna karşın L_m endüktansı, nüvenin akı yoğunluğuna bağlı olarak non-lineer değişim göstermektedir ve eşdeğer devreyi, kolaylıkla çözülebilir bir elektrik devresi olmaktan çıkarmaktadır. Bu nedenle akım transformatörünün matematiksel modelinin oluşturulabilmesi, elektrik eşdeğer devresinin çözülebilir hale gelmesi için manyetik devrenin matematik modelinin de oluşturulması gerekmektedir.

3.3. Manyetik Devrenin Model

Manyetik malzemelerin, matematik modelinin oluşturulabilmesi için çeşitli araştırmalar yapılmış olup farklı methodlar geliştirilmiştir [19]. Bunlara örnek olarak; EMTP ve ATP endüktör modeli, EMTDC modeli, “Seetee” modeli ve Jiles Atherton modelidir. Bunlardan pratikte uygulama kolaylığı bakımından “Seetee” modeli aracılığıyla manyetik devre modellenmeye çalışılmıştır.

3.3.1. EMTP ve ATP Endüktör Modeli [19]

EMTP ve ATP (Alternatif Transient Program) programı, iki farklı metod aracılığıyla nonlinear elemanların kullanımını sağlamaktadır:

- Gerçek nonlinear model (Type-93);
- Yaklaşık nonlinear (pseudo-nonlinear) modeller (Type-96 ve Type-98)

Gerçek modelde, elemanların nonlinear karakteristiği, nonlinear bir fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Örneğin; akımın akıma bağlı fonksiyonu gibi ($\psi = f(i)$). Böylece ATP ve EMTP, iteratif (tekrarlamalı) Newton-Raphson metoduyla nonlinear denklemlerin kombinasyonunu çözümlemektedir.

Pseudo- nonlinear modelinde ise, nonlinearlık küçük lineer parçalar (piece-wise lineer segments) olarak tanımlanmaktadır. Bu küçük doğrusal parçalar, programda uygun bir akım kaynağına paralel bağlı dirençlerle gösterilir. Bu sayede devreden geçen akı adım adım izlenerek, her bir adım için endüktansın hesaplanmasında kullanılacak en uygun lineer kısım belirlenmeye çalışılır.

Ancak bu metod her bir lineer parçacığı, bir önceki lineer kısma göre belirlediği için gerçek model değildir. Bu metodla nonlinearliğin mümkün olduğunca doğru simüle edilebilmesi için küçük akım aralıkları kullanmak gerekmektedir.

EMTP ve ATP’de ayrıca iki farklı manyetik saturasyon rutini bulunmaktadır:

- EMTP’de CONVERT, ATP’de ise SATURASYON alt rutini, rms saturasyon eğrisini histeresiz çevrimi gözardı edilerek tepe değerli $\psi - i$ datasına dönüştürür.

- EMTP'de HYSDAT ve ATP'de HYSTERESIS alt rutini Type-96 Pseudo-nonlinear modelinde gerekli olan histeresiz çevrimini sağlamak üzere tasarlanmıştır.

Pseudo modeli, akım transformatörünün mıknatıslanma eğrisinin Vrms-Irms datalarının CONVERT ile tepe değerli $\psi - i$ datasına dönüştürülmüş halini kullanmaktadır. Ancak mıknatıslanma eğrisi 10 veya daha az nokta ile tanımlanabilmektedir. Zaten bu nedenle parçalı lineer model elde edilebilmektedir.

$\psi - i$ eğrisi oluşturulurken her bir doğrusal segment için efektif gerilim değeri, ψ 'ye (3.1) bağıntısı (k ; segment sayısı, w ; açısal frekans olmak üzere) ile, ilk doğrusal segment için de efektif akım (3.2) bağıntısı ile tepe değerli akıma dönüştürülür.

$$\psi_k = \frac{\sqrt{2}V_k}{\omega} \quad (3.1)$$

$$I_1 = I_{1-rms} \cdot \sqrt{2} \quad (3.2)$$

Diğer segmentler için ($k \geq 2$), akının $\psi_k(\theta) = \psi_k \cdot \sin \theta$ olduğu dikkate alınarak, her bir segment için (3.3) bağıntısı [20] kullanılarak I_{k-rms} 'ler hesaplanır sonra da tepe değerli akım (3.2) ile elde edilir.

$$I_{k-rms}^2 = \frac{2}{\pi} \left(\int_{b_1}^{\theta_1} \left(\frac{\psi_k \cdot \sin \theta}{L_1} \right)^2 d\theta + \int_{b_1}^{\theta_2} \left(I_1 + \frac{\psi_k \cdot \sin \theta - \psi_1}{L_2} \right)^2 d\theta + \dots \right. \\ \left. + \int_{b_{k-1}}^{\pi/2} \left(I_{k-1} + \frac{\psi_k \cdot \sin \theta - \psi_{k-1}}{L_k} \right)^2 d\theta \right) \quad (3.3)$$

Fakat öncelikle (3.3)'teki son segment için bilinmeyen L_k 'nın hesaplanması gerekmektedir. Bunun için de (3.3) denkleminin son segmenti için (3.4) eşitliği yazılır. Bu eşitlikteki a_{lk} , b_{lk} , c_{lk} katsayıları son segmentten alınmak üzere $Y_k = I/L_k$ 'dır.

$$a_{lk} Y_k^2 + b_{lk} Y_k + c_{lk} = 0 \quad (3.4)$$

(3.4) denklemi ikinci dereceden bir bilinmeyenli denklem olarak çözümlenir ve buna bağlı olarak tepe değerli akım i_{lk} (3.5) ile hesaplanabilir.

$$i_k = i_{k-1} + Y_k (\psi_k - \psi_{k-1}) \quad (3.5)$$

Böylece EMTP/ATP için gerekli $\psi - i$ eğrisi elde edilmektedir. Söz konusu EMTP/ATP modelleri, akım transformatörünün primer akımının kesilmesi durumunda sekonderdeki artık mıknatısiyetin etkisini de gösterebilmektedir. Ayrıca EMTP/ATP güç sistemlerine ilişkin çalışmalara da entegre edilebilmektedirler.

Başlıca dezavantajı ise Type-96 histeresizli reaktör modeli için data oluştururken akım transformatörünün mıknatıslanma eğrisine ait noktaların (tepe değerli $\psi - i$ olarak) işlenmesinin gerekmesidir.

3.3.2. EMTDC Modeli [19]

Bu model, transformatör eşdeğer devresindeki manyetik devreyi, nonlinear bir endüktöre paralel bağlı bir direnç ile göstermektedir [21], [22]. Manyetik devreden geçen akımın, mıknatıslama i_m ve histeresiz akımı i_c olmak üzere iki bileşenden oluştuğu dikkate alınmaktadır. Mıknatıslanma akımı, güç serisi denklemleri ile, histeresiz akımı ise nüve malzemesinin Steinmetz katsayıları [23] kullanılarak eksponensiyel denklem olarak tanımlanmaktadır. Eddy akımları ve diğer etkiler ise i_c akımına eklenmektedir.

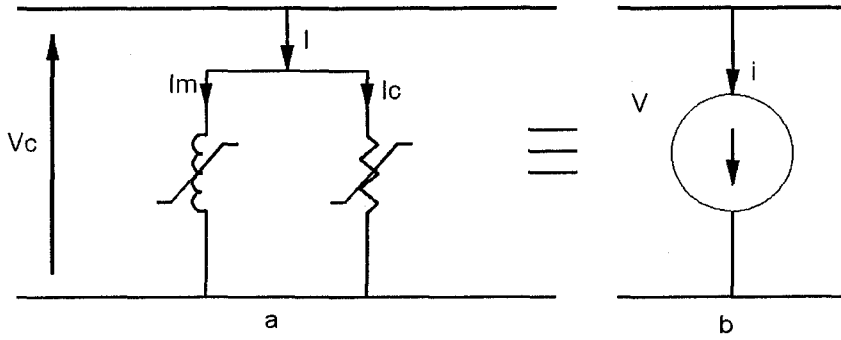
i_m için oluşturulan güç serisi denklemlerinin katsayıları, transformatörün saturasyon eğrilerinden çıkartılmaktadır. Dolayısıyla bu model, güç serisi denklemlerinin katsayılarının belirlenmesi için ön hesaplamalar gerektirmektedir.

Oluşturulan bu denklemler ile EMTP/ATP'ye benzer olarak düzgün ve sürekli bir çevrimi elde edilir.

Genellikle elektromanyetik transient programlarda, endüktans ve kapasitansların bir akım kaynağı ile paralel konduktanslar ile gösterildiği Dommel [24] algoritması kullanılır. Nonlinear elemanlar, piece-wise lineer konduktanslar ile gösterilir. Bunun olumsuz yanı, piece-wise lineer konduktansda bir parçadan (segment) diğerine geçerken bir değişiklik gerektiğinde sistemin bütün konduktans matrisinin yeniden hesaplanmasının gerekmesidir. Ayrıca yeniden hesaplanan konduktans matrisinin tekrar tersinin (inverse) alınması istenmeyen bir durumdur.

Şekil 3.3'te bir transformatörün, nonlinear bir endüktör ile paralel bağlı nonlinear bir direnç içeren manyetik devresi yer almaktadır. (a) ve (b) şekilleri ile gerilim/akım ilişkisi gösterilmektedir. Eddy akım kayıplarını ifade edecek direnç

değeri sabit kabul edilmekte ve akım kaynağına dahil edilmemektedir. Bu nedenle akım kaynağı sadece i_m ve i_c akımlarını içermektedir.



Şekil 3.3. Manyetik devrenin eşdeğer devresi ve akım kaynağı

Mıknatıslanma akımı, bilindiği üzere nüveden geçen toplam akıya bağlıdır. Bu modelde mıknatıslanma akımı ile akı arasındaki ilişki (3.6) bağıntısı ile ifade edilmiştir. k_j ve a_j bütün j 'ler için pozitif olmak üzere [21],

$$i_m = \sum k_j \psi^{a_j} \quad (3.6)$$

Ayrıca i_m , relüktans ve sekonder siper sayısı ile de (3.7) gibi tanımlanabilmektedir.

$$i_m = \frac{R}{N_2} \psi \quad (3.7)$$

Histeresiz akım bileşeni ise k_h sabit sayı, β ise malzemenin Steinmetz katsayısı olmak üzere (3.8) bağıntısı ile gösterilir.

$$i_c = k_h \psi^{\beta-1} \quad (3.8)$$

k_h ; frekansa bağlı bir katsayı olup burada belirli bir frekans değeri için sabit tutulması gerekmektedir. Böylece toplam akım kaynağı (3.9) gibi yazılır.

$$i = i_m + i_c \quad (3.9)$$

Akım kaynağının i değerlerine karşılık gelen gerilim v değerleri de (3.10) ile hesaplanabilmektedir.

$$v = \frac{d\psi}{dt} \quad (3.10)$$

Böylece EMTDC modeli, şekil 3.3'teki akım/gerilim ilişkisini belirtilen bu denklemler aracılığıyla kurmaktadır. Fakat (3.6) ve (3.8) denklemlerindeki v ve Ψ değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. En önemlisi de gerilim ve akımın birbirinden

bağımsız olmaması iteratif tekniklerle çözümü gerekli kılmakta, bu da simulasyonu zorlaştırmaktadır.

3.3.3. Jiles-Atherton Modeli

Jiles-Atherton modelinin temelini, ferromanyetik malzemelerin manyetik domenlerine ilişkin fiziksel teoriler oluşturmaktadır [19], [25], [26]. Bu modelde nüveye ilişkin parametreler diğerlerinden farklılık göstermektedir. Örneğin malzemenin manyetik saturasyon momenti M_s , domenler arası kuplaj faktörü α , ısıt enerji A , manyetik moment ...vb. gibi deneysel metodlarla belirlenebilen veya ölçülebilen parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu model nüvenin histeresiz çevrimi için geliştirilmiştir. Dolayısı ile akım ve gerilim parametrelerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Histeresiz çevrimini iki şekilde modellemektedir:

- Statik ya da anhisteretik model; malzemenin bir önceki durumunun gözardı edildiği B-H eğrisi,
- Dinamik model; malzemenin bir önceki konumuna göre B-H değişimini gösteren dört bölgeli çevriminin oluşturulmasında kullanılır.

3.3.4. “Seetee” Modeli [19]

“Seetee” modeli, Frolich denklemi [19], [27], [28] aracılığıyla nonlinear B-H eğrisini karakterize etmektedir. Frolich denklemi (3.12); B-H eğrisi S formundaki yönlendirilmiş saçlardan oluşan nüvelerin, başlangıç (μ_0) ve azami bağlı geçirgenliği (μ_m) parametreleri aracılığıyla yaklaşık anhisteretik B-H eğrilerini oluşturmaya yarayan ampirik bir denklemdir.

Frolich denkleminde B-H değişiminin, matematiksel olarak manyetik akı yoğunluğunun, manyetik alan şiddetine göre türevi (3.11) ile ifade edilebilmesinden yararlanılmaktadır. Bu sayede nüvenin manyetik geçirgenliği hesaplanılmaktadır.

$$\mu_0 \cdot \mu_r = \frac{dB}{dH} \quad (3.11)$$

Bu model ile, B-H değişimi anhisteretik olarak çizilebilmektedir. Histeresiz çevrimini simüle etmemesine rağmen doyuma girebilen (koruma akım trf.’leri) akım

transformatörlerinin test sonucu B-H eğrileri ile Seetee modelinden elde edilen B-H eğrisi karşılaştırıldığında sonucun oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Bu da aynı nüvenin birden çok histeresiz döngüsü dikkate alınmasının, akım transformatörünün sekonder akımının bozulmasında çok az bir etkisi olduğu görüşünü ortaya çıkarmıştır. Frolich denklemi (3.12)'de yer almaktadır.

$$B = \frac{H}{c + b \cdot |H|} \quad (3.12)$$

Buradaki c ve b parametreleri nüvenin özelliklerinden belirlenen katsayılardır;

$$c = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_m} \quad (3.13)$$

$$b = \frac{1 - 1/\sqrt{\mu_m}}{B_{sat}} \quad (3.14)$$

μ_m ; nüvenin azami geçirgenliği [H/m],

B_{sat} ; nüvenin saturasyondaki manyetik alan yoğunluğu [Tesla].

Azami geçirgenlik ya da B-H eğrisinin eğiminin azami değeri μ_m , manyetik alan yoğunluğunun sıfır olduğu anda eğrinin H eksenini kestiği noktadır. [19]'de başlangıç geçirgenliği olarak da adlandırılmaktadır. Nüvede bağıl geçirgenliği birim değere ulaşması ($\mu_r = 1$), saturasyondaki akı yoğunluğuna (B_{sat}) ulaşıldığı anlamına gelir. Silisli saçlarda genelde bu değer 1.8 Tesla olarak bilinir. Böylece Frolich denklemi $B = 0$ ve $B = B_{sat}$ arasındaki H eğrisini, eğrinin hemen her noktasında değişen μ_r parametresini belirlemeye gerek kalmadan tanımlayabilmektedir.

Sonuç olarak nüvenin manyetik geçirgenliği için (3.15)'teki eşitlik yazılabilir.

$$\mu_0 \cdot \mu_r = \frac{dB}{dH} = \frac{(1 - b \cdot |B|)^2}{c} \quad (3.15)$$

Ayrıca bölüm 2.5'de incelenen (2.13) denklemindeki değişken geçirgenlik yerine Frolich denkleminin türevi $dB/dH = \mu_0 \cdot \mu_r$ [19] yazılabilir ki bu akım transformatörünün elektrik eşdeğer devresinin çözülmesini pratik hale getirir. Seetee modelinin kullanımında bir takım kabuller yapılmaktadır:

- B-H eğrisinin tek değerli olduğu ya da eğrinin alanı olmadığı,

- Azami geçirgenliğin $B = 0$ iken olduğu kabul edilir.

Bu kabuller, akım transformatörünün primerinden geçen büyük akımların, nüvede geniş akı salınımlarının olmasına yol açtığı durumlarla (nüvenin doyum bölgesinde çalışması durumu), modelin kullanılabilirliğini sınırlamaktadır. Bu sebeple küçük akım değerleri ya da bilek noktasında çalışan ölçü amaçlı akım transformatörleri için bu model çok hassas sonuç vermeyebilir.

3.4. Nüve Endüktansının Matematiksel Modeli

Nüve endüktansının matematiksel modelinin oluşturulması için iki farklı metod kullanılmıştır. Bunlardan birincisi daha önce bahsedilen “Seetee” modeli aracılığıyla, ikincisi ise nüve üreticisinin belirlediği manyetik alan yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti (B-H) eğrisi aracılığıyla nüvenin endüktansının modeli elde edilmeye çalışılmıştır.

3.4.1. “Seetee” Modeli ile Nüve Endüktansının Matematiksel Modeli

“Seetee” modeli dikkate alınarak oluşturulacak nüve modeli, bu modelin kabul kriterleri nedeniyle, standart ölçü akım transformatörünün matematiksel modeli elde edilirken kullanılabilir. Bunun dışındaki uygulamalarda, kullanılan nüvenin Seetee kriterlerini sağlayıp sağlamadığı tespit edilmesi gerekir.

Seetee modelinin tercih edilmesinin sebebi, bu model ile nüve endüktansının değişimini gösteren bölüm 2.5.1’de verilen (2.13) bağıntısının, μ_r parametresinden bağımsız hale getirilebilmesidir:

(2.13) bağıntısı, çekirdeğin manyetik geçirgenliği $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ yerine, (3.15) denklemindeki eşitliklerden yararlanılarak (3.16) ve (3.17) gibi yazılabilir.

$$L_m = \frac{dB}{dH} \cdot N_2^2 \cdot A_c \cdot \frac{1}{L_c} \quad (3.16)$$

$$L_m = \left(\frac{1 - b|B|^2}{c} \right) \cdot N_2^2 \cdot A_c \cdot \frac{1}{L_c} \quad (3.17)$$

c ve b eşitlikleri bu denklemde yerine konulduğunda;

$$L_m = \left[\mu_m - \frac{|B|^2 (\mu_m - \sqrt{\mu_m})}{B_{sat}} \right] \cdot \mu_0 N_2^2 \cdot \frac{A_c}{L_c} \quad (3.18)$$

elde edilir. Bu sayede değişken μ_r yerine sabit değerli μ_m kullanılabilir. Ancak L_m denkleminin bu son halinin akım transformatörü eşdeğer devresinde kullanılabilmesi için, B manyetik alan yoğunluğu yerine akıma bağlı olarak yazılması gerekmektedir. Bunun için; B endüksiyonu, çekirdekten geçen akıya dolayısıyla uyartım akımına bağlı olarak değişmesi ve şekil 3.2'de eşdeğer devrede $i_l(t) = i_m(t)$ olmasından, (3.19) bağıntısından;

$$N_2 \cdot I_m = H \cdot L_c$$

$$(3.19)$$

ve Frolich denklemlerinden yararlanılabilir.

Frolich denklemlerinde (3.12) manyetik alan şiddeti H yerine;

$$H = \frac{N_2 \cdot I_m}{l_c} \text{ yazılır ise}$$

$$B = \frac{\frac{N_2 \cdot I_m}{l_c}}{\frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_m} + \left(\frac{1 - \frac{1}{\sqrt{\mu_m}}}{B_{sat}} \right) \left| \frac{N_2 \cdot I_m}{l_c} \right|} \quad (3.20)$$

Böylece manyetik alan yoğunluğu, mıknatıslanma akımına bağlı olarak yazılmış olur. Elde edilen (3.20) eşitliği, (3.18)'de yerine konulduğunda (3.21) bağıntısı oluşmaktadır.

$$L_m = \mu_0 \cdot \mu_m \cdot N_2^2 \cdot \frac{A_c}{L_c} - \frac{\frac{N_2^4 \cdot I_m^2 \cdot \mu_0 \cdot A_c \cdot (\mu_m - \sqrt{\mu_m})}{L_c^3}}{\frac{1}{\mu_0^2 \cdot \mu_m^2 \cdot B_{sat}^2} + \frac{|I_m| \cdot 2 \cdot N_2 \cdot (\sqrt{\mu_m} - 1)}{\mu_0 \cdot \mu_m \cdot B_{sat}^2 \cdot L_c \cdot \sqrt{\mu_m}} + \frac{N_2^2 \cdot I_m^2 \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\mu_m}} + \frac{1}{\mu_m} \right)}{B_{sat}^2 \cdot L_c}} \quad (3.21)$$

I_m ; mıknatıslanma akımı sinüzoidal kaynağın her bir “t” anında farklı değer alacağı için $I_m = I_{tepe} \cdot \sin \omega t$ şeklinde yazılarak L_m parametresinin de her bir “t” anı için alacağı değer bulunabilir. Böylece nüvenin endüktans modeli olarak matematiksel bir denklem elde edilmiş olur. Bununla birlikte bu denklemin, akım transformatörünün matematiksel modelinde kullanılabilirliği sayısal örneklerle ispatlanması çalışmaları devam etmektedir.

3.4.2. Nüve Üreticisinin Belirlediği B-H Eğrisi ile Nüve Endüktansının Matematiksel Modeli

Ölçü akım ve koruma akım transformatörlerinin tasarımında; hassasiyet sınıfının öngörülebilmesi, sekonderdeki mıknatıslanma kayıplarının öngörülmesi anlamına geldiğinden ve bunun içinde bölüm 3.2’de de belirtildiği üzere nüvenin nonlinear L_m endüktansının belirlenmesi gerektiğinden, hassasiyet sınıfının hesapla öngörülmesi yerine prototip bir transformatörün test edilmesi yolu tercih edilmektedir. Bu da tahmin edileceği üzere maliyetli olmakta ve zaman almaktadır. Transformatörün ortalama olarak çalışacağı bölgeye göre L_m ’nin değişimini gözardı ederek (örneğin lineer bölge için sabit bir L_m belirlemek gibi) yaklaşık bir değer belirlemek mümkün olsa da, standartlarda belirtilen hata sınırlarının genellikle çok küçük olması ortalama ya da yaklaşık hesaplar yeterli gelmemektedir. Ancak bu metod ile oldukça hassas hesaplama yapmak mümkün olabileceği düşünülmektedir.

Ayrıca bu metod “Seetee” modelinden farklı olarak; her tipteki nüve için, üreticisi tarafından belirlenen B-H eğrisinden yararlanılarak elde edileceği için çok daha geniş bir kullanım alanına sahip olacaktır.

Bir akım transformatörünün tasarımında; primerden geçen akımın, çevirme oranına uygun olarak sekonder taraftaki ölçü ya da koruma ekipmanlarına iletilebilmesi için sekonder uçlarında yeterli gerilimin endüklenmesi gerekmektedir. Bu nedenle genellikle hesaplamalara başlarken yaklaşık olarak ihtiyaç duyulan gerilim ve çevirme oranından ve amper-sarım dengesinden siper sayısı belirlenebilir. Bu durumda eğer kullanılabilecek nüvelerin B-H eğrileri de biliniyor ise sekonder devrenin non-linear endüktansı ve mıknatıslanma akımı belirlenebilir.

Sekonderde endüklenecek gerilim sinüzoidal olacağı için hesaplamaların her bir “t” anı için yapılması gerekmektedir. Bilinen endüklenen gerilim bağıntısında [29]; $e(t)$ sekonderde endüklenmesi gereken gerilim anlamına gelmek üzere her iki tarafın integrali alınır. Buna göre (3.22)’teki istenen gerilimin endüklenebilmesi için nüveden geçmesi gereken akı bulunur.

$$e(t) = N_2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.22)$$

$$\int e(t) \cdot dt = \int N_2 \cdot d\varphi \quad (3.23)$$

$$\int E_{tepe} \cdot \cos wt = N_2 \cdot \varphi \quad (3.24)$$

$$\varphi(t) = \frac{E_{tepe} \cdot \sin(wt)}{w \cdot N_2} \quad (3.25)$$

Böylece her bir “t” anı için sekonder devreden geçen akı ve buna bağlı olarak da (3.26) aracılığıyla manyetik akı yoğunluğu hesaplanabilir.

$$B(t) = \frac{\varphi(t)}{A_c} \quad (3.26)$$

Daha sonra her bir “t” anı için hesaplanan $B(t)$ ’lere karşılık gelen $H(t)$ değerlerinin belirlenmesinde, üretici tarafından verilen B-H eğrisi ya da B ve H dataları kullanılır. Üreticinin verdiği B datası ile hesaplanan $B(t)$ değerlerinin çakışmama ihtimali olacağı için doğrudan $B(t)$ ’ye karşılık gelen $H(t)$ bulunamayabilir, enterpolasyon yapmak gerekebilir. Bunun için de Matlab, Mathcad ya da benzeri bir programda kod yazılarak oldukça yaklaşık $H(t)$ ’ler bulunabilir.

Bölüm 2.5’de bahsedilen $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$ ve $L_m = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_2^2 \cdot A_c \cdot \frac{1}{L_c}$ aracılığıyla her

“t” anı için nüvenin manyetik geçirgenliği ve endüktansı hesaplanabilir. Son aşamada da

$$H = \frac{N_2 \cdot I_m}{l_c} \quad (3.27)$$

bağıntısından yararlanarak I_m mıknatıslanma akımına ulaşılabilir.

Bu metodun örnek olarak 500/1A 5P10 5VA'lık teknik değerlerine sahip bir akım transformatörü için uygulanması:

Söz konusu transformatörde kullanılan nüvenin üreticiden alınan teknik bilgileri;

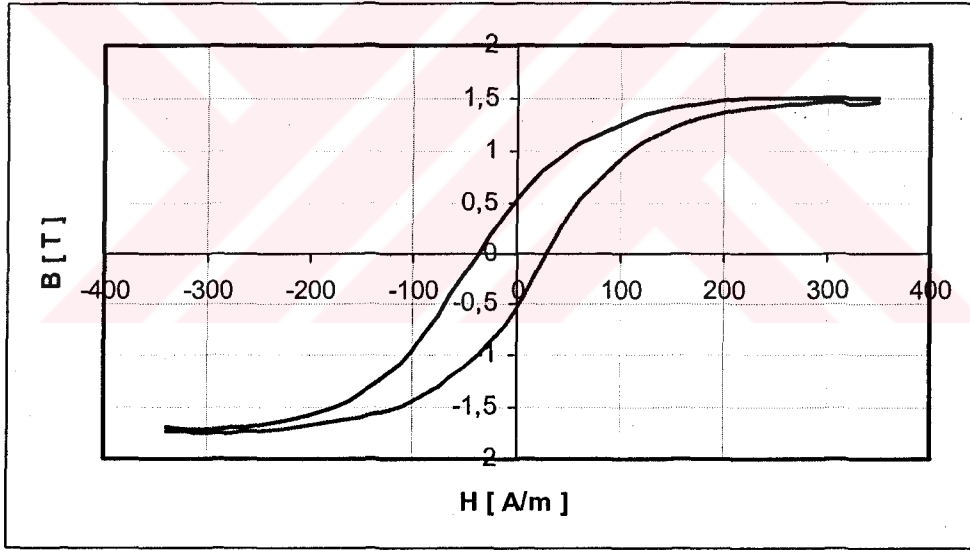
Ferromanyetik malzemesi Fe-Amorf'tur,

Yüksek frekanslı nüve sınıfına girmekte olup özel uygulamalar için 200 kHz'e kadar kullanılabilir (standart akım transformatörlerinde kullanılan nüvelerin azami çalışma frekansı 400 Hz'dir),

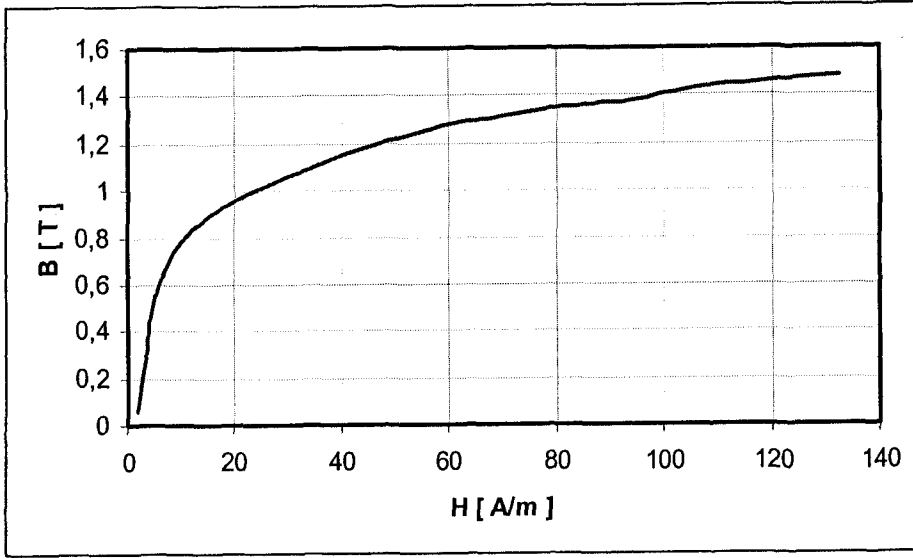
Saturasyon akı yoğunluğu, 1.5 Tesla, $H=400\text{A/m}$ ve 400 Hz 'de azami akı yoğunluğu 1.4 Tesla'nın altında değildir,

Toroidal nüve boyutları 120x80x25 mm, etkin kullanım kesiti, 375 mm²,

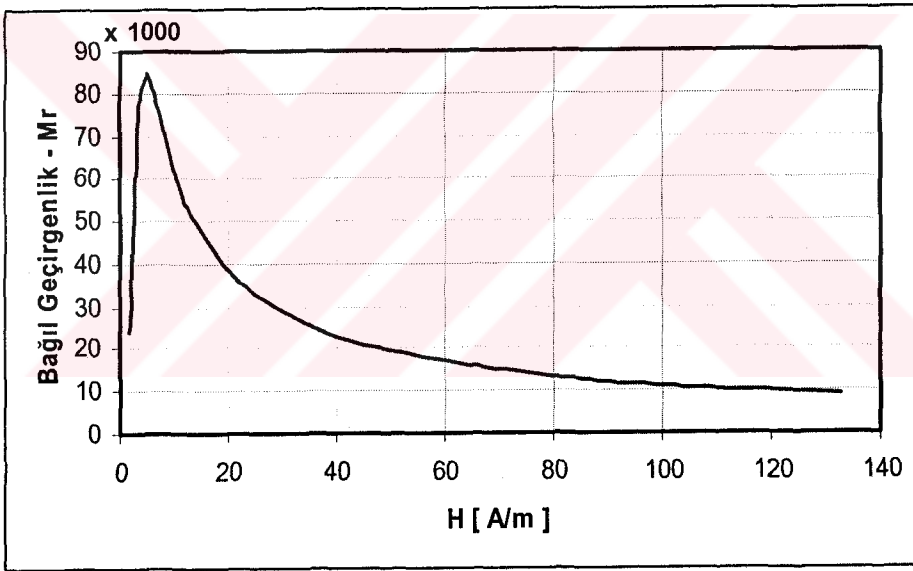
Karakteristik eğrileri şekil 3.4 (a), (b), (c) ve (d)'de yer almaktadır.



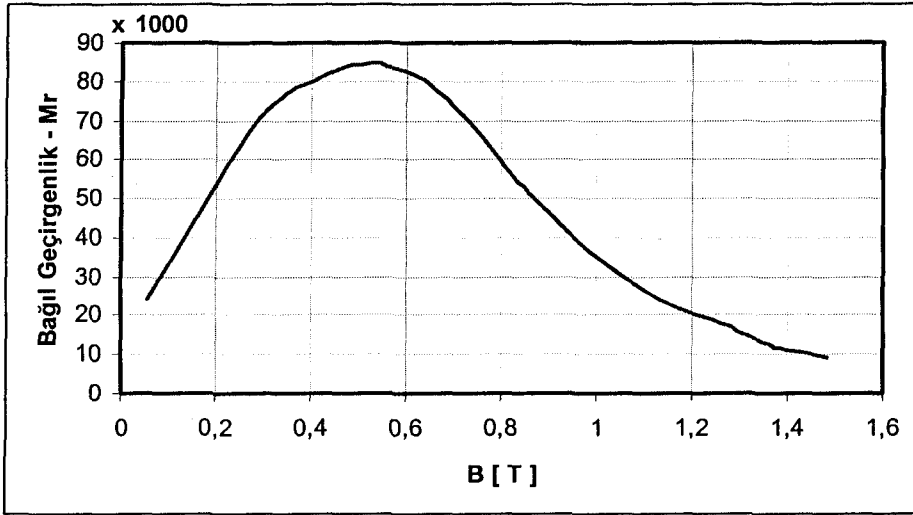
Şekil 3.4(a) Tipik histeresiz çevrimi



3.4(b) $F=50\text{Hz}$ için B-H eğrisi



Şekil 3.4(c) Bağıl manyetik geçirgenlik-manyetik alan şiddeti eğrisi



Şekil 3.4(d) Bağıl manyetik geçirgenlik-manyetik alan yoğunluğu eğrisi

Tablo 3.1. Şekil 3.4'teki eğrilere ilişkin noktasal datalar

H, [A/m]	B, [T]	Hc, [A/m]	Br, [T]	μ_r	P, [W/kg]
1,89	0,0564	0,51	0,015	23831	0,05
3,22	0,2693	2,35	0,200	66665	0,09
3,58	0,3464	2,61	0,263	77125	0,11
3,58	0,3464	2,61	0,263	77125	0,12
4,40	0,4598	3,05	0,364	83221	0,16
5,07	0,5391	3,40	0,428	84680	0,17
5,31	0,5576	3,53	0,446	83661	0,21
6,28	0,6343	3,98	0,515	80462	0,29
8,45	0,7360	4,98	0,594	69336	0,26
11,74	0,8231	5,71	0,651	55802	0,34
14,04	0,8725	6,16	0,677	49466	0,36
21,81	0,9860	7,03	0,731	35988	0,32
37,61	1,1322	8,47	0,787	23969	0,37
47,82	1,2028	8,98	0,824	20023	0,35
58,87	1,2740	9,64	0,862	17229	0,41
67,45	1,3018	9,80	0,839	15366	0,60
85,34	1,3583	10,42	0,881	12672	0,29
94,21	1,3738	10,11	0,892	11609	
105,99	1,4286	10,83	0,868	10732	
132,51	1,4828	9,95	0,889	8909	

Yukarıda özellikleri verilen nüve ile 500 /1 A olarak çalışacak akım transformatörünün sekonderinde endüklenecek azami tepe gerilimi (3.16) denklemi ile hesaplanabilir [30].

$$E_{tepe} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot B_{max} \cdot q_E \cdot w \cdot 10^{-8} \quad (3.16)$$

Buna göre,

$f=50$ Hz,

$B_{max}=15000$ Gauss,

q_E (nüve kesiti) $=3.75$ cm²,

w (sipir sayısı) $= 500$ olmak üzere;

sekonderde $E_{tepe} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 15000 \cdot 3.75 \cdot 500 \cdot 10^{-8} = 88.3$ V gerilim endüklenebilir.

Histeresiz çevrimi dikkate alınacak ise bir periyot için ya da sadece mıknatıslanma eğrisi çıkartılacaksa, T/4 için istenen zaman aralıkları ile (3.25), (3.26) denklemi kullanılarak manyetik akı yoğunluğunun zamana bağlı değişimi bulunur. Sonrasında mıknatıslanma akımının, nüvenin endüktansının zamana bağlı değişimini bulmak için gerekli parametreler aşağıdaki kod ve üreticiden alınan datalar aracılığıyla elde edilir.

B_h ; T/4 için zamana bağlı hesaplanan manyetik akı yoğunluğu,

$k=1:20$;

$B_h=[0.219, 0.416, 0.572, 0.673, 0.707]$;

for $k=1:5$

for $n=1:20$ üreticinin B için verdiği data sayısı

if $B_h(k) > B(n)$ & $B_h(k) < B(n+1)$

$B1(k)=B(n)$;

$B2(k)=B(n+1)$;

$M1(k)=M(n)$;

$M2(k)=M(n+1)$;

$n=21$;

end

end

end

$dtB=0.01$; B için adım büyüklüğü

for $n=1:5$

$adims(n)=(B2(n)-B1(n))/dtB$; toplam adım sayısı

$hadims(n)=(B_h(n)-B1(n))/dtB$; hedef adım sayısı

$dtM=(M2(n)-M1(n))/adims(n);$ *M için adım büyüklüğü*
 $Mh(n)=M1(n)+hadims(n)*dtM;$ *hesaplanan B'lere karşılık gelen Mh'lar bulunur*
 end

Sonuç olarak söz konusu transformatör üretilmeden önce tasarım aşamasında iken yaklaşık mıknatıslanma eğrisi bulunmuş olur. Buna bağlı olarak da hassasiyet sınıfının ne olacağı öngörülebilir.

3.5. Akım Transformatörünün Matematiksel Modelinin Elde Edilmesi

Akım transformatörünün matematiksel modelini elde edilirken, bölüm 3.4'de elde edilmiş olan nüvenin matematiksel bağıntıları ve AT'nin sadeleştirilmiş elektrik eşdeğer devresi kullanılacaktır (Şekil 3.2). Bu eşdeğer devre çevre akımları metodu [31] ile çözülecektir.

$e(t)$; anlık kaynak gerilimi,

$i(t)$; anlık kaynak akımı, primer akımı,

$i_1(t)$; birinci çevrenin anlık akımı,

$i_2(t)$; ikinci çevrenin anlık akımı,

$i_m(t)$; mıknatıslanma akımı olmak üzere çevre akımları metoduna göre söz konusu eşdeğer devreye çevre denklemleri aşağıda yer almaktadır.

$$e(t) = L_m(t) \frac{di_1(t)}{dt} \quad (28)$$

$$e(t) = (R_2 + R_b) i_2(t) + (L_2 + L_b) \frac{di_2(t)}{dt} \quad (29)$$

Ayrıca E, kaynak geriliminin tepe değeri olmak üzere,

$$e(t) = E \cdot \cos \omega t \quad (30)$$

$$i_1(t) = i_m(t) \quad (31)$$

$$i(t) = i_m(t) + i_2(t) \quad (32)$$

(30) ve (31) denklemlerine göre (28) ve (29) yeniden düzenlenilerek (33) ve (34) gibi olur.

$$E \cdot \cos \omega t = L_m(t) \frac{di_1(t)}{dt} \quad (33)$$

$$\frac{di_2(t)}{dt} + \frac{(R_2 + R_b)}{(L_2 + L_b)} i_2(t) = \frac{E}{(L_2 + L_b)} \cdot \cos \omega t \quad (34)$$

(34) denkleminin öz çözümü ;

$$i_{2n}(t) = K \cdot e^{st} \quad (35)$$

S için $s = \frac{d}{dt}$ ve zorlanmış kısım sıfıra eşitlenir.

$$i_2(t) \cdot s + \left(\frac{R_2 + R_b}{L_2 + L_b} \right) i_2(t) = 0 \quad (36)$$

$$s = - \left(\frac{R_2 + R_b}{L_2 + L_b} \right) \quad (37)$$

Zorlanmış çözüm için; $i_2(t) = A \cdot \sin \omega t + B \cdot \cos \omega t$ kabul edilerek (38)'da yerine konulur ve (39) elde edilir.

$$\frac{di_2(t)}{dt} = \frac{E}{(L_2 + L_b)} \cdot \cos \omega t - \left(\frac{R_2 + R_b}{L_2 + L_b} \right) i_2(t) \quad (38)$$

$$A \cdot \omega \cdot \cos \omega t - B \cdot \omega \cdot \sin \omega t = \frac{E}{(L_2 + L_b)} \cdot \cos \omega t - \left(\frac{R_2 + R_b}{L_2 + L_b} \right) \cdot A \cdot \sin \omega t - \left(\frac{R_2 + R_b}{L_2 + L_b} \right) \cdot B \cdot \cos \omega t \quad (39)$$

(39) çözümlendiğinde A ve B parametreleri (40) ve (41) olarak hesaplanır.

$$A = \frac{E \cdot \omega \cdot (L_2 + L_b)}{\omega^2 \cdot (L_2 + L_b)^2 + (R_2 + R_b)^2} \quad (40)$$

$$B = \frac{(R_2 + R_b) \cdot E}{\omega^2 \cdot (L_2 + L_b)^2 + (R_2 + R_b)^2} \quad (41)$$

Buna göre $i_2(t)$ denkleminde A ve B parametreleri yerine konularak (42) elde edilir.

$$i_2(t) = \frac{E \cdot \omega (L_2 + L_b)}{\omega^2 (L_2 + L_b)^2 + (R_2 + R_b)^2} \cdot \sin \omega t + \frac{(R_2 + R_b) E}{\omega^2 (L_2 + L_b)^2 + (R_2 + R_b)^2} \cdot \cos \omega t \quad (42)$$

(42) eşitliği, (43) aracılığıyla sadeleştirilir ve zorlanmış çözüm (44)'teki gibi olur.

$$\frac{\omega (L_2 + L_b)}{|z| |z|} = \frac{\sin \theta}{z} \quad (43)$$

$$i_2(t)_{zor} = \frac{E}{|z|} (\sin \theta \cdot \sin \omega t + \cos \theta \cdot \cos \omega t) \quad (44)$$

Sonuç olarak $K = -i_2(t)_{zor}$ olmak üzere sekonder devreden akan akımın zamana bağlı tam çözümü elde edilir (45).

$$i_2(t)_i = K \cdot e^{-\left(\frac{R_2 + R_b}{L_2 + L_b}\right)t} + \frac{E}{|z|} (\sin \theta \cdot \sin \omega t + \cos \theta \cdot \cos \omega t) \quad (45)$$

Akım transformatörünün elektrik eşdeğer devresindeki, 1. çevre denkleminin (33) çözümü ile mıknatıslanma akımı (46)'daki bağıntı ile zamana bağlı olarak hesaplanabilir. Bunun için (46)'daki nüvenin endüktansının zamana bağlı değişimi, bölüm 3.4.2'deki metod ile ifade edilebilir. Ayrıca bölüm 3.4.1'deki nüve endüktansının zamana bağlı denkleminin kullanılabilirliği de ispatlandıktan sonra mıknatıslanma akımının bulunmasında kullanılabilir.

$$\int E \cdot \cos \omega t \, dt = \int L_m(t) \cdot dI_m(t) \quad (46)$$

3.6. Sonuç

Bu bölümde akım transformatörünün matematiksel modelini oluşturma çalışmaları yapılmıştır. Bunun için de öncelikle akım transformatörünün manyetik devresinin modeli araştırılmış, literatürde bu konuda yer alan başlıca manyetik devre modelleri incelenmiştir. Sonuç olarak da akım transformatörünün matematiksel modelinde, teorik olarak kullanılabileceği düşünülen, “Seetee” modeli aracılığıyla nüve endüktasının matematiksel modeli elde edilmiştir. Daha sonra bu model bölüm 3.4.1’de değinildiği üzere belirli durumlarda geçerli olabileceği için daha geniş uygulama alanına sahip yeni bir metod geliştirilmiştir. Bu metodda nüve üreticisi tarafından belirlenen B-H eğrileri kullanılmıştır. Bölüm sonunda ise akım transformatörünün elektrik eşdeğer devresinin çözüm denklemleri çıkartılmıştır. Sözü edilen iki metodun akım transformatörlerinin matematiksel modelinde uygulanabilirliğinin sayısal örneklerle gerçekleştirilmesi ve deneylerle teyidi ile ilgili çalışmalar ise devam etmektedir.

4. AKIM TRANSFORMATÖRÜNÜN SİNUSİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA PERFORMANSININ SİMULASYON İLE İNCELENMESİ

4.1. Giriş

Şebeke akımının harmonikli olması durumunda, koruma tipi akım transformatörlerinin çalışma aralığı önemli ölçüde değişebilmektedir. Transformatörlerin üretimi sırasında ulusal ve uluslararası standartlarda tanımlanan testlerle doğrulanan çalışma aralığı, koruma amaçlı rölelerin gerektiği gibi çalışabilmeleri açısından önemli bir parametredir.

Bu bölümde akım transformatörünün performansı; histeresiz olgusu ihmal edilip saturasyon etkisi dikkate alınarak EMTP'nin ATP [10] versiyonunda simülasyon ile incelenecektir. Bunun için öncelikle performansı araştırılacak koruma akım transformatörünün özelliklerine ve laboratuvar ortamında yapılan testlere değinilecektir. Daha sonra EMTP/ATP'de, akım transformatörünün simülasyonu oluşturulacaktır. Son olarak da kaynak dalga şekline bağlı olarak transformatörün performansı araştırılacak ve performansını en çok etkileyen parametreler (frekans, harmonikler, DC bileşen...) belirlenecektir.

4.2. Performansı İncelenen Akım Transformatörü

Performansı incelenen koruma akım transformatörü, bu çalışma için özel olarak [7]'ye göre üretilmiştir. Manyetik devresinde, yüksek frekanslı ferromanyetik malzeme kullanılmış olup nüve ile ilgili karakteristik bilgiler bölüm 3.4.2'de verilmiştir. Yüksek frekanslı nüve kullanımının sebebi, kısa devre ve anahtarlama akımlarının dalga formlarının 50 ya da 60 Hz'den yüksek frekanslı olmasıdır.

Akım transformatörü şekil 4.1.'de ve etiket değerleri ise Tablo 4.1.'de yer almaktadır.

Tablo 4.1 Akım transformatörünü tanımlayan temel parametreler



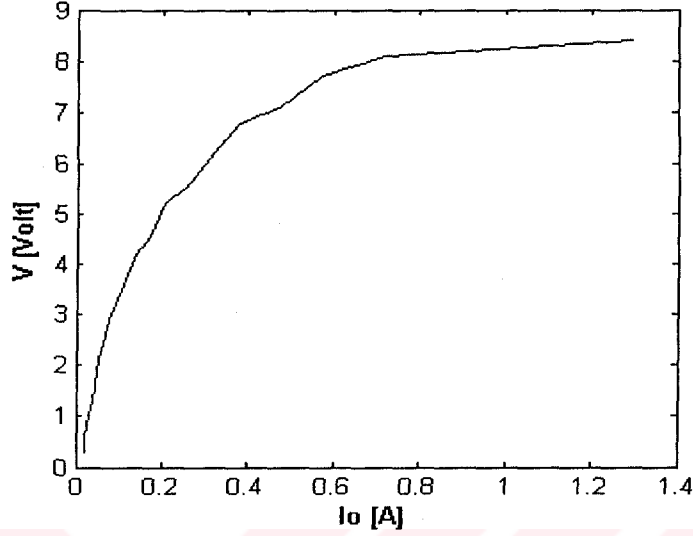
Etiket değerleri	300/5A 5P 5 5VA $I_{cth}=1 \times I_n$ $I_{th}=25kA1s$
Çevirme oranı	300/5A
Hassasiyet sınıfı (Accuracy class)	5P
Hassasiyet sınır aşırı akım faktörü "n" (Accuracy limiting factor)	5
Sekonder yükü (Burden)	5VA
Sürekli termik akımı (Continuous thermal current)	$I_{cth} = 1 \times I_n (=300A)$
Kısa devre akımı (short circuit current)	$I_{th}=25kA (1sn)$

Şekil 4.1. İncelenen akım transformatörü

Söz konusu bu transformatörün Tablo 4.1.'deki teknik özellikleri belirlenirken yapılacak parametrik analizler dikkate alınarak öncelikle kullanılabilen nüve cinsine karar verilmiştir. Bunun için frekansa bağlı incelemelerde daha sağlıklı sonuç vereceği düşünülerek çalışma frekans aralığı geniş olan, yüksek frekanslarda da çalışabilecek bir nüvenin kullanılması tercih edilmiştir. Söz konusu özel nüveler genellikle belirli standart boyutlarda temin edildiği için, kullanılacak nüvenin boyutları bu standart ebatlar ve transformatörün dış boyutlarına göre belirlenmiştir.

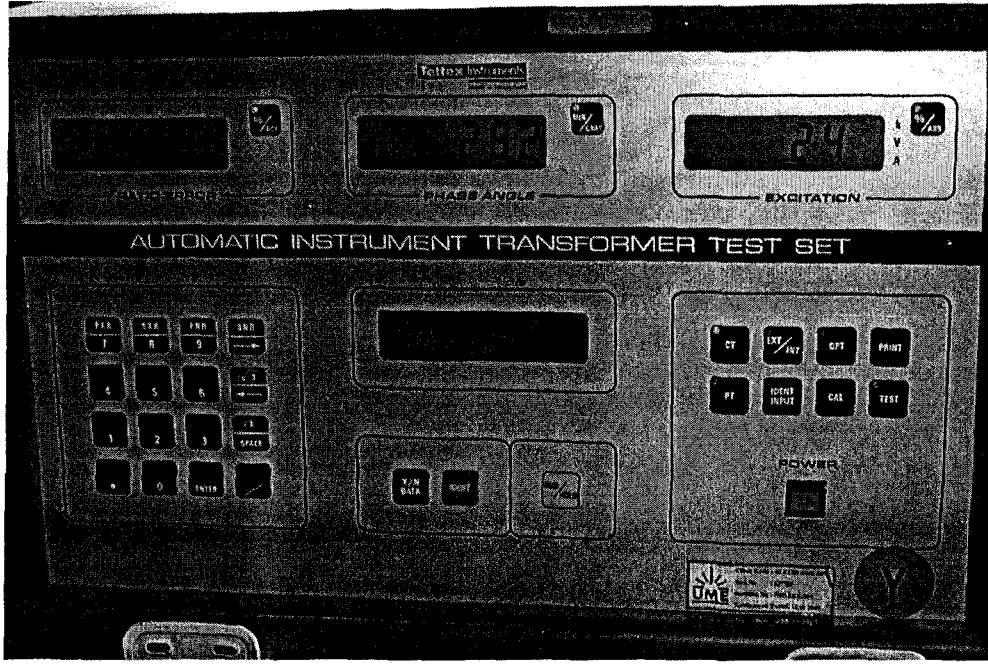
Sekonder devreyi oluşturacak nüvenin belirlenmesi ile aynı zamanda bu nüve ile sağlanabilecek klas ve burden parametreleri için de bir aralık tayin edilmiş olur. Çünkü nüve sabit kabul edildikten sonra istenen her klas ve burden sağlanamayacaktır. Bu transformatörde [7]'e uygun koruma akım transformatörleri için istenebilecek en küçük hassasiyet sınıfı olan 5P ve en küçük aşırı akım faktörü olan 5 tercih edilmiştir. Hassasiyet sınıfının küçük olması transformatörün belirlenen çalışma koşullarında çevirme oranı hatasının asgari olması (hassasiyeti yüksek) anlamına gelmektedir. İncelemelerde hassasiyeti yüksek bir transformatör kullanılmasının elde edilecek sonuçları yorumlarken faydalı olacağı düşünülmüştür.

İncelenen transformatörün mıknatıslanma eğrisi ise şekil 4.3'de yer almaktadır.



Şekil 4.3 Çevirme oranı 300/5A olan akım trf.'nun uyarım eğrisi

Çevirme oranının tespiti ise [4], [7] ve [11]'de belirtilen prosedüre göre yapılmaktadır. Koruma amaçlı sekonder devrenin çevirme oranı testinde, bir akım kaynağı aracılığıyla sekonder nominal yükü ile yüklendiği durumda, primer devreden nominal akımının geçmesi sağlanır. Aynı zamanda primer akımının, hata miktarı $\pm\%0.1$ 'in altında olduğu bilinen referans transformatöründen de geçmesi sağlanır. Buna karşılık olarak test edilmek istenen transformatör ile referans transformatörünün sekonderinden geçen akımlar şekil 4.4'deki cihaz aracılığıyla ölçülür. Söz konusu cihaz kendi içerisinde bu iki akım değerini kıyaslamakta ve böylece referans transformatöründen ölçülen akıma oranla, test edilen transformatörün çevirme oranı hatasını ve açı hatasını elde etmektedir. Buna göre incelenen akım transformatörünün çevirme oranı hatası $-\%0.55$ ve açı hatası ise $+30dk$ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.4 Hassasiyet sınıfının tespitinde kullanılan test cihazı

4.3. Akım Transformatörü Simülasyon Modelinin Oluşturulması

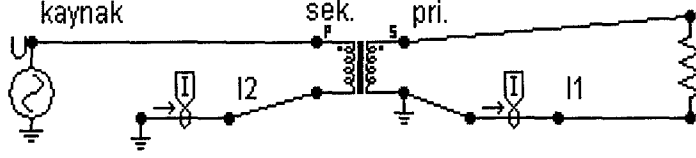
Akım transformatörünün simülasyonunda ATPdraw'da "saturable transformer (saturable 1 phase)" modeli kullanılacaktır. Öncelikle Şekil 4.5'teki devre kurulup saturable trf.'nin özellikleri, nüveye ilişkin uyartım karakteristiği programda girilecek ve bu modelin mıknatıslanma eğrisine göre doğru dönüştürme yapıp yapmadığı test edilecektir.

4.3.1. EMTP/ATPdraw'da Akım Ölçü Transformatörünün Test Devresinin Oluşturulması

EMTP/ATP, simülasyonda akı-akım verisini kullandığından, V-I datasını kendi içinde akı-akım datasına dönüştürür [9]. Bu sırada mıknatıslanma eğrisinde hata olma olasılığına karşı, transformatör modunun doğru çalıştığının tespit edilmesi gerekmektedir [32]. Bu işlem sekonder sargının mıknatıslanma eğrisine göre çalışıp

çalışmadığının testi gibi düşünebilir. (EMTP/ATP'de transformatör modeli hakkında detaylı bilgi bölüm 3.3'de bulunmaktadır.)

Bunun için Şekil 4.5'deki test devresi kurulur.



Şekil 4.5 ATPdraw'da transformatörün test devresi

Test devresi için ve simülasyonlar için ATPdraw'da saturable transformer (saturable 1 phase)"modeli kullanılmıştır. ATPdraw'da saturable 1 phase gerilim transformatörünün çalışma mantığına göre düzenlendiğinden test devresinde; "P" sekonder tarafı, "S" de tarafı primer tarafı göstermektedir.

Şekil 4.5'teki devre kurulduktan sonra saturable transformatörünün özellikler kısmı Tablo 4.2'ye göre girilir.

Tablo 4.2 Saturable trf.'un "attributes" kısmına girilen veriler [10],[32].

DEĞER	TANIMI
I0=0	Kararlı halde (steady state konumunda) nüvedeki akım
F0=0	Kararlı halde nüvedeki akı [Wb-sarım]
RMAG=0	Nüvenin direnci [ohm]. "RMAG=0" ile nüvenin direncinin sonsuz büyüklükte olduğu kabul edilmiş olur.
RP=0.268	Akım trf.'nün 75°deki sekonder sargısının direnci [ohm].
LP=0	Akım trf.'nün sekonderinin endüktansı.(Eğer "Xopt=power freq." seçilirse endüktans birimi [ohm] , "Xopt=0" yazılırsa birim [mH] olur.)
VRP=60	Akım trf.'nün sekonder akımı 1A kabul edilmek üzere primer akımı (300A / 5A = 60A/1A)
RS=0	Akım trf.'nün primer sargısının direnci [ohm]
LS=1E-7	Akım trf.'nün primer sargısının endüktansı.
VRS=1	Akım trf. 'nün sekonder akımı
RMS=0	"0" yazılırsa mıknatıslanma eğrisi i / Ø (akım/ akı) olarak, "1" yazılırsa I/V (akım/volt) olarak girilir.

Karakteristik kısmına ise transformatörün uyartım eğrisine ait değerler akım - gerilim ya da akım - akı olarak girilir. Bunun için de öncelikle mıknatıslanma eğrisi üzerinden doğruya en yakın simülasyonu yapılmasını sağlayacak olan noktaların belirlenmesi gerekir. EMTP/ATP'de mıknatıslanma eğrisi maksimum 10 nokta ile tanımlanabilmektedir. İncelenen transformatörün ölçüm sonucu elde edilen uyartım eğrisini (Şekil 4.3) ifade etmek için belirlenmiş olan noktalar Tablo 4.3'de yer almaktadır.

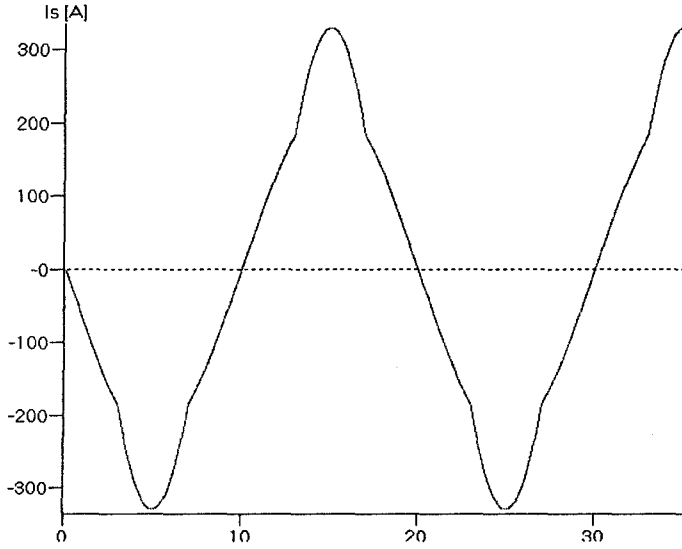
Tablo 4.3. 300/5A akım trf.'nun mıknatıslanma akımı eğrisi noktaları

V [Volt]	I [Volt]
1	0.03
4.2	0.14
5.2	0.21
6.1	0.31
7.1	0.47
7.7	0.57
8.4	1.3

Transformatörün mıknatıslanma eğrisi girildikten sonra; sekonder taraftaki gerilim kaynağına mıknatıslanma eğrisine ait bir gerilim değeri girilir. Böylece girilen gerilim değerine karşılık gelen akım değerinin devre üzerinde doğru olarak ölçülebilirliği tespit edilmeye çalışılacaktır.

Kaynak gerilimi = $5.2 \times \sqrt{2}$ V (tepe) Frekans = 50Hz

Son olarak direnç değeri de 1Ω olarak girilip gerekli ayarlar yapıldıktan sonra test devresi çalıştırıldığında elde edilen sekonder akımına ait eğri Şekil 4.6'teki gibidir.

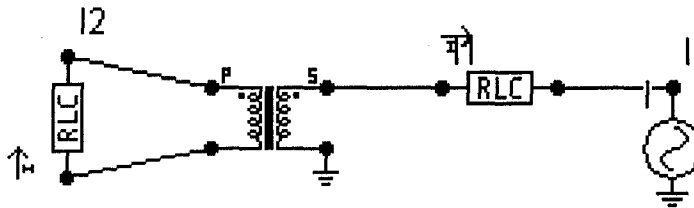


Şekil 4.6. Test devresi çalıştırıldığında elde edilen sekonder akımı

Sekonder akımının efektif değeri $=0.2098A$ 'dır. Tablo 4.3'den görüleceği üzere $0.21A$ 'e çok yakın bir değer elde edilmiştir. Aynı işlem uyarım eğrisine ait bütün gerilim değerleri için yapıldığında azami hata 0.002 mertebesinde ki bu hatada uyarım eğrisindeki V-I değerlerinin yuvarlanmış olması ve gerilimin tepe değerini girerken $\sqrt{2}$ katsayısının da etkisinin olduğu unutulmamalıdır.

4.3.2. EMTP/ATPdraw'da Akım Transformaörünün Simulasyon Devresi

Test gerçekleştirildikten sonra akım transformatörünün akım, faz ve bileşik hatası dolayısıyla da hassasiyetinin tespit edilebileceği, simulasyonda kullanılacak olan model oluşturulur (Şekil 4.7) ve güvenilirliği araştırılır.



Şekil 4.7 Akım transformatörü modeli

Şekil 4.7'teki devrede; I_2 akımının geçtiği kısım sekonder olup buradaki RLC, sekondere bağlanan ekipmanların, bağlantı araçlarının (röleler, kablolar vs.) yük

değerini devreye girebilmeyi sağlar. Tablo 4.1'deki akım transformatörünün sekonder yükü 5VA olduğu ve [7]'e göre 5VA ve üzerindeki yüklerde $\cos\phi$ değeri 0.8 kabul edildiği için cihazların R ve L değerleri, $R_y=0.16\Omega$ ve $L_y=0.382mH$ olarak hesaplanır. Hata ölçümü sırasında kullanılan kablonun direnci ise $R_k=0.03\Omega$ 'dur. Akım kaynağının bağlı olduğu kısım primerdir ve RLC, primere ait direnç ve endüktans ayrıca bağlantılardaki R parametrelerini girmeyi sağlar. İncelenen akım transformatörünün primerine ait R ve L parametrelerinin simülasyonda etkisinin olmadığı teyid edildiği için ihmal edilmiştir.

Program çalıştırıldığında elde edilen veriler ile deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında % 0.076'luk akım ve +2.4 dk'lık açı hatası ile ölçülen değerlere yakın sonuç elde edilebildiği görülmektedir. Bu işlemler farklı özelliklerdeki akım transformatörleriyle de yapıldığında sonuçlar, ölçülen değerlere oldukça yakın çıkmaktadır. Bu nedenle EMTP aracılığıyla oluşturulan akım transformatör modelinin güvenilir olduğu kabul edilebilir [3].

Akım transformatörünün sınıfını belirlemede nüve çok etkin bir görev üstlenmekte olduğundan nüvenin özelliğinin mümkün olduğunca gerçeğe yakın olarak modele aktarılması gerekmektedir. Genellikle koruma akım transformatörleri, bilek noktası ile diz bölgesi arasında çalışmaktadır. Buna rağmen simülasyonlarda nonsinüzoidal şartlar inceleneceğinden doyma bölgesi de dikkate alınmaktadır.

Saturasyon bölgesinde; H artmasına rağmen B artmadığından, primer akımın artış oranında sekonderde gerilim endüklenemez ve transformatör sınıfının dışına çıkar. Bu durum akım transformatörünün hatalarının hangi parametrelere bağlı olduğunu belirlemek için transformatör modelinden [30] elde edilen (47) ve bilinen (48) bağıntısı yardımıyla çıkartılan (49) denkleminde açıkça görülmektedir.

$$F = \frac{\sqrt{2} \cdot E \cdot 10^8 \cdot 10^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot q_E \cdot w \cdot \mu_g \cdot a_1} \quad (47)$$

$$E = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot B \cdot q_E \cdot w \cdot 10^{-8} \quad (48)$$

$$F = \frac{B \cdot 10^{-8}}{\sqrt{2} \cdot a_1 \cdot \mu_g} \quad (49)$$

E ; sekonderde endüklenen gerilimi [V],

F ; vektörel olarak hata akımını [%],

B ; manyetik akı yoğunluğunu [Tesla],

f ; frekansı [Hz],

q_E ; nüve kesiti [cm^2],

w ; sekonder siper sayısını,

μ_g ; nüvenin geçirgenliğini,

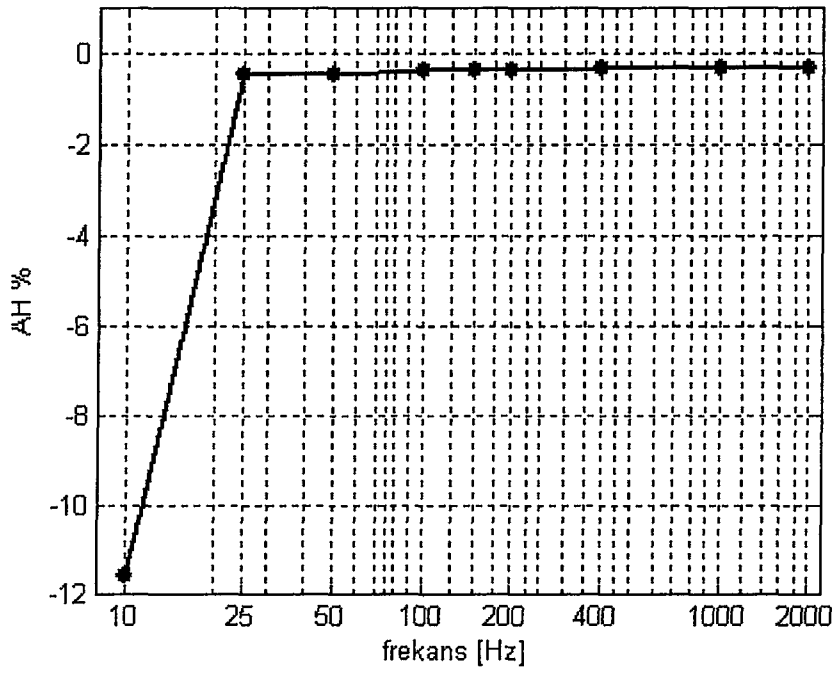
$a_1 = A_{\text{eff}} / \text{cm} = f(B)$ 'yi ifade etmektedir.

4.4. Kaynak Dalga Şeklinin Akım Transformatörünün Sınıfına Etkisi

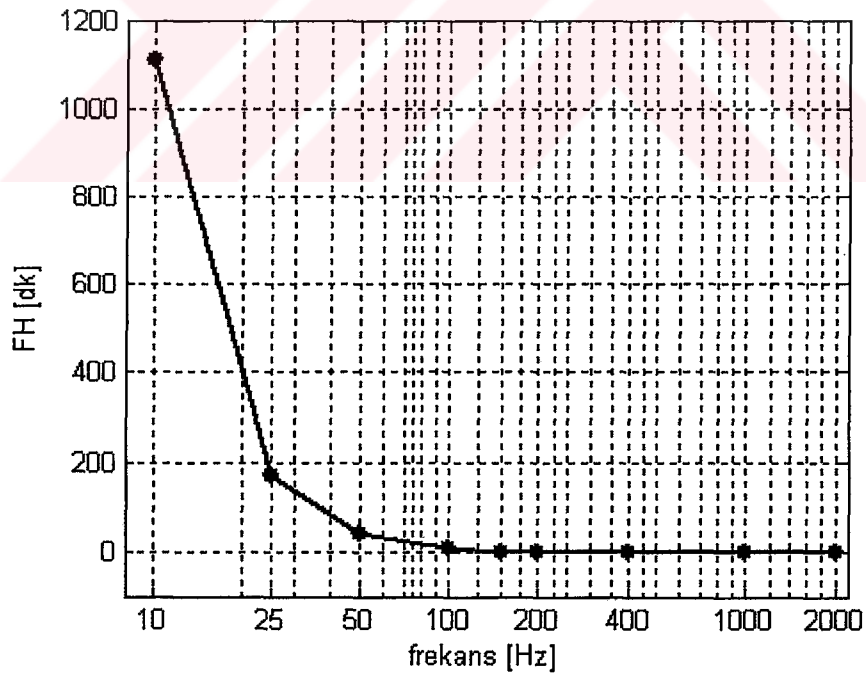
Normal çalışma koşullarında gerilim ya da akım transformatörleri sinüzoidal kaynağa bağlanırlar, buna rağmen sistemde nonlineer yükler, anahtarlamalar olması durumunda temel dalganın (akım, gerilim) sinüzoidal formu bozulur. Bu bozulma Harmonik teorisi kullanılarak incelenebilir. Harmonikli haldeki akım ve gerilimlerin cihazlara etkisi olacağı beklenmektedir [33]. Bu bölümde öncelikle primer akımının sinüzoidal olduğu durumda akım transformatörünün hata değişimi, daha sonra da nonsinüzoidal olduğu durumun etkisi incelenecektir. Böylece iki farklı koşulda elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılacaktır.

4.4.1. Sinüzoidal Şartlar

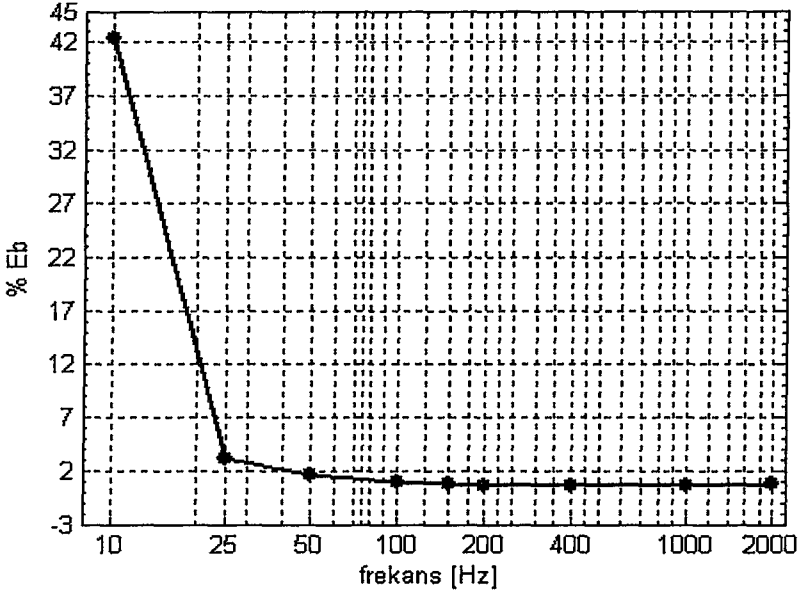
Sinüzoidal kaynağın nominal akımı sabit iken frekansa bağlı olarak akım transformatörünün hata değişimi incelendiğinde; 50 Hz'in altındaki frekanslarda [34] akım açısı ve bileşik hatanın giderek artmakta, 50 Hz'in üzerindeki frekanslarda ise giderek azalmaktadır (Şekil 4.8, 4.9, 4.10).



Şekil 4.8 Frekansa bağlı akım hatası değişimi



Şekil 4.9. Frekansa bağlı açî hatası değişimi



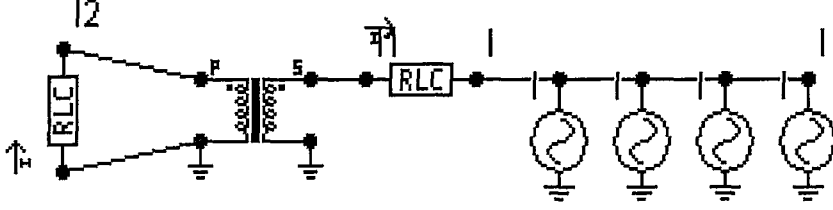
Şekil 4.10 Frekansa bağlı bileşik hata değişimi

Şekil 4.8, 4.9, 4.10'daki frekansa bağlı hata değişimi, (48) bağıntısındaki hata ile frekansın ters orantılı olmasını açıklamaktadır. Ancak bu ters orantı lineer değildir; 2000Hz'den itibaren hatanın frekansa bağlı değişiminin neredeyse sıfır düzeyine inmesi ve 25Hz ile 10Hz arasında hatanın büyük ölçüde artması (% -0.469'dan % -11.6'ya çıkması) ise (47) bağıntısındaki hata-frekans arasındaki ters orantının nonlinearliğini ispatlamaktadır. Ayrıca belirli bir frekans (limit frekans değeri) [17] değerinden sonra (48) denklemi geçerliliğini yitirecektir. Çünkü bu limit frekans değerine kadar, frekans arttıkça ((48) bağıntısında görüleceği üzere) endüklenen gerilim ve bunun yanında demir kayıpları da artmaktadır. Bu frekans değerine kadar endüklenen gerilimdeki artış, demir kayıplarındaki artıştan daha fazla olduğundan çevirme oranındaki hata azalmaktadır. Ancak limit frekans değerinden itibaren gerilimdeki artış, demir kayıplarını karşılayamamakta ve artan demir kayıpları çevirme oranı hatasını da artırmaktadır. Nitekim bileşik hata 1000Hz'e kadar azalmakta, 1000Hz'in üzerinde çok belirgin olmasa da artışa (% -0.6412'dan % -0.7475'e) geçmektedir.

4.4.2. Nonsinüzoidal Şartların Etkisi

Nonsinüzoidal dalgalar, zaman eksenine göre periyodik-simetrik veya periyodik-asimetrik olabileceği için bu iki tipteki dalga formlarının etkisi, ayrı ayrı Şekil 4.11'deki simülasyon devresi aracılığıyla incelenmiştir. Bununla birlikte şebekede periyodik olmayan ve asimetrik dalgalar da söz konusudur; bu tip dalgalar

genellikle anahtarlama, devreye yük girip çıkması ve kısa devre anlarında oluşurlar. Bu durumla ilgili araştırma bu tezde yer almamaktadır.



Şekil 4.11. Harmonikli şartlar için akım transformatörü modeli

Periyodik ve simetrik (başka bir deyişle ortalama değeri sıfır olan) dalgalar, sistemde tek sayılı harmonikler mevcutken söz konusu olmaktadır [35] Bunun için temel kaynağın nominal akımı 300A(rms), frekansı 50Hz iken, sistemde daha çok rastlanabilecek 3, 5, 7 gibi tek sayılı harmonikleri dikkate alarak ve harmonik akımlarını da I_{temel}/I_h şeklinde belirleyerek (THD % 41) analizler yapılmıştır (Tablo 4.4).

$$I_3 = I_3 \max \cdot \cos(3 \cdot \omega \cdot t),$$

$$I_5 = I_5 \max \cdot \cos(5 \cdot \omega \cdot t),$$

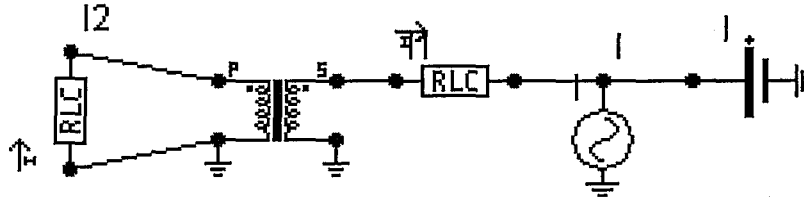
$$I_7 = I_7 \max \cdot \cos(7 \cdot \omega \cdot t).$$

Periyodik ve simetrik olmayan dalgalar ise, sistemde çift sayılı harmonikler mevcut olduğu durumda görülür. Ortalama değeri sıfırdan farklıysa DC bileşen ortaya çıkar. Bunun için de, yine temel kaynağın nominal akımı 300A(rms), frekansı 50Hz iken, sistemde daha çok rastlanabilecek 2, 4, 6 gibi çift sayılı harmonikleri dikkate alarak ve harmonik akımlarını da I_{temel}/I_h şeklinde [35] belirleyerek (THD % 58) analizler yapılmış olup Tablo 4.4'teki sonuçlar elde edilmiştir).

Tablo 4.4. Akım dalga şeklinin hataya etkisi

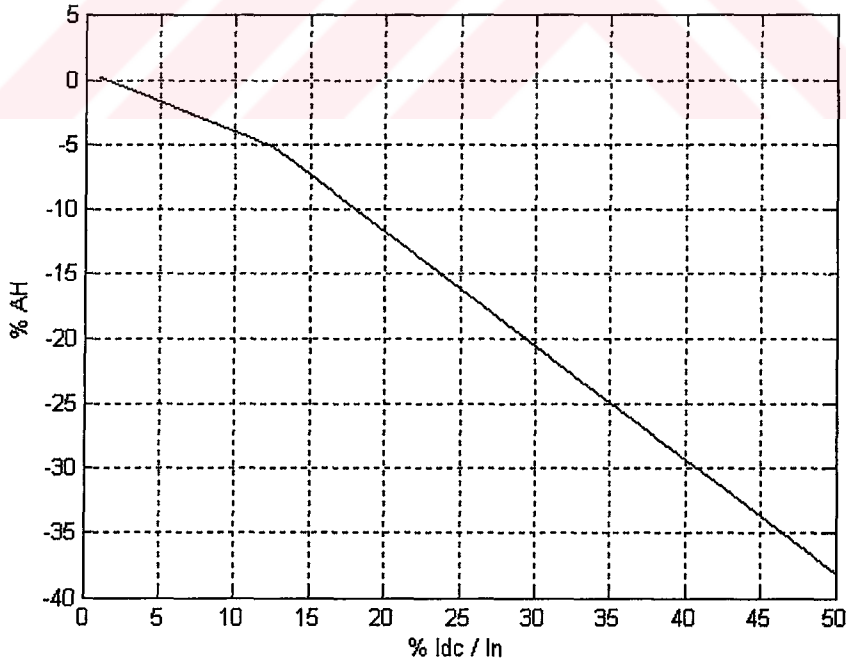
Kaynak	% THD	% Idc/In	% AH	FH [dk]	% ϵ_b
Temel kaynak	0	0	-0.4737	+ 32.4	+1.65
Temel harmonik ve tek harmonikler ($\phi=0$)	41	0	-0.4589	+ 4.32	+ 1.55
Temel harmonik ve çift harmonikler ($\phi=0$)	58	0	-0.4606	+ 5.16	+1.49

DC bileşen içermeyen 50Hz'in üzerindeki tek ve çift harmoniklerin transformatörün kararlı haldeki akım ve bileşik hataya az da olsa olumlu etkisinin olduğu, açı hatasına ise +32.4dk.'dan 5dk. seviyesine düşüş olduğu için önemli ölçüde olumlu etkisinin olduğu görülmektedir. Periyodik, asimetrik ve ortalama değeri sıfırdan farklı olan kısaca DC bileşen içeren dalgaların etkisi, Şekil 4.12'deki model aracılığıyla incelenmiştir.

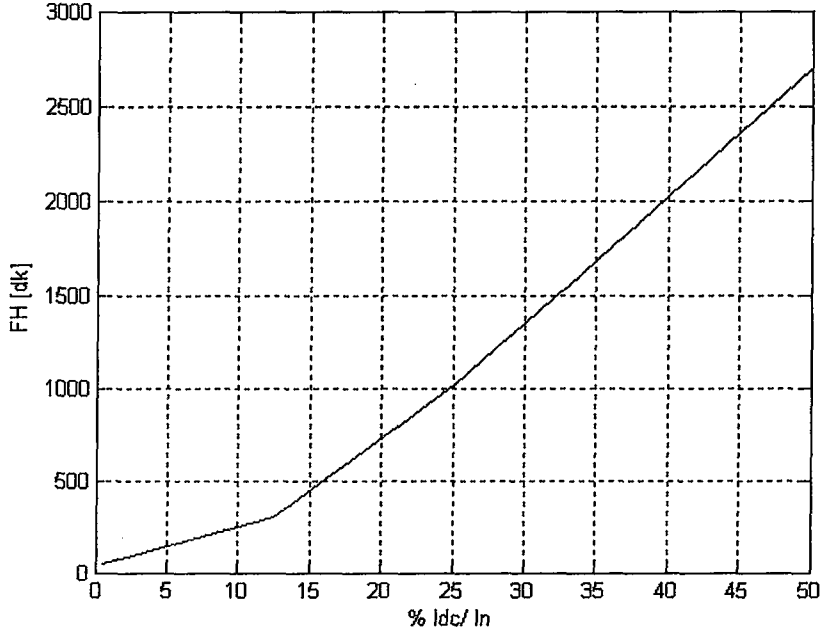


Şekil 4.12. Temel kaynağa DC bileşen eklenmesi

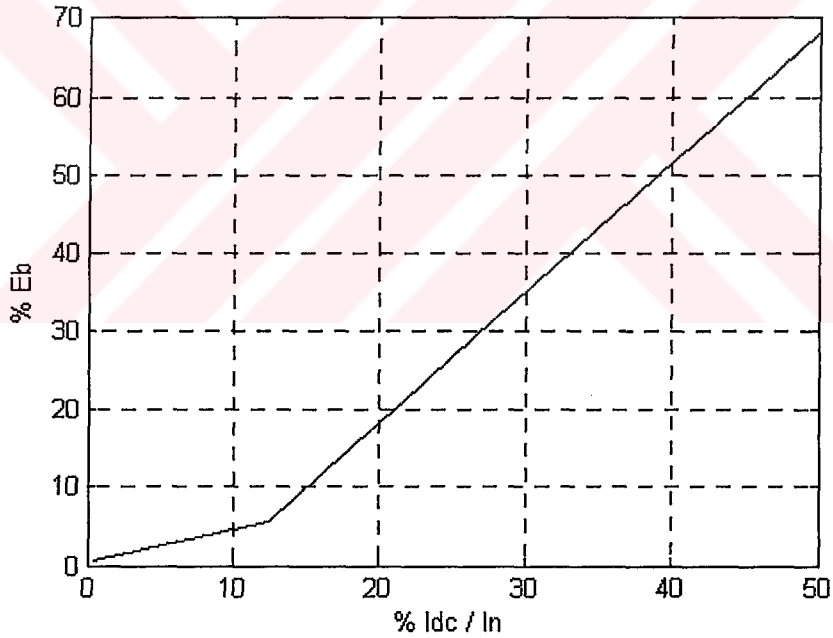
Simülasyonda DC bileşen; temel kaynağa ek olarak doğru akım kaynağı ilavesi ile elde edilmiştir ve sonuçlar Şekil 4.13, 4.14, 4.15'te gösterilmektedir.



Şekil 4.13. DC bileşen oranına bağlı akım hatası



Şekil 4.14. DC bileşen oranına bağlı açı hatası



Şekil 4.15. DC bileşen oranına bağlı bileşke hata

Kısa devre anında DC bileşen miktarı, [36] gereğince kısa devre akımının $\sqrt{2}$ katına çıkabileceğinden I_{dc}/I_n oranı %50'ye kadar inceleme yapılmıştır.

I_{dc}/I_n oranının %2'ye ulaşmasıyla akım transformatörsü hata sınırlarının dışında çalışmaya başlamaktadır. Bu oran yaklaşık %12'nin üzerine çıkması ile bütün hata miktarlarındaki artış hızlanmaktadır. Bunun sebebi akım transformatörü nüvesi %2'ye kadar bilek noktası ile diz noktası arasında çalışmakta, %12'den sonra ise doyum

bölgesinde çalıştığı anlaşılmaktadır. Nüvenin çalışma noktası doyum bölgesine girdiğinde; mıknatıslanma akımı artar. Buna karşın endüklenen gerilimin artış oranının azalır. Sonuç olarak aç ve bileşik hatası ise artı yönde, akım hatası eksi yönde artmaktadır.

4.5. Sonuçlar

Bu bölümde EMTP/ATP aracılığıyla akım transformatörünün histeresiz olgusu ihmal edilip saturasyon etkisi dikkate alınarak simülasyon modeli oluşturulmuştur. Histeresiz olgusu ihmal edilmiş olmasına rağmen ancak incelemelerimizde histeresiz etkisini en aza indirmek için yüksek frekanslı nüve kullanılmıştır.

Modelin hassasiyeti, sinizoidal uyartımda yapılan laboratuvar testleri ile doğrulandıktan sonra sinizoidal ve sinizoidal olmayan şartlarda parametrik analiz yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre koruma tipi akım transformatörünün performansını olumsuz yönde etkileyen parametreler DC bileşen ve alt harmonikler olarak belirlenmiştir [37].

Bu simülasyon çalışması; akım transformatörü modeli frekansa bağlı hale getirilerek, histeresiz etkisi, transformatör kayıpları da dikkate alınarak detaylandırılabilir ve geçici rejimlerin akım transformatörüne etkisinin incelenmesi ile daha da geliştirilebilir.

5. SONUÇ

Bu tezde, akım transformatörlerinin yapısı, çalışma prensibi, özellikle manyetik devresi incelenmiş, akım transformatörünün matematiksel modeli ve manyetik devrenin matematiksel modeli araştırılmıştır. Manyetik devre modeline ilişkin iki ayrı metod teorik olarak oluşturulmuştur. Bu iki metodun akım transformatörlerinin matematiksel modelinde uygulanabilirliğinin sayısal örneklerle ispatı çalışması ise devam etmektedir.

Ayrıca hayati önemi olan koruma akım transformatörleri EMTP/ATP aracılığıyla simüle edilmiştir. Simulasyon sonuçları ile akım transformatörünün teorik olarak beklenen çalışma karakteristiğinin örtüşmekte olduğu tespit edilmiştir. Buna dayanarak EMTP/ATP'deki simulasyon ile parametrik analiz yapılarak koruma akım transformatörünün sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlarda performansı araştırılmıştır.

Analizler sonucunda ise DC bileşen içeren dalga formunun, akım transformatörünün sınıfını, çalışma şartlarını olumsuz yönde en çok etkileyen parametre olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuç, transformatörün bağlı olduğu sistemde; doğrultucu devreler, inverterler gibi güç elektroniği ekipmanları, ark fırınları gibi nonlineer yüklerin bulunması durumunda ya da kısa devre anında; primer akımındaki DC bileşen oranına göre, koruma akım transformatörünün çalışma bölgesinin hassasiyet sınıfının dışına çıkabileceği ve rölelere iletilen bilgi sağlıklı olmayacağı anlamına gelmektedir. Röle tipine bağlı olarak da sistem bu durumdan olumsuz etkilenebilir. Transformatörün sekonder akımının primer akımını doğru oranda yansıtamaması, rölenin gereksiz açma yapmasına ya da gereken açmayı yapmamasına neden olabilir. Örneğin simulasyonlarda incelenen 300/5A'lık akım transformatörünün primerinden 25kA gibi bir kısa devre akımının geçmesi durumunda; (n faktörü 5 olduğu için) sekonderinden de en az 1500A'lık bir akım 5P hassasiyeti ile geçmelidir. Eğer DC bileşen yüzünden sekonder devre doyuma girer ve sekonderden 1500A'den küçük bir akım geçer ise 1500A'den sonra açma yapacak şekilde ayarlanmış olan röle, açma yapamaz.

Koruma akım transformatörlerinden rölelere iletilen bilgiye göre rölenin gereksiz açma yapması durumunda; sistem kesintiye uğrar, seçici koruma özelliği sağlanamamış olur. Gerekli açmanın olmaması durumunda ise maddi ve hayati sorunlarla karşılaşılabilir. Bu nedenle koruma akım transformatörlerinin teknik özelliklerinin, kullanılacakları sistemlerin, rölelerin ve diğer koruma ekipmanlarının (ayırıcı, kesici....vb) özelliklerine bağlı olarak belirlenmesi ve üretilmesi çok büyük önem taşımaktadır. Bu noktada EMTP/ATP’de gerçekleştirilen ve daha da detaylandırılabilcek simülasyon çalışmalarının çok faydalı olacaktır.

Gerek akım transformatörünün manyetik devre endüktansının nonlineer değişimini ifade etmek için bu tezde oluşturulan modeller, gerekse EMTP/ATP’deki simülasyonlar geliştirilmeye açık olup bunlar üzerindeki çalışmalar devam etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] W. A. Elmore, Protective Relaying Theory and Applications, ABB Power T&D Company Inc.,1994.
- [2] C. Teyssandier, From Current Transformers to Hybrid Sensors in HV, Merlin Gerin Cahier Technique n.170, 1995.
- [3] M. Kezunović, C. W. Fromen, F. Philips, Experimental Evaluation of EMTP-Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 9, No 1, pp 405-413, 1994.
- [4] IEEE Std. C57.13, Instrument Transformers, 1978.
- [5] M. A. Redfern, S.C. Terry, F. V. P. Robinson, Z. Q. Bo, A Laboratory Investigation into the Use of MV Current Transformers for Transient Based Protection, IPST'03, in USA, 2003.
- [6] R., M., Rifaat, Considerations in Applying EMTP to Evaluate Current Transformer Performance under Transient and High Current Fault Conditions, IPST'05 in Canada, 2005.
- [7] IEC 60044-1, Current Transformers, Edition 1.2, 2003.
- [8] IEC 44-6, Instrument Transformers, Part 6, 1992.
- [9] CAN/AM EMTP USER GROUP: Alternative Transients Program (ATP) Rule Book: IV.E. Saturable Transformer Component', Canadian/American EMTP User Group, 1992
- [10] L. Prikler, H. K. Høidalen, User's Manual, ATPDRAW for Windows Version 3.5, 2002
- [11] P. Mira , Instrument Transformers, Kappa Electricals, 2nd Edition, 2000.
- [12] C. Denizoglu, ABC Ölçü Transformatörleri El Kitabçığı, Alce Elektrik A.Ş., 2001.
- [13] IEC 38 Standart Voltages 1983.
- [14] M. Orhac, Current Transformer for HV Protection, Merlin Gerin Cahier Technique n.164, 1995.

- [15] T. Boduroğlu, Elektrik Makineleri Dersleri Transformatörler, Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş., 6. baskı 1988.
- [16] Colonel Wm. T. McLyman, Transformer and Inductor Design Handbook, Marcel Dekker, Inc., 2nd Edition, 1998.
- [17] R. Boll, Soft Magnetic Materials, Vacuumschmelze Handbook, pp 33, 309-310, 1979.
- [18] P. Fonti, Current Transformer How To Specify Them, Merlin Gerin Cahier Technique no.194, 2000.
- [19] Working Group C-5 of the Systems Protection Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee, Mathematical Models for Current, Voltage and Coupling Capacitor Voltage Transformers, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol 15, No 1, pp. 62-72, 2000.
- [20] W. L. A. Neves and H. W. Dommel, On Modeling Iron Core Nonlinearities, IEEE Trans. on Power Systems, vol.8, no.2, pp.417-423, May 1993.
- [21] J. R. Lucas, Representation of Magnetization Curves Over a Wide Region Using Non-integer Power Series, IEEE, vol.25, no.4, p.335, 1988.
- [22] J. R. Lucas, P. G. McLaren, and R. P. Jayasinghe, "Improved Simulation Models for Current Transformers in Relay Studies, " IEEE Trans. on Power Delivery, vol.7, no.1, p.152, Jan.1992.
- [23] C. Oliver, A New Core Loss Model For Iron Core Material, Micrometals Inc., Switching Power Magazine, Volume 3, Issue 2, Spring 2002.
- [24] H. W. Dommel, Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks, IEEE Trans. on PAS, vol.PAS 88, no.4, p. 388, Apr. 1969.
- [25] D.C. Files and D. L. Atherton, Theory of Ferromagnetic Hysteresis, Journal of Magnetism and magnetic Materials, vol. 61, pp. 48, 1986.
- [26] D.C. Files and J. B. Thoeke, and M. K. Devine, Numerical Determination of Hysteresis Parameters for Modeling of Magnetic Properties using the Theory of Ferromagnetic Hysteresis, IEEE Trans. on Magnetics, vol. 28, no. 1, pp. 27-34, Jan.1992.

- [27] S. E. Zocholl, Analyzing and Applying Current Transformers, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2004.
- [28] S. P. Thompson, Further Notes on the Formula of the Electromagnet and the Equations of the Dynamo, Proceedings of the Physical Society of London Volume 8, 1886.
- [29] A. B. Yıldız, Elektrik Devreleri Teori ve Çözümlü Örnekler Kısım I, Kocaeli Üniversitesi Yayınları, 2001.
- [30] R. Bauer, Die Messwandler Grundlagen, Anwendung und Prüfung, Springer – Verlag OHG., pp. 6-11, 1953.
- [31] J. A. Edminister, Schaum's Outline Series of Theory and Problems of Electric Circuits, McGraw-Hill, 1972.
- [32] Ralph F., Determine Current Transformer Suitability Using EMTP Models, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, WA USA.
- [33] E. Acha, M. Madrigal, Power System Harmonics Computer Modelling and Analysis, John Wiley & Sons, 2001.
- [34] 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.
- [35] C. Kocatepe ve Ark., Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, 2003.
- [35] E. Clarke, Circuit Analysis of A-C Power Systems, Volume I and II, (J. Wiley and Sons, London, 1950).
- [37] S. Yıldız, M. Hakan Hocaoglu, Akım Transformatörlerinin Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Performansının Simulasyon ile İncelenmesi, 11. Ulusal EMO Kongresi,

ÖZGEÇMİŞ

Seher YILDIZ GÜNALTAY, 1979 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğretimini 1986-1997 yılları arasında İstanbul'da tamamladı. 1997 yılında girmeye hak kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2001 yılında başarıyla mezun oldu. 2002 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Halen ölçü transformatörleri üretimi yapan ALCE Elektrik A.Ş. firmasında ARGE sorumlusu olarak çalışmaktadır.