



**IEC STANDARTLARINA UYGUN AKIM TRANSFORMATÖRÜ
TASARIMI VE TASARIM KRİTERLERİ**

Yusuf Kürşat EKİZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2018

Yusuf Kürşat EKİZ tarafından hazırlanan "IEC STANDARDINA UYGUN AKIM TRANSFORMATÖRÜ TASARIMI VE TASARIM KRİTERLERİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Nursel AKÇAM

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Yrd. Doç. Dr. Selma ÖZAYDIN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 15 /03/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Yusuf Kürşat EKİZ

15/03/2018

IEC STANDARTLARINA UYGUN AKIM TRANSFORMATÖRÜ TASARIMI VE TASARIM KRİTERLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Yusuf Kürşat EKİZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2018

ÖZET

Akım ve gerilim ölçü transformatörleri elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtım işlemlerinde, akım ve gerilim genliklerinin belirlenmesine yardımcı olduğu kadar, enerji sisteminin korunmasına ve satılan enerjisinin faturalanmasında da büyük önem arz ederler. Enerjinin ölçülmesinde ve faturalandırılmasında en önemli faktör çoğu zaman akım bilgisidir. Sistemdeki akımın genlik veya açısız olarak yanlış ölçülmesi, sistemde yapılması gereken uygulamaların yanlış zamanda ve doğru olmayan şekilde devreye girmesine neden olur. Bunun yanında yanlış ölçülen akım hatalı faturalandırmalara yol açar. Sistemdeki akım ve gerilim bilgilerinin doğru şekilde ölçülmesi ve sistemdeki verimliliğinin maksimum olması için ölçü transformatörleri tasarım kriterlerinin doğru şekilde anlaşılması gerekir. IEC standartları ölçü transformatörü tasarımı için gerekli olan tüm teknik özellikleri standart olarak belirlemiştir. Bu standartlarda verilen kriterleri göz önünde bulundurarak ihtiyaca uygun akım transformatörünün karakteristikleri belirlenmelidir. İhtiyaç duyulandan fazla talep edilen akım transformatörü karakteristikleri, transformatörün boyut ve maliyet olarak fazla olmasının yanı sıra sistemde istenilen işlevleri yerine getirememesine neden olabilir. Bu çalışmada, akım transformatörünün IEC standartlarında yer alan tasarım kriterleri incelenerek, talep edilebilecek teknik özelliklere uygun en optimum akım transformatörü tasarımının nasıl yapılabileceği gösterilmiştir. İhtiyaçtan fazla talep edilen teknik özelliklerin transformatör tasarımına etkisi ve sistemde ne gibi sonuçlara yol açabileceği incelenmiştir. Gereğinden fazla seçilen yük değerinin, akım transformatörünün performansına ve maliyetine nasıl etki ettiği incelenmiştir.

Bilim Kodu : 90513

Anahtar Kelimeler : Ölçü transformatörü, akım transformatörü, doğruluk sınıfı, emniyet katsayısı

Sayfa Adedi : 75

Danışman : Doç. Dr. Nursel AKÇAM

DESIGN AND DESIGN CRITERIA OF INSTRUMENT CURRENT TRANSFORMER
ACCORDING TO IEC STANDARDS

(M. Sc. Thesis)

Yusuf Kürşat EKİZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2018

ABSTRACT

Current and voltage instrument transformers are important for the protection of the energy system and for measuring and also billing of the energy sold, as well as for determining the current and voltage amplitudes in the production, transmission and distribution processes of electrical energy. Current information is one of the most important factor in measuring and billing energy. Incorrect measurement of current amplitude or phase angle in the system causes the applications to be performed in the system to be engaged at the wrong time and in the wrong way. In addition to this, incorrect measured currents lead to faulty for billing. In order to accurate measurement of the current and voltage and maximize the efficiency in the system, it is very important to understand the transformer design criteria correctly. IEC standards specify almost all the technical specifications required for the design of the transformer. Taking into consideration the criteria given in these standards, characteristics of the appropriate current transformer needs should be determined. Current transformer characteristics that are demanded more than necessary may cause the transformer to be too large in size and cost, but also fail to perform the desired functions in the system. This thesis study examines the design criteria in the IEC standards of the current transformer and shows how to design the most optimal current transformer according to the technical specifications that can be claimed. In addition, how the technical specifications demanded more than necessary will have an effect on the design of the transformer and what the consequences can be in the system are investigated. How the burden volt-ampere value of the current transformer demanded more than necessary will have an affect on the performance and cost of the current transformer are investigated.

Science Code : 90513

Key Words : Instrument transformer, current transformer, accuracy class, security factor

Page Number : 75

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Nursel AKÇAM

TEŐEKKÖR

Çalıőmalarımda beni yönlendiren ve katkılarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Nursel AKÇAM ve Emek Elektrik End. A.Ő. Mühendislik Birimi Müdürü Korhan SERDAR'a sonsuz teşekkür ederim. Bu çalışmayı öğrencilik hayatım boyunca manevi ve maddi desteklerini esirgemeyen annem, babam ve ablama armağan ediyorum.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2.AKIM TRANSFORMATÖRLERİ.....	5
2.1. Genel Bigi.....	5
2.2. Akım Transformatörü Çalışma Prensibi.....	6
2.3. Akım Transformatörü Yapısı.....	6
3. AKIM TRANSFORMATÖRÜ ÇEŞİTLERİ.....	9
3.1. Gerilim Seviyesine Göre Akım Transformatörleri.....	9
3.1.1. Alçak gerilim akım transformatörleri.....	9
3.1.2. Orta gerilim akım transformatörleri.....	10
3.1.3. Yüksek gerilim akım transformatörleri.....	10
3.2. Yalıtım Biçimine Göre Akım Transformatörleri.....	11
3.2.1. Yağlı tip akım transformatörleri.....	12
3.2.2. Kuru tip akım transformatörleri.....	14
3.3. Kullanıldıkları Yere Göre Akım Transformatörleri.....	15
3.3.1. Dahili tip akım transformatörleri.....	15

	Sayfa
3.3.2. Harici tip akım transformatörleri	16
4. AKIM TRANSFORMATÖRÜ TASARIMI.....	17
4.1. Akım Transformatörü Tasarım Kriterleri.....	17
4.1.1. Standart	17
4.1.2. En yüksek sistem gerilimi	18
4.1.3. Frekans	20
4.1.4. Akım oranı	20
4.1.5. Anma yükü	24
4.1.6. Doğruluk sınıfı	27
4.1.7. Çevre koşulları	32
4.1.8. Kısa devre akımı	36
4.1.9. Sekonder sayısı	39
4.2. Akım Transformatörü Primer Tasarımı	39
4.2.1. Primer sargı diagramı.....	40
4.2.2. Primer kesit hesabı	43
4.3. Akım Transformatörü Sekonder Tasarımı	48
4.3.1. Sekonder sargı diagramı.....	50
4.3.2. Sekonder nüve kesit hesabı ve doğruluk grafikleri	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR	65
EKLER.....	67
EK-1. Bushing tipi akım transformatörü yapısı.....	68
EK-2. Bushing tipi akım transformatörü yapısı.....	70
EK-3. Yüksek gerilim akım transformatörlerinin karşılaştırılması	72

Sayfa

EK-4 Akım transformatörü tasarım akış şeması 74

ÖZGEÇMİŞ 75



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Ölçü transformatörleri için izolasyon seviyeleri.....	19
Çizelge 4.2. 200-300-400-800/5 A akım transformatörü için bağlantı detayları.....	21
Çizelge 4.3. 200-400/1 A sekonder tepli akım transformatörü için bağlantı detayları ...	22
Çizelge 4.4. 200-400/1 A primer tepli akım transformatörü için bağlantı detayları	23
Çizelge 4.5. Farklı uzunluk ve kesitteki kabloların 1 A için güç tüketimi.....	26
Çizelge 4.6. Farklı uzunluk ve kesitteki kabloların 5 A için güç tüketimi.....	26
Çizelge 4.7. Ölçü sekonder sınıfı oran ve faz hatası sınırları.....	28
Çizelge 4.8. Hassas ölçü sekonder sınıfı oran ve faz hatası sınırları	28
Çizelge 4.9. Sınıf 3 ve 5 ölçü sekonderlei için oran hatası sınırları.....	29
Çizelge 4.10. Koruma sekonder sınıfı oran,faz ve kompozit hata sınırları.....	32
Çizelge 4.11. Yüksek gerilim akım transformatörleri standart krepaj mesafeleri	33
Çizelge 4.12. 170 kV için farklı rakımlarda hesaplanan izolasyon değerleri	35
Çizelge 4.13. 170 kV farklı rakımlarda kullanılması gereken izolatör boyları.....	36
Çizelge 4.14. Standart kısa devre akımları.....	38
Çizelge 4.15. Farklı gerilim seviyeleri için primer izolasyon miktarları	48
Çizelge 4.16. Farklı sekonder akımlar için hesaplanan sekonder tel çapları	49
Çizelge 4.17. Farklı yükler için kullanılan malzeme miktarının karşılaştırılması-1	57
Çizelge 4.18. Farklı yükler için kullanılan malzeme miktarının karşılaştırılması-2.....	59

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Yağlı tip akım transformatörü çeşitleri.....	13
Şekil 3.2. Yağlı tip akım transformatörü ağırlık merkezleri	14
Şekil 4.1. Primer ve sekonder tepli akım transformatörü sargı diagramı	21
Şekil 4.2. Sekonder tepli akım transformatörü sargı diagramı	22
Şekil 4.3. Primer tepli akım transformatörü için sargı diagramı.....	23
Şekil 4.4. Sınıf 0,5 için tam yük ve çeyrek yükteki oran hatası aralığı	25
Şekil 4.5. Sekonder nüvenin doyma eğrisi.....	31
Şekil 4.6. K katsayısı grafiği.....	35
Şekil 4.7. Orta gerilim tek oranlı akım transformatörü için primer sargı diagramı	41
Şekil 4.8. Yüksek gerilim tek oranlı akım transformatörü için primer sargı diagramı ...	42
Şekil 4.9. Orta gerilim çok oranlı akım transformatörü için primer sargı diagramı	42
Şekil 4.10. Primer sargıların paralel bağlantısı	43
Şekil 4.11. Primer sargıların seri bağlantısı	43
Şekil 4.12. Primer bakır dizilişi alternatif - 1.....	47
Şekil 4.13. Primer bakır dizilişi alternatif - 2.....	47
Şekil 4.14. Orta gerilim tek oranlı akım transformatörü için sekonder sargı diagramı ..	50
Şekil 4.15. Orta gerilim çok oranlı akım transformatörü için sekonder sargı diagramı .	51
Şekil 4.16. Orta gerilim 300-600/5 A oranlı sekonder tepli sargı diagramı	52
Şekil 4.17. Orta gerilim 300-600/5 A oranlı primer tepli sargı diagramı	52
Şekil 4.18. Manyetik bir nüvenin B-H karakteristik eğrisi.....	54
Şekil 4.19. Farklı manyetik malzemelerin B-H grafikleri	55
Şekil 4.20. Örnek tasarım koruma sekonderi için nüve doyum eğrisi.....	57
Şekil 4.21. Örnek tasarım ölçü sekonderi için nüve doyum eğrisi	58

Şekil	Sayfa
Şekil 4.22. M4 & M5 nüve kullanıldığında 600 AT'da ölçü sekonderi sınıf grafiği	59
Şekil 4.23. Mu-metal nüve kullanıldığında 600 AT'da ölçü sekonderi sınıf grafiği	60
Şekil 4.24. M4 & M5 nüve kullanıldığında 900 AT'da ölçü sekonderi sınıf grafiği	61



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Akım transformatörü sekonder sargıları.....	7
Resim 2.2. Akım transformatörü primer sargıları	7
Resim 3.1. Alçak gerilim ring tipi (simit tipi) akım transformatörü	9
Resim 3.2. Orta gerilim akım transformatörleri.....	10
Resim 3.3. Yüksek gerilim kafa tipi akım transformatörleri	11
Resim 3.4. Yağlı tip akım transformatörü.....	12
Resim 3.5. Orta gerilim dahili tip akım transformatörü	15
Resim 3.6. Orta gerilim ve yüksek gerilim harici tip akım transformatörü	16
Resim 4.1. Krepaj mesafesinin gösterimi	32
Resim 4.2. Kısa deve akımının oluşumu	38
Resim 4.3. Primer sargılarda kullanılan bakır şeritler	40
Resim 4.4. Akım transformatörü aktif kısmı	46
Resim 4.5. Otomatik makine ile sekonder sarım	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
V	Volt
Hz	Hertz
VA	Volt-Amper
kA	Kilo-Amper
E_S	Sekonder gerilim
E_P	Primer gerilim
N_S	Sekonder tur sayısı
N_P	Primer tur sayısı
I_S	Sekonder akım
I_P	Primer akım
SF_6	Kükürt Hekzaflorür
kV	Kilo-Volt
A	Amper
AT	Amper-Tur
P_k	Tüketilen güç
d	Uzaklık
m	Metre
mm	Milimetre
mm^2	Milimetrekare
a_k	Kablo kesiti
δ_{cu}	Bakırın öziletkenlik katsayısı
I_n	Nominal akım
Fs	Koruma katsayısı
ϵ	Oran hatası
k_r	Akım çevirme oranı
i_s	Sekonder akımın anlık değeri
i_p	Primer akımın anlık değeri

Simgeler**Açıklamalar**

Φ	Manyetik akı
φ	Faz farkı
ϵ_k	Kompozit hata
T	Periyot
B	Manyetik akı yoğunluğu
H	Manyetik alan şiddeti
P	Doyma katsayısı
K	Deniz seviyesine bağlı izolasyon katsayısı
h	Deniz seviyesinden yükseklik
dk	Dakika
s	Saniye
S_k	Hata anında oluşacak güç
MVA	Mega-Volt-Amper
I_{th}	Kısa devre akımı
kAT	Kilo-Amper-Tur
I_{dyn}	Dinamik akım
A_S	Sekonder tel kesiti
R	Sekonder tel çapı
r	Sekonder tel yarıçapı
A_C	Nüve kesiti
f	Frekans
F	Kuvvet
w	Açısal hız
mA	Mili-Amper
Z	Empedans
S	Sekonder güç
m²	Metrekare
cm²	Santimetrekare
E_{rms}	Sekonder gerilim rms değeri
E_{max}	Sekonder gerilim maksimum değeri

Kısaltmalar**Açıklamalar****ABD**

Amerika Bileşik Devletleri

ANSI

American National Standards Institute

FH

Faz hatası

IEC

International Electrotechnical Commission

PFWV

Power frequency withstand voltage

TEDAŞ

Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi



1. GİRİŞ

Günümüz dünyasının en önemli ihtiyacı ve gücü enerjidir. 21.yy'da ülkeler artık birbirleri ile silahlarla değil bilgi birikimi, enerji ve teknoloji ile savaşmaktadır. Buna bağlı olarak üretilen, iletilen ve dağıtılan elektrik enerjisinin ölçümü, enerji sisteminin tasarımı, işletilmesi ve faturalandırılması açısından çok önemlidir. Enerji sisteminin ölçümünde kullanılan elektriksel cihazlar ölçü transformatörleridir.

Son yıllarda malzeme teknolojilerindeki gelişme, transformatörler gibi elektrik cihazlarının üretim teknolojilerini de ciddi boyutlarda etkilemiş ve geliştirmiştir. Bu tip değişimler, uluslararası standartları etkiler ve değiştirir. Akım transformatörlerinin IEC standartlarında son yıllardaki değişimi ayrıntılı olarak incelendiğinde, gelişimin ne kadar büyük olduğu daha iyi anlaşılmaktadır.

“Elektrik enerjisi üretim, iletim ve dağıtım yatırım ve hizmetlerinin özelleşmesi, enerji alım ve satımlarının gerçek zamanlı olması zorunluluğunu getirmiştir. Konu toplumu ekonomik ve verimlilik yönünden etkilediği için Elektrik Düzenleme Kurullarının kontrolü altına alınmıştır. Akıllı elektrik şebekelerinin yaratılması akıllı teçhizat üretimini zorunlu kılmıştır. Türkiye’de enerji sektörünün kamuda ve özel sektörde yapısal değişikliği devam etmektedir” [1].

Anlatılan bu itici ve yönlendirici cihazların en önemlisi Ölçü Transformatörleri’dir. Ölçü transformatörleri enerji satan ve alan için terazi görevini yapar.

“Standartlar, üretilen teçhizatın sahip olması gereken en düşük değerleri tarif eder. Ürünler bu standartlara göre testlerden geçmek zorunda olsa da, teçhizatın gerçek sınıdığı yer sürekli çalıştığı şebekenin kendisidir. Standartların öngördüğünden daha ağır şartlara maruz kalan ürünler hasar görebilir. Bu durumlar imalatçı ve işletici ile paylaşılmalı ve gelecek için önlemler alınmalıdır. Ürün seçiminde ve sistem tasarımında gösterilecek hassasiyet ve koruma cihazlarının doğru yerde ve şekilde kullanımı, oluşacak hasarları minimum seviyede tutar. Bu nedenle üreticinin ve tüketicinin yakın işbirliği büyük önem arz eder. En akılcı cihaz tasarımı ve imalatı, kullanıcı ve imalatçıların eşgüdümlü davranmaları sonunda elde edilir” [1].

Akım ve gerilim ölçü transformatörleri;

- Yüksek akım ve yüksek gerilimi ölçü ve koruma cihazları için ölçülebilir düşük seviyelere dönüştüren,
- Ölçü ve koruma devrelerini primer yüksek gerilimlere karşı izole eden,
- Ölçü ve koruma cihazlarının standartlaştırılmasını sağlayan cihazlardır.

Bu cihazların teknik karakteristikleri belirlenirken her bir parametrenin dikkatle seçilmesi gerekir. İhtiyaçtan daha fazla seçilen teknik özellikler, hem çok pahalı bir transformatör üretilmesine yol açar, hem de transformatörün işletme koşullarında çalışma performansını kötü yönde etkiler.

Akım veya gerilim transformatörlerinin seçiminde aşağıdaki ortak parametrelerin ilgili standartlar doğrultusunda ayrıntılı şekilde incelenerek, gerçek ihtiyaca göre belirlenmesi gerekir.

- En yüksek sistem gerilimi, V
- Frekans, Hz
- Sekonder sayısı
- Her bir sekonder için anma yükü, VA
- Her bir sekonder için doğruluk sınıfı
- Standart
- Çevre koşulları (harici/dahili, kirli hava)

Akım transformatörleri için ortak parametreler dışında;

- Akım oranı
- Kısa devre akımı, kA

belirlenmelidir.

Gerilim transformatörleri için ortak parametreler dışında;

- Gerilim oranı
- Gerilim faktörü

belirlenmelidir.

Bu parametreler ışığında boyut ve maliyetler göz önüne alınarak en optimum akım transformatörü tasarımının yapılması, yapılan tasarıma uygun üretilen transformatörün sistemde sorunsuz şekilde talep edilen izolasyon ve sınıf değerlerini sağlaması önemlidir. Orta gerilim ölçü transformatörleri paneller içerisine yerleştirilerek kullanılır. Akım transformatörleri ile ilgili yapılan bir çalışmada son yıllarda boyutsal olarak giderek küçülen akım ve gerilim transformatörleri sayesinde panel üreticilerinde boyutlarını küçültme yoluna gittiği belirtilmektedir. Boyutlardaki bu küçülmelere bağlı olarak faz-faz ve faz-toprak baraları arasındaki mesafeler kısaldığından daha iyi izolasyon malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır [2].

Ayrı bir çalışmada ise akım transformatörünün farklı akım değerleri için hata analizleri gerçekleştirilmiştir. Bir enerji sistemde sürekli sabit akım geçmez. Sistemden geçen akım sisteme bağlı yük ve sistemin kararlılığına göre değişebilir. Bundan dolayı akım transformatörünün bu durumlarda da belirli hata oranının dışına çıkmaması gerekir. Akımın negatif veya pozitif yönde hatalı ölçülmesi, amaçlanan uygulamaların erken ya da geç devreye girmesine neden olur [3].

Bir başka çalışmada ise sistemdeki yüklerin akım transformatörünün oran ve açı hatasına etkisi incelenmiştir. Sistemde yüklerin her zaman lineer olması istenir ancak son yıllarda sistemlerde lineer olmayan yüklerde artış görülmektedir. Lineer olmayan yükler, akım ve gerilim karakteristiği doğrusal olmayan yüklerdir. Bu oluşan yükler sistemde harmonik akımları ve gerilimleri meydana getirir. Yapılan çalışma sonucunda, akım transformatörünün oran hatasının nominal akımın iki katından sonra arttığı, açısal hatasının ise akımın frekansı nominal frekansın altına düştüğünde arttığı görülmüştür [4].

Bu çalışmada her bir parametrenin transformatör tasarımına etkisi ilgili standartlar da göz önüne alınarak incelenecektir. İkinci bölümde akım transformatörleri ve ölçü transformatörleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Akım transformatörünün yapısı, temel çalışma prensibi ve kullanım amaçları anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde akım transformatörlerinin çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir. Akım transformatörleri farklı tiplerde ve özelliklerde üretilebilirler. Farklı özelliklerdeki bu akım transformatörlerinin tercih sebepleri ve birbirlerine göre avantajları, dezavantajları anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde akım transformatörü tasarım kriterleri tek tek incelenmiştir. Bu kriterlerin akım transformatörü tasarımına etkileri anlatılmıştır. Tasarım kriterlerinin belirlenmesi aşamasında dikkat edilmesi gereken durumlar üzerinde durulmuştur. Çalışma sonucunda talep edilen teknik özellikler doğrultusunda, en doğru tasarımın nasıl yapılacağı ve tasarım kriterlerinin tasarıma ne gibi etkileri olduğu incelenmiştir.



2. AKIM TRANSFORMATÖRLERİ

2.1. Genel Bilgi

Ölçü transformatörlerinin kullanım amaçları, akım ve gerilimleri ölçülebilir daha küçük değerlere indirgemek, ölçüm ve kontrol devresini enerji sisteminden izole etmek ve ölçme ve koruma sistemleri için standart akım ve gerilim değerleri sağlamaktır. Çalışma prensibi olarak güç transformatörleri için geçerli ve uygulanmakta olan elektriksel kurallar ve gereksinimler ölçü transformatörleri için de geçerlidir. Ölçü transformatörleri işlevsel olarak ikiye ayrılır.

Gerilim transformatörleri

Kullanım amaçları enerji sistemindeki yüksek gerilimleri, ölçülebilir daha düşük gerilim değerlerine çevirmektir. “Güç transformatörleri için geçerli olan Eş. 2.1, gerilim transformatörlerinin çalışma ve kullanım amacının da temelini oluşturur” [2]. İdeal bir gerilim transformatöründe,

$$\frac{E_S}{E_P} = \frac{N_S}{N_P} \quad (2.1)$$

eşitliği geçerlidir. Burada E_S sekonder gerilim, E_P primer gerilim, N_S sekonder tur sayısı ve N_P primer tur sayısıdır.

Eş. 2.1’de yer alan primer ve sekonder tur sayılarının oranı, gerilim dönüştürme oranını verir. Eşitlikte gerilim transformatörü yüksüz durumda ideal kabul edilmiş ve tek gerilim düşümü kaynağı mıknatıslama akımının da etkisi ihmal edilerek çevirme oranı verilmiştir.

Akım transformatörleri

Esas kullanım nedenleri güç sistemlerindeki direkt yollar ile ölçülemeyecek büyüklükte olan akımları daha düşük akım seviyelerine dönüştürerek ölçme işleminin yapılmasını sağlamaktır. “Ayrıca orta ve yüksek gerilim enerji sistemlerinde ölçme ve koruma sisteminin yüksek gerilim tarafından izole edilmesini de sağlarlar. Sekonderi kısa devre

edilmiş yüksüz çalışan bir akım transformatörünün çevirme oranı,

$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} \quad (2.2)$$

eşitliği ile verilir” [2]. Burada I_S , sekonder akım, I_P , primer akımdır.

Eş. 2.2 ‘de sekonder ve primer sarım sayılarının oranı akım çevrim oranını vermektedir.

Ölçü transformatörleri besledikleri cihazların amacına göre;

- Koruma akım ve gerilim transformatörleri
- Ölçü akım ve gerilim transformatörleri, olarak ikiye ayrılmaktadır.

2.2. Akım Transformatörü Çalışma Prensibi

Akım transformatörlerinde manyetik nüve üzerinde primer ve sekonder olmak üzere iki farklı sargı bulunmaktadır. Sekonder sargı, primer sargıya göre ters yönde sarılır. Ölçüm yapılacak devreye seri olarak bağlanan primer sargıdan geçen akımın meydana getirdiği manyetik alan, manyetik nüvede manyetik bir akı oluşmasına sebep olur. Oluşan manyetik akı, sekonder sargı üzerinde bir gerilim indüklenmesine neden olur. Sekonder sargıya ölçü cihazlarının bağlanması sonucu, sekonder devreden geçen akım; sarım yönlerinin ters olması yüzünden ters yönde bir manyetik alan ve manyetik nüvede ters yönde bir manyetik akı oluşturur. Sonuçta, demir nüvedeki manyetik akı dengelenmiş olur. Ancak, sekonder devreye bir yük bağlanmaması yani sekonder uçların açık bırakılması durumunda ters yönde bir manyetik akı oluşmayacağı için; manyetik akı, nüvenin doymaya eriştiği değere kadar artar ve nüve sıcaklığını arttırarak akım ölçü trafosunun hasar görmesine sebep olur. Ayrıca, sekonder devre uçlarındaki gerilim birkaç bin voltluk büyük değerlere ulaşır ve insanlar için hayati tehlike oluşturur.

2.3. Akım Transformatörü Yapısı

Alçak ve yüksek gerilim sistemlerinde kullanılan akım ölçü transformatörlerinin, primer ve sekonder sargıları aynı nüve üzerine sarılırlar. Primer sargısından, ölçülecek yüksek akım, sekonder sargısından ise ölçü aletine iletilecek daha düşük seviyelere düşürülmüş küçük

akımlar geçer. Bu sebepten dolayı primer devre sargısı kalın telli, az sarımlı, sekonder devre sargısı ise ince telli, çok sarımlı olarak yapılır.

Akım transformatörünün primer sargı uçları akımı ölçülecek devreye ve sekonder sargı uçları ise ölçü aletinin devresine seri olarak bağlanırlar. Primer devreden ne kadar büyüklükte bir akım geçerse geçsin, sekonder devreden de bu akımla orantılı olacak ve akım dönüştürme oranıyla orantılı küçüklükte bir akım geçer.



Resim 2.1. Akım transformatörü sekonder sargıları



Resim 2.2. Akım transformatörü primer sargıları

Akım transformatörleri, çalışma ve kendisini oluşturan bileşenler bakımından güç transformatörlerine çok benzerler. Fakat akım transformatörleri, sekonderi kısa devre çalışan ve sekonder çıkış akımı belirli oranda sınırlandırılmış özel tipte bir ölçü transformatörüdür.

“Akım transformatörlerinin temel özellikleri şöyledir;

- Primer devresinden geçen akımı, akım çevirme oranında küçülterek sekonder devreye aktarır.

- Sekonder devreleri sürekli olarak kısa devre durumunda çalışır.
- Primer sargıları kalın ve az sarımlı veya sadece baradan oluşur.
- Sekonder sargıları ise ince telli ve çok sarımlıdır.
- Akım transformatörlerinin primer ve sekonder sargılarının giriş ve çıkış uçları, değişik harflerle ifade edilir. (Primer devre için: P1-Giriş, P2-Çıkış , Sekonder devre için: S1-giriş, S2 çıkış
- Akım transformatörlerinin sekonder ucu mutlaka topraklanmalıdır.
- Akım transformatörleri nominal akımlarının %20 fazlasına kadar yüklenebilir”[5].

Akım ölçü transformatörlerinin sekonder sargılarını oluşturan uçlardan birinin topraklanması gerekir. Bunun sebebi, akım ölçü transformatörünün primer sargısı ile sekonder sargısı arasında oluşan bir kısa devre arızasında, primer devre gerilimi, topraklanan sekonder uç yardımıyla güç transformatörünün nötr noktasına ulaşarak bir kapalı çevrim devre oluşturur. Akım ölçü transformatörünün sekonder sargı ucunun topraklanmaması durumunda ise söz konusu arızada primer devre gerilimi, sekondere bağlı olan ölçü ve koruma devrelerine ulaşır. Dolayısıyla bu devre üzerindeki ölçü ve koruma elamanları yüksek gerilime maruz kalarak izolasyonu bozulur. Aynı zamanda ölçü sistemleri üzerinde çalışan personel için hayati tehlike oluşturur.

3. AKIM TRANSFORMATÖRÜ ÇEŞİTLERİ

Akım transformatörleri gerilim seviyesi, yalıtım biçimi ve kullanıldıkları yerlere göre sınıflandırılırlar [5].

3.1. Gerilim Seviyesine Göre Akım Transformatörleri

Alçak, orta ve yüksek gerilim akım transformatörleri olarak üç ayrı grupta incelenir.

3.1.1. Alçak gerilim akım transformatörleri

Alçak gerilim şebeke ve sistemlerinde kullanılan akım transformatörleridir. Dağıtım transformatörlerinde alçak gerilim taraflarında fazlar arası gerilim 400 V tur. Bu gerilim değeri ile çalışan iş yerleri ve fabrikalarda kullanılan tipteki akım ölçü transformatörleridir. Alçak gerilim sistemlerde genellikle kuru tip akım ölçü transformatörleri kullanılır. Nadiren de olsa kağıt izolasyonlu ring tipi akım transformatörleri de kullanılır. Yalıtım seviyesi 0 V ile 3 kV arası akım transformatörleri bu grup altında sınıflandırılabilir. Alçak gerilim şebekelerinde kullanılmakta olan akım ölçü transformatörünün primer devresi bazı durumlarda bulunmayabilir. Bu durumda ölçümü yapılacak hat doğrudan akım ölçü transformatörünün merkezinden geçirilerek primer devresi oluşturulur. Bu tip akım transformatörlerine Ring Tipi veya Simit Tipi akım transformatörleri de denilmektedir. Resim 3.1'de primer sargısı olmayan ring tipi bir akım transformatörü örneği görülmektedir



Resim 3.1. Alçak gerilim ring tipi (simit tipi) akım transformatörü

3.1.2. Orta gerilim akım transformatörleri

Orta gerilim şebekelerde kullanılan akım transformatörleridir. Orta gerilim transformatör köşklerinde kullanılırlar. Orta gerilim sistemlerde genellikle kuru tip akım transformatörleri kullanılır. Harici orta gerilim akım transformatörlerinde yağlı tip akım transformatörleri de tercih edilebilir. Özellikle Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları yüksek hızlı tren hatlarında yağlı tip harici akım transformatörleri kullanılmaktadır. Yalıtım seviyesi 36 kV'a kadar olan akım transformatörleri, orta gerilim akım transformatörleri olarak tanımlanır. Resim 3.2'de orta gerilim kuru tip akım transformatörleri görülmektedir. Bu tip transformatörler ayrıca mesnet tipi akım transformatörleri olarak da tanımlanırlar.



Resim 3.2. Orta gerilim akım transformatörleri

Orta gerilim akım transformatörlerinin her gerilim seviyesine göre bazı standart boyutları vardır. Türkiye'de orta gerilim akım transformatörleri ile ilgili Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi, (TEDAŞ)'ın hazırlamış olduğu şartnameler mevcuttur. Bu şartnamelere göre orta gerilim kuru tip akım transformatörlerinin her gerilim seviyesi için yükseklik, boy ve en olarak maksimum olabileceği büyüklükler belirtilmiştir.

3.1.3. Yüksek gerilim akım transformatörleri

Yüksek gerilim şebekelerinde kullanılan akım ölçü transformatörleridir. Kullanılacakları şebeke gerilimi, akımı ve frekansına uygun şekilde imal edilirler. Yüksek gerilim

şebekelerinde akım ölçü transformatörleri ölçüm yapılacak devreye baralar vasıtası ile seri bağlanır. Yüksek gerilim akım transformatörlerinde, çok büyük oranda yalıtım ve soğutma malzemesi olarak yağ kullanılır. Yüksek gerilim akım transformatörleri genellikle harici ortamlarda kullanıldıklarında belirli bir krepaj mesafesine sahip izolatörler içerisinde üretilirler. Yüksek gerilim akım transformatörleri kafa tipi, kazan tipi veya bushing tipi olarak üç farklı şekilde üretilebilirler. Resim 3.3’de 170 kV ve 420 kV kafa tipi akım transformatörü örnekleri görülebilir.



Resim 3.3. Yüksek gerilim kafa tipi akım transformatörleri

3.2. Yalıtım Biçimine Göre Akım Transformatörleri

Yalıtım biçimine göre akım transformatörleri yağlı tip ve kuru tip akım transformatörü olmak üzere iki ayrı grupta incelenebilir. SF₆ gazı da ölçü transformatörlerinde yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir. Fakat çevreye vermiş olduğu zararlar nedeniyle ve üretim teknikleri bakımından çok kullanışlı olmaması nedeniyle SF₆ gazı ölçü transformatörü örnekleri çok azdır.

3.2.1. Yağlı tip akım transformatörleri

Bu tip akım ölçü transformatörlerinde sargılar ve şase arasındaki yalıtkanlığı izolasyon yağı sağlar. Kuru tip akım ölçü transformatörlerine göre, terleme ve yağ sızıntısı gibi kötü faktörleri bulunur. Yüksek gerilimde kullanılan akım ölçü transformatörleri genelde yağlı tip akım ölçü transformatörlerdir. Özellikle 154 kV ve üzeri yüksek gerilim şebekelerinde kullanılırlar. Yağlı tip akım transformatörleri yapıları gereği periyodik olarak bakım ve onarım işlemleri gerektirir. Herhangi bir yağ kaçağı görüldüğünde transformatöre en kısa sürede bakım yapılmalı ve sorunu giderilmelidir. Aksi durumda transformatör yağ kaybettiğçe soğutma ve yalıtım görevini yerine getiremez hale gelir ve transformatörün patlamasına yol açacak büyüklükte hasarlar meydana getirebilir.



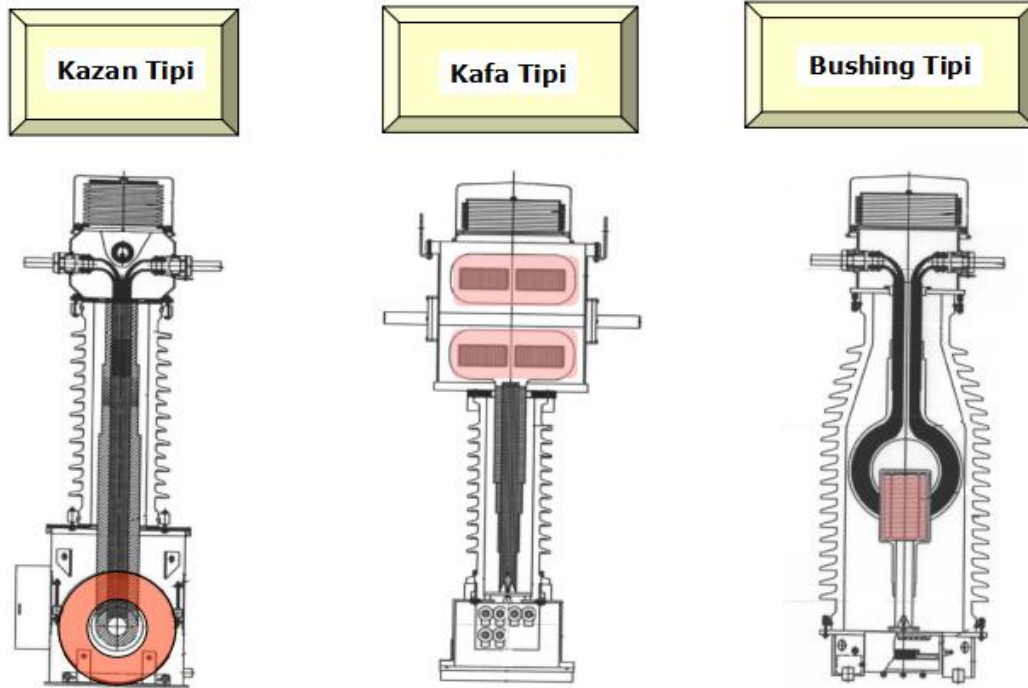
Resim 3.4. Yağlı tip akım transformatörü

Yağlı tip akım transformatörleri, transformatör aktif kısmının (primer ve sekonder) bulunduğu yere göre üç farklı tipte tasarlanabilirler. Bunlar;

- Bushing tipi
- Kafa tipi
- Kazan tipi

olarak isimlendirilirler. Temel olarak ve işlevsel bakımdan birbirlerinden hiçbir farklılıkları yoktur. En yaygın kullanılan yağlı tip akım transformatörü Bushing tipi akım transformatördür. Türkiye ve Dünya’da üretimi en standart olan ve bilinen tip olması nedeniyle çok tercih edilirler.

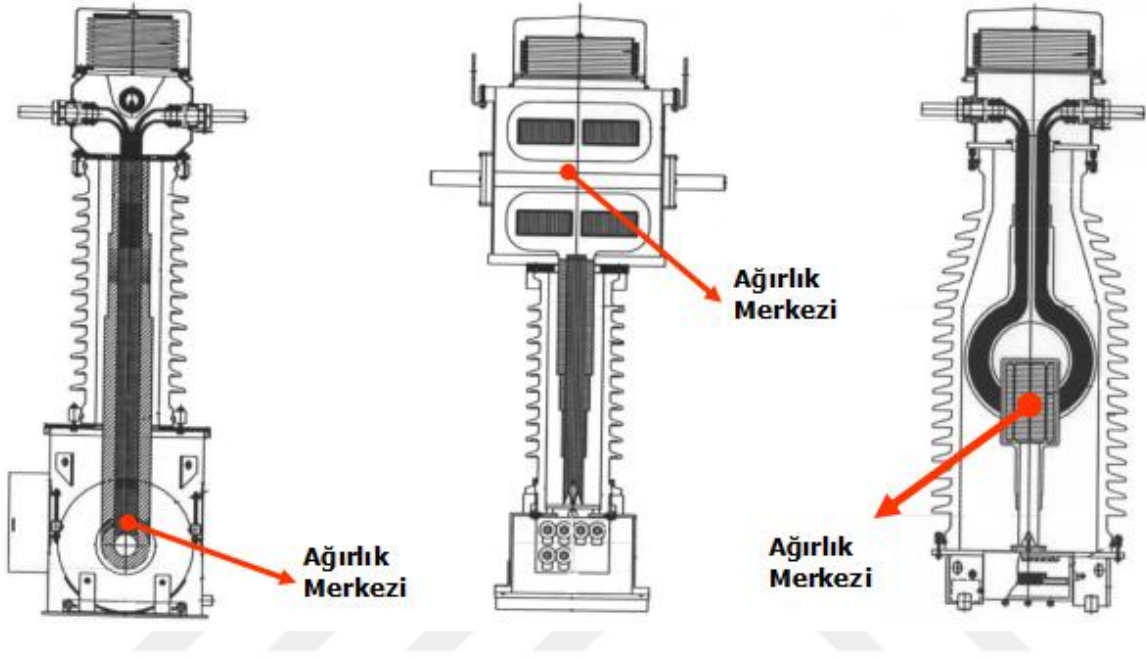
Bu tipler arasında depreme dayanıklılık ve yağ kaybetme durumundaki dayanıklılıkları göz önüne alınarak bir karşılaştırma yapılabilir. Kafa tipi akım transformatörleri aktif kısım transformatörün tepesinde olduğundan ağırlık merkezi yukarıdadır. Bundan dolayı depreme en az dayanıklı tiptir. Aynı zamanda yağ kaybettiğinde ilk olarak aktif kısım yağdan mahsur kalacağı için bu durumdaki dayanıklılığı da en kötü akım transformatörüdür. Tercih edilme nedeni fiyat ve maliyet bakımından daha ucuz olmasıdır. Bunun yanında aktif kısmı izolatörün içerisinde olmadığından herhangi bir arıza sonucunda transformatör patlar ise porselen izolatör herhangi bir arızaya maruz kalmayacak ve etrafına büyük zararlar vermeyecektir.



Şekil 3.1. Yağlı tip akım transformatörü çeşitleri

Kazan tipi akım transformatörleri ise kafa tipi akım transformatörün tam tersi özelliklere sahiptir. Ağırlık merkezi aktif kısmın tabanında olması nedeni ile aşağıdadır. Bundan dolayı özellikle deprem riski fazla olan bölgelerde tercih edilirler. Fakat kazan tipi akım

transformatörleri çok ağır ve maliyeti yüksek olduğundan fazla tercih edilmezler. Bunun nedeni ise primer bakır iletkenlerin transformatörün tabanından yukarıda bulunan transformatörün kafa kısmına kadar uzatılmasıdır. Bakır ağırlığı arttığından hem maliyet olarak yüksek, hem de nakliyesi ve taşınması sıkıntılı bir akım transformatörü tipidir.



Şekil 3.2. Yağlı tip akım transformatörü ağırlık merkezleri

3.2.2. Kuru tip akım transformatörleri

Akım ölçü transformatörlerinin iletken kısımlarını birbirlerinden ve şasesden ayıran katı yalıtkan malzemelerden oluşurlar. Bu tip akım ölçü transformatörlerinde yalıtım maddesi olarak genellikle zift, kâğıt, epoksi reçine vb. malzemeler kullanılır. Genellikle alçak gerilim sistemlerinde kullanılan akım ölçü transformatörleri bu tiptir. Ekonomik olarak ucuzdurlar, fakat arıza oluşması durumunda tamiri mümkün olamamaktadır.

Kuru tip akım transformatörleri genellikle orta ve alçak gerilim seviyelerinde kullanılırlar. Yüksek gerilim sistemlerde kuru tip kullanımına ilişkin çalışmalar devam etmektedir. Fakat şu an kullanılan malzeme teknolojisi buna izin vermemektedir. Yağlı tip akım transformatörleri herhangi bir büyük arızadan dolayı patlaması sonucunda hem çevre kirliliği hem de yakınında bulunan canlılar için hayati tehlikeler arz eder. Yüksek gerilim akım transformatörleri için diğer bir alternatif çözüm ise porselen izolatör yerine silikon

izolatör kullanımıdır. Porselen izolatörlü bir akım transformatörü bir arıza nedeni ile patlaması sonucunda porselen parçalar yüzlerce metre ileriye gidebilmektedir. Fakat silikon izolatörlü bir akım transformatöründe böyle bir durum söz konusu değildir. Bundan dolayı Dünya’da ve ülkemizde özellikle kuru tip reçine ile izolasyonu yapılabilecek transformatörler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

3.3. Kullanıldıkları Yere Göre Akım Transformatörleri

Kullanıldıkları yere göre akım transformatörleri Dahili Tip ve Harici Tip olmak üzere iki grupta incelenebilir.

3.3.1. Dahili tip akım transformatörleri

Genellikle dış etkilere karşı dayanımı az olan tipteki akım ölçü transformatörlerdir. Kapalı yerlerde kullanıma uygundur. Özellikle dağıtım şebekelerinde hücrelerde kullanılırlar. Dahili tip akım transformatörlerinin gerilim seviyeleri çoğunlukla alçak ve orta gerilimdir. Dahili ortamda kullanılacağı için yüzeysel kaçak yolu uzunluğu (krepaj mesafesi) için istenilen özel bir değer yoktur. Bundan dolayı dahili tip akım transformatörleri pedigotlu yapıya sahip değildir. Yüzeyleri Resim 3.5’de görüldüğü üzere düz bir yapıdadır. Dahili tip akım transformatörleri genellikle epoksi reçine ile üretilirler.



Resim 3.5. Orta gerilim dahili tip akım transformatörü

3.3.2. Harici tip akım transformatörleri

Yapıları bakımından dahili tip akım ölçü transformatörlerine göre ortam şartlarına karşı daha dayanıklıdırlar. Açık şalt sahalarında kullanılan akım ölçü transformatörleri harici tip akım transformatörlerine örnek verilebilir.

Harici tip akım transformatörleri genellikle yüksek gerilim sistemlerinde kullanılmasının yanı sıra her gerilim seviyesinde talep edilebilirler (Resim 3.6). Transformatörün kullanılacağı ortamın kirlilik seviyesi, nem oranı ve tuzluluk durumu, nem oranına bağlı olarak dahili ortamlarda bile harici tip akım transformatörleri kullanılmak durumunda kalınabilir.

Harici tip akım transformatörleri dışarıda kullanıldıklarından dolayı yüzey temizliğine çok dikkat edilmelidir. Belirli periyotlar ile transformatörün yüzeyleri temizlenmeli ve bakımları yapılmalıdır. Buna özen gösterilmemesi durumunda akım transformatörünün yüzeyleri aşırı kirlilik sonucunda yüzeysel kaçaklara maruz kalabilir. Transformatör yüzeyinde kuru bant oluşumu meydana gelebilir ve bu da transformatörün ömrünün kısılmasına yol açar.

Harici tip akım transformatörlerinin yüzeysel kaçak yolu uzunlukları dahili tip akım transformatörlerine göre daha uzundur. Bundan dolayı yüzeyleri pedigotlu bir yapıya sahiptir.



Resim 3.6. Orta gerilim ve yüksek gerilim harici tip akım transformatörü

4. AKIM TRANSFORMATÖRÜ TASARIMI

Üretilen tüm elektriksel cihazlarda olduğu gibi akım transformatörünün tasarımında göz önünde bulunulması gereken standartlar ve tasarım kriterleri vardır. Akım transformatörlerinin teknik karakteristikleri bunu kullanacak kurum veya kuruluşlar tarafından belirlenir ve her bir parametrenin dikkatle ve özenle ihtiyaca uygun olarak seçilmesi gerekir.

4.1. Akım Transformatörü Tasarım Kriterleri

Bir akım transformatörünün tasarımı yapılabilmesi için aşağıdaki tasarım kriterlerinin belirtilmesi gerekir. Bu veriler ışığında en doğru ve optimum akım transformatörü tasarımı ilgili standartlara göre yapılabilir [1].

- Standart,
- En yüksek sistem gerilimi, kV,
- Frekans, Hz,
- Akım oranı,
- Anma yükü, VA,
- Doğruluk sınıfı,
- Çevre koşulları,
- Kısa devre akımı, kA,
- Sekonder sayısı,

4.1.1. Standart

Transformatör tasarım kriterlerinin en önemli ve karar verilmesi gereken ilk maddesi hangi standarta göre bir akım transformatörü istenildiğidir. Aynı anda birden fazla akım transformatörü standardı seçilmemelidir. Çünkü her bir standartın sınıf, gerilim seviyesi, yük gibi temel transformatör parametrelerinde farklılıklar söz konusudur.

En yaygın olarak kullanılan akım transformatörü standartları American National Standards Institute (ANSI) ve International Electrotechnical Commission (IEC) standartlarıdır. IEC

standartı ülkemizde kullanılan akım transformatörlerinde ve Dünya'da da en yaygın olarak kabul gören akım transformatörü standartıdır. ANSI standartı ise daha çok Amerika Bileşik Devletleri ve Güney Amerika Kıtası'nda yer alan ülkelerde kullanılır. ANSI standartında temel ölçü birimleri metrik sistem olmadığı için Avrupa ve Asya ülkelerinde kabul görmemektedir. Bunun dışında Avustralya ve Kanada'nın kendine özgü standartları mevcuttur ve bunları kullanmaktadırlar.

Akım transformatörlerinde kullanılan IEC standartları, IEC 61869-1 ve IEC 61869-2'dir. IEC 61869-1 standartı ölçü transformatörleri için genel kuralları belirler. Bu standartta yer alan kriterler hem akım, hem de gerilim ölçü transformatörleri için geçerlidir. IEC 61869-2 standartı akım transformatörü tasarımı için gereksinimleri, sınıf ve yükleri, hata oranları ve hata sınırları gibi temel parametrelerin anlatıldığı standarttır.

4.1.2. En yüksek sistem gerilimi

En yüksek sistem gerilimi standarttan seçilir. Bu değer kullanılan standarta göre farklılık gösterir. ANSI ve IEC standartlarında farklı en yüksek sistem gerilimi değerleri mevcuttur. Bu değer, aynı zamanda izolasyon seviyesini belirler. Transformatörün izolasyon seviyesini o transformatörün çalışacağı en yüksek sistem gerilimi, bir dakika süreli şebeke frekanslı test gerilimi ve yıldırım darbe gerilim değeri belirler.

En yüksek sistem gerilimi 36 kV olarak belirlenen bir akım transformatörünün izolasyon seviyesi IEC standartına göre 36/70/170 kV olur. Burada 70 kV standartta tanımlı bir dakika süreli şebeke frekanslı test gerilimi ve 170 kV ise yıldırım darbe dayanım gerilimidir [6,7].

Standartta yer alan değerlerden farklı izolasyon değerleri de özel koşullar için talep edilebilir. Fakat özel bir durum yok iken standarttan farklı ve daha yüksek seçilen izolasyon seviyeleri akım transformatörünün boyut ve maliyet olarak büyümesine neden olur. Örneğin 36/70/250 kV olarak bir izolasyon seviyesi seçilir ise akım transformatörünün yüzeysel kaçak uzunluğunun ve boyunun artırılması gerekir. Çünkü bu transformatörün yıldırım darbe gerilimi 250 kV olarak tanımlanmıştır. Standartta yer alan 170 kV değerinde akım transformatörünün boyu, 250 kV seviyesinde de kullanılır ise, bu

gerilim seviyesinde atlamalar ve yüzeysel boşalmalar meydana gelir. IEC 61869-1 standartında tanımlı en yüksek sistem gerilimleri Çizelge 4.1’de yer almaktadır [6,7].

Çizelge 4.1. Ölçü transformatörleri için izolasyon seviyeleri

En yüksek sistem gerilimi kV	Şebeke frekanslı dayanma gerilimi kV	Yıldırım darbelerine dayanma gerilimi kV
0,72	3	-
1,2	6	-
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75
17,5	38	75 95
24	50	92 125
36	70	145 170
52	75	250
72,5	140	325
100	185	450
123	185 230	450 550
145	230 275	550 650
170	275 325	650 750
245	395 460	950 1050
300	395 460	950 1050
362	460 510	1050 1175
420	570 630	1300 1425
550	630 680	1425 1550
800	880 975	1950 210

4.1.3. Frekans

Genellikle 50 Hz ve 60 Hz olarak seçilir. Akım transformatörleri 50 Hz ve 60 Hz'de karakteristiklerinde fazla bir değişim olmadan çalışabilirler. Ülkemizde şebeke frekansı 50 Hz'dir. Bunun dışında Avrupa, Asya ve Afrika'da 50 Hz kullanılır. ANSI standartının kullanıldığı bölgelerde, ABD ve Güney Amerika ülkelerinde 60 Hz frekans geçerlidir.

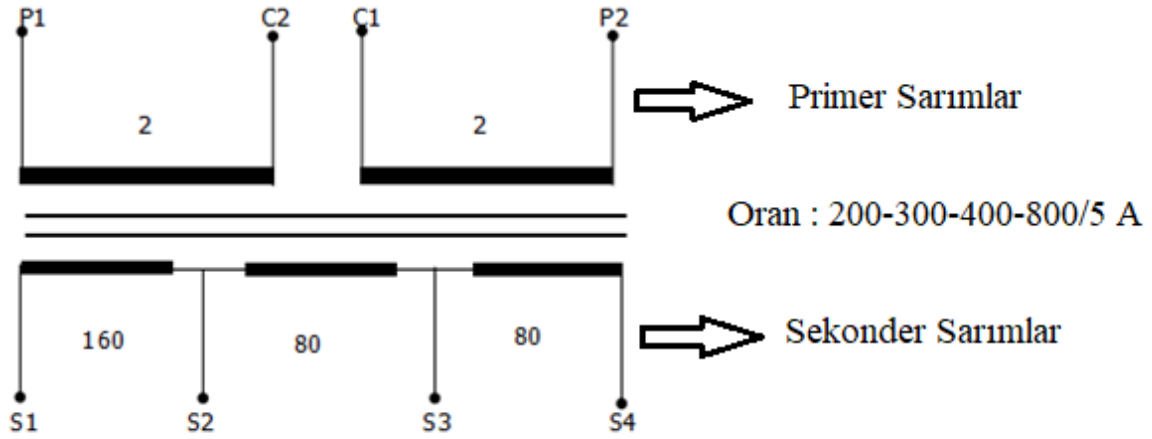
4.1.4. Akım oranı

Akım transformatörünün primer sargısından geçen akım değerinin sekonder sargısından geçen akım değerine oranı olarak ifade edilir. Tasarımı en kolay akım transformatörleri tek oranlı akım transformatörleridir. Tek oranlı akım transformatörlerine örnekler 300/5 A, 200/5 A, 1000/1 A gibi tek bir primer akımı sekonderde daha küçük akımlara çeviren akım transformatörleridir.

Ancak, pratik ve kullanışlı olmasından dolayı çok oranlı akım transformatörleri işletmelerde tercih edilebilmektedir. 300-600/5 A, 400-800-1200-1600/1 A gibi birden çok primer akımı sekonderde daha küçük akımlara dönüştüren akım transformatörlerine çok oranlı transformatörler denilir.

Transformatörlerde oran değişikliği üç farklı şekilde yapılabilir. Bunlar, primerden tur sayısını değiştirmek, sekonderden tur sayısını değiştirmek ve hem primer hem de sekonderden tur sayısını değiştirmektir. Tasarımı en kolay ve avantajlı olan yöntem primerden tur sayısını değiştirmektir. Bu durumda doğruluk sınıfı ve anma yükleri tüm akım oranlarında kolaylıkla sağlanılabilir.

Aşağıdaki örneklerde bu üç farklı oran değişikliği için tasarım çözümleri sunulmuştur. İlk örnek primer ve sekonderden akım oranını değiştirmek için yapılmıştır. Talep edilen bazı akım oranlarında en avantajlı yöntem primerden akım oranını değiştirmek olsa da, sadece primerden akım oranı değişikliği yaparak bu sağlanamayabilir.



Şekil 4.1. Primer ve sekonder tepli akım transformatörü sargı diagramı

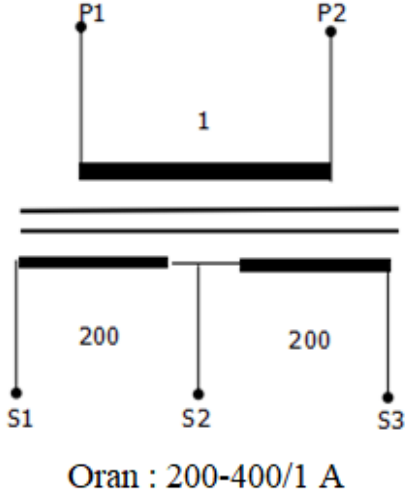
200-300-400-800/5 A akım oranlarına sahip bir akım transformatörünün sargı diagramı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Sargı diagramında da görüleceği üzere hem primer hem de sekonderden akım oranları değiştirilerek tüm primer akımlar için sekonder çıkış alınabilir. Tüm akım oranları için bağlantı detayları Çizelge 4.2'de verilmiştir. İstenilen akım çevirme oranı için primer ve sekonderde yapılması gereken bağlantılar gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. 200-300-400-800/5 A akım transformatörü için bağlantı detayları

Primer				Sekonder			
A	Tur	AT	Bağlantı	A	Tur	AT	Bağlantı
200	4	800	Seri	5	160	800	S1-S2
300	4	1200	Seri	5	240	1200	S1-S3
400	2	800	Paralel	5	160	800	S1-S2
800	2	1600	Paralel	5	320	1600	S1-S4

Bu örnek tasarımda primere birbirinden bağımsız iki turluk iki farklı sargı yapılmıştır. Çizelge 4.2'de tüm akım oranları için bağlantı detayları, sekonder ve primer tur sayıları verilmiştir. Akım transformatörünün temel kuralı primerden geçen akım ve primere atılan tur sayısının çarpımını, sekonder akım ve sekondere atılan tur sayısının çarpımına eşit olmasıdır. Buna Amper-Tur (AT) yasası da denilir. Örnekte 200 A için iki bağımsız sargı birbirine seri bağlanmıştır. Böylece primerdeki Amper-Tur 800 AT olmuştur. Bu amper-tura karşılık sekonder akım 5 A olduğu için 160 tur atılmış ve sekonderde de 800 AT

değeri sağlanmıştır. Bu tasarım yöntemi tüm akımlar için tekrar edilmiş ve Çizelge 4.2’de yer alan değerler hesaplanarak bağlantı detayları verilmiştir.



Şekil 4.2. Sekonder tepli akım transformatörü sargı diagramı

Sekonderden akım değişikliği yapılan bir akım transformatörünün sargı diagramı tasarımı Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu örnek için akım değiştirme oranı 200-400/1 A olan bir akım transformatörü seçilmiştir.

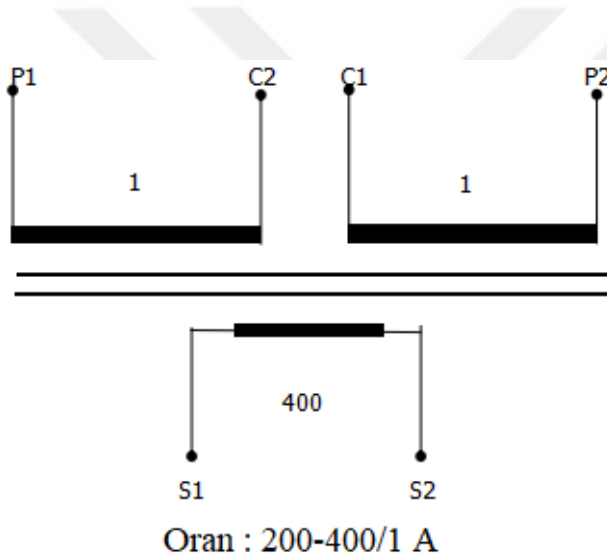
Bu sargı diagramı tasarımında primere bir tur atılmıştır ve primerdeki amper-tur değeri 200 A için 200 AT ve 400 A için 400 AT olarak hesaplanmıştır. Sekonder akımı 1A olduğu için 200 AT için sekondere 200 tur ve 400 AT için sekondere toplam 400 tur atılması gerekmektedir. Bu nedenle sekonder teplerin (S1-S2, S2-S3 arasındaki sarımlar) her birine 200 tur atılarak bu değerler sağlanmıştır. Bu şekilde tasarlanan bir akım transformatöründe kullanıcı 200/1 A için ölçüm alırken, ölçü cihazını transformatörün S1-S2 sekonder çıkışına, 400/1 A için ölçüm alırken ise ölçü cihazını transformatörün S1-S3 çıkışına bağlayarak çalışabilir. Tasarım Çizelge 4.3’te detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.3. 200-400/1 A sekonder tepli akım transformatörü için bağlantı detayları

Primer				Sekonder			
A	Tur	AT	Bağlantı	A	Tur	AT	Bağlantı
200	1	200	-	1	200	200	S1-S2
400	1	400	-	1	400	400	S1-S3

Primerden akım değişikliği yapılan bir akım transformatörünün sargı diagramı tasarımı Şekil 4.3'te verilmiştir. Bu tasarım için sekonderden akım oranı değiştirilen transformatörün oranı örnek alınmıştır (200-400/1 A).

Bu örnekte görüleceği üzere primerden akım değiştirmenin avantajı sekonderde tek bir sargı yapısının olmasıdır. Bu şekilde sekonder nüve kesiti hesaplanırken yalnızca tek bir Amper-Tur değerine göre tasarım yapılır ve buda tasarımcı için akım transformatörünün en kritik noktasıdır. Talep edilen sekonder sınıf ve yüklere göre kullanılacak nüve çeşidi, kullanılacak sekonder nüve kesiti, sekonder tel kesitleri hesaplanır. Bu hesaplamalarda tek bir Amper-Tur değerinin olması daha rahat bir tasarıma yardımcı olur.



Şekil 4.3. Primer tepli akım transformatörü sargı diagramı

Çizelge 4.4. 200-400/1 A primer tepli akım transformatörü için bağlantı detayları

Primer				Sekonder			
A	Tur	AT	Bağlantı	A	Tur	AT	Bağlantı
200	2	200	Seri	1	400	400	S1-S2
400	1	400	Paralel	1	400	400	S1-S2

Sargı diagramında görüleceği üzere primere birbirinden bağımsız birer tur atılmıştır. 200A için bu bağımsız sargılar seri bağlanarak iki turdan geçirilmiş ve 400 AT değeri elde edilmiştir. 400 A için ise bu sargılar paralel bağlanarak yine 400 AT değerinde çalışılmıştır. Böylece sekonderde iki farklı primer akım içinde geçerli olan 400 tur atılarak

tasarım tamamlanmıştır. Çizelge 4.4'te 200-400/1 A primer ve sekonder bağlantı detayları verilmektedir.

4.1.5. Anma yükü

Akım transformatörünün sekonder devresine nominal yük bağlı iken nominal akım geçişi esnasında sekonder devreden geçen yük değeridir. Anma çıkış gücü akım transformatörünün etiketinde belirtilir ve Volt Amper (VA) ile ifade edilir.

Akım transformatörlerinde gerçek VA ihtiyacının belirlenmesi çok önemlidir. Gereğinden fazla olarak seçilen anma yük değerleri transformatörün çalışacağı gerçek ortamda yanlış ölçüm sonuçlarının alınmasına ve bunun yanında akım transformatörünün tasarımının zorlaşmasına neden olur. Akım transformatöründe gereğinden fazla seçilen VA değerleri transformatör boyutlarının ve maliyetlerinin artmasına neden olur. 30 VA'lık bir transformatör, 15 VA'lık bir transformatörden daha iyi değildir.

Günümüzde kullanılan elektronik teçhizatın, akım trafosundan çektiği güçler çok düşüktür. Küçük merkezlerde bağlantı kablo boyları da fazla uzun olmadığı için, bu merkezlerde, korumada kullanılacak akım trafolarının 15 VA gücünde olması genellikle yeterli olur.

Akım transformatörünün gerçek VA ihtiyacı akım transformatörü ile kontrol odası arasındaki kablonun uzunluğu ve kesiti, sekonderden ölçü alınacak cihazın (ampermetre) veya kullanılacak rölenin VA tüketimi biliniyorsa hesaplanılabilir. Kablo tarafından tüketilen güç,

$$P_k = \frac{I_S^2 \times 2 \times d}{a_k \times \delta_{cu}} = 8,77VA \quad (4.1)$$

eşitliği ile verilir [8,9]. Burada P_k tüketilen güç, I_S sekonder akım, d transformatör ile kontrol paneli arasındaki uzaklık, a_k transformatör ile kontrol arasındaki kablonun kesit alanı ve δ_{cu} bakırın öziletkenlik katsayısıdır.

Örneğin,

$I_s:5 \text{ A}$, $d:100 \text{ m}$, $a_k=10 \text{ mm}^2$, $\delta_{cu}=57$ ve rçle güç tüketimi=10 VA ise kablo tarafından tüketilen güç;

$$P_k = \frac{5^2 \times 2 \times 100}{10 \times 57} = 8,77 \text{ VA}$$

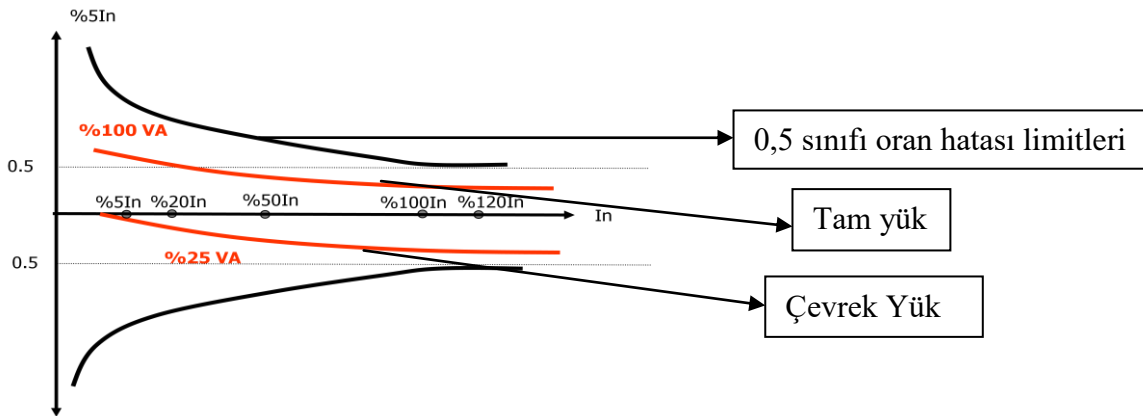
olarak bulunur.

Toplam güç = $8,77 \text{ VA} + 10 \text{ VA} = 18,77 \text{ VA}$ olur.

Gelecekteki yük artışı için;

Yedek %25 = 4,7 VA olduğundan transformatörün toplam gücü= $8,77 + 10 + 4,7 = 23,47 \text{ VA}$ olarak elde edilir.

Yukarıda örneği verilen akım transformatörü için nominal yük 25 VA olarak seçilebilir. Fakat bunun yerine gereksiz daha yüksek yük değerleri belirlenir ise transformatörün verimliliği düşer. Bir akım transformatörünün en verimli çalıştığı yer gerçek VA değeridir. IEC 61869-2 akım transformatörü standardına göre, akım transformatörünün doğruluk sınıfı o akım transformatörüne bağlanacak yükün %25 ve %100'ü arasında sağlanır. Şekil 4.4'te 0,5 sınıfı için %100 yükte ve %25 yükte bir sekonderin sınıf aralığının olması gereken bölge gösterilmiştir [8,9].



Şekil 4.4. Sınıf 0,5 için tam yük ve çeyrek yükteki oran hatası aralığı

Buradaki en önemli husus tespit edilen gücün, kullanılacak akım ölçü transformatörünün gücünün tam yükünden fazla ve çeyrek yükünden de az olmamasıdır. Aksi durumda yanlış ölçme veya yanlış koruma sinyallerinin oluşmasına sebep olabilir. Örneğin bir akım transformatörünün gerçek VA ihtiyacı 10 VA ise ve bu akım transformatörü için 40 VA bir tasarım yaptırılırsa, talep edilen sınıfın hiçbir anlamı kalmaz. Çünkü gerçekte 10 VA için sınıf 2,5-10 VA arasında sağlanması gerekirken bu örnekte 40 VA için 10-40 VA arasında sınıf sağlanır ve tamamen yanlış ölçüm değerleri elde edilir. Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da farklı uzunluklarda ve kesitlerde kullanılan kabloların güç tüketimleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5. Farklı uzunluk ve kesitteki kabloların 1A için güç tüketimi

Akım transformatörü ile ölçü aleti arası mesafe (m)	Sekondere bağlanan kablonun oluşturacağı kayıp P_k (VA) (1A sekonder akım için)		
	2,5 mm ²	4 mm ²	6 mm ²
10	0,14	0,09	0,06
20	0,29	0,18	0,12
40	0,57	0,36	0,24
60	0,86	0,54	0,36
80	1,14	0,71	0,48
100	1,43	0,89	0,6

Çizelge 4.6. Farklı uzunluk ve kesitteki kabloların 5A için güç tüketimi

Akım transformatörü ile ölçü aleti arası mesafe (m)	Sekondere bağlanan kablonun oluşturacağı kayıp P_k (VA) (5A sekonder akım için)			
	2,5 mm ²	4 mm ²	6 mm ²	10 mm ²
1	0,36	0,22	0,15	0,09
2	0,71	0,45	0,3	0,18
3	1,07	0,67	0,45	0,27
4	1,43	0,89	0,6	0,36
5	1,78	1,12	0,74	0,44
6	2,14	1,34	0,89	0,54
7	2,5	1,56	1,06	0,63
8	2,86	1,79	1,19	0,71
9	3,21	2,01	1,34	0,8
10	3,57	2,24	1,49	0,89

4.1.6. Doğruluk sınıfı

Doğruluk sınıfı akım transformatörünün primer ile sekonder akımı arasındaki hatanın oranını belirtir. Doğruluk sınıfı akım transformatörlerinin etiketinde belirtilir. IEC 61869-2 akım transformatörü standardında iki farklı sınıf tanımlanır. Bu sınıflar akım transformatörünün sekonderinin ölçüm amaçlı mı yoksa koruma amaçlı mı kullanılmasına göre farklılık gösterir [10-13]. Akım transformatörünün sekonderi hassas ölçüm yapmak için kullanılacak ise standartta yer alan ölçü sınıflarından uygun olanı ihtiyaca göre seçilmelidir. Akım transformatörünün sekonderi sistemi aşırı akımlardan korumak, bu durumlarda kesicilere ve ayırıcılara sinyal göndermek için kullanılacak ise bu durumda standartta tanımlı koruma sınıflarından uygun olan seçilmelidir.

Ölçü sekonderleri

Ölçü sekonderlerinin sınıfı, Enerji Piyasası Ölçüm Yönetmeliği'ne göre ana güç transformatörü ve/veya devre nominal kapasitesine bağlı olarak seçilir. Bu yönetmeliğe göre 10 MVA üstünde 0.2s sınıfı, 10 MVA altında ise 0,5 sınıfı seçilmelidir [1].

Ölçme amaçlı kullanılan akım transformatörü sekonderleri; normal işletme koşullarında sınırlı bir aralıktaki sistem akımını (sadece) ölçme amacı taşımaktadır. Ölçme akım aralığı genellikle IEC 61869-2 standardına göre anma akımının %5 ile %120'sidir. Ayrıca akım transformatörlerinin, sekonderlerine bağlı ölçü aletlerinin izolasyon dayanımı ve akım taşıma kapasiteleri sınırlı olduğu için bunların zarar görmesini engellemesi gerekir. Bu nedenle belirli bir akım değerinin üzerindeki akım değerlerini sekonder devreye yansıtmayacak şekilde tasarlanmalıdırlar [10-13].

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

Transformatörlerin sınıfı ne kadar hassas ise sağlayabileceği güç miktarı da o kadar düşüktür. Örnek olarak, sınıf 1 - 40 VA'lık bir akım transformatörü sekonderi sınıf 0,5 – 25 VA veya sınıf 0,2 – 10 VA olarak kullanılabilir.

Ölçü sargılarında cihaz emniyet katsayısının (F_s) da doğruluk sınıfı yanında belirtilmesi gerekir (Örnek: $0.5F_s5$). Örneğe göre kısa devre anında primer sargılardan aşırı akım geçerken, ölçü sargıları anma akımının en fazla 5 katında doyar. 1 A sekonder akımı olan bir sargıya bağlanan ölçü cihazından en fazla 5 A akım geçer. Böylece ölçü cihazlarının primerdeki aşırı akımlardan etkilenmemesi sağlanır.

Emniyet katsayısı akım 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 girmesi sağlanmalıdır. 300/5 A'lık bir akım transformatöründe, emniyet katsayısı 5 olarak belirlendi ise, primerden nominal akımın 100 misli bir akım, yani 30 kA geçtiğinde sekonderde, nominal sekonder akımının beş mislinden daha büyük , yani 25 A ve üzerinde bir akım değeri görülmemelidir. Bunun için primerden 1500 A geçmeden önce transformatör doyuma girmelidir. Böylece sekonder akımının primer akımı ile aynı oranda yükselmesi ve sekondere bağlı ölçü aletlerinin aşırı akımlara maruz kalması sonucunda zarar görmesi engellenmiş olur. Transformatörün çalışma bölgesi bu parametreye uygun olarak mıknaatıslanma eğrisinin bilek bölgesinde seçilir.

Çizelge 4.7. Ölçü sekonder sınıfı oran ve faz hatası sınırları

Doğruluk Sınıfı	Nominal akım yüzdesine göre oran 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	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60

Çizelge 4.8. Hassas ölçü sekonder sınıfı oran ve faz hatası sınırları

Doğruluk Sınıfı	Nominal akım yüzdesine göre oran hatası ±%					Nominal akım yüzdesine göre faz açısı hatası ± dakika				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2s	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10
0,5s	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30

IEC 61869-2 standardında 0,1-0,2-0,2s-0,5-0,5s-1-3-5 olmak üzere sekiz farklı sınıf tanımlanır. Bunlardan 0,2s ve 0,5s en hassas sınıfları temsil ederler. Tanımlı bu ölçü sınıfları ve bu ölçü sınıflarına karşılık gelen oran ve faz hatası Çizelge 4.7, Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9'dan görülebilir [10-13].

Çizelge 4.9. Sınıf 3 ve 5 ölçü sekonderleri için oran hatası sınırları

Doğruluk Sınıfı	Nominal akım yüzdesine göre oran hatası ±%	
	50	120
3	3	3
5	5	5

Yukarıdaki tablolar incelendiğinde ölçü sekonderleri için çok farklı ve çeşitli sınıf değerlerinin olduğu görülür. Bu sınıf değerlerinden ihtiyaca en uygun olan sınıfın ve emniyet katsayısının seçilmesi akım transformatörü sekonder tasarımını çok önemli şekilde etkiler. İhtiyaca uygun seçilmeyen sınıf değeri transformatör maliyetini ve boyutunu ciddi oranlarda artırabilir.

Standartta sınıf değerleri tanımlanırken oran hatası ve açı hatası olmak üzere iki farklı değişken tanımlıdır. Oran hatasının matematiksel denklemi Eş. 4.2'de verilmiştir [12].

$$\varepsilon = \frac{k_r \times I_S - I_P}{I_P} \times 100\% \quad (4.2)$$

Burada ε oran hatası, k_r akım dönüştürme oranı, I_S sekonder akım ve I_P primer akım değerleridir.

Faz hatası (FH), ölçümdeki reaktif kayıplar nedeniyle oluşan faz farkı hatasıdır, birimi dakika veya santiradyandır. 1 dakikalık açı, derecenin 60'ta birine tekabül eder. Primer akımının açısı ile sekonder akımının açısı arasındaki fark derece veya radyan cinsinden hesaplanarak dakika ya da santiradyana dönüştürülerek hesaplanır [8,9].

$$\varphi_{FH} = \varphi_P - \varphi_S \quad (4.3)$$

Burada φ_{FH} faz farkı, φ_P primer akımın faz açısı ve φ_S sekonder akımın faz açısıdır.

Koruma sekonderleri

Koruma amaçlı kullanılan 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 taşır. Normal işletme koşullarında da sınıfına uygun ölçüm yapması gerektiğinden çok daha geniş bir bölgede çalışmaktadırlar. Koruma akım transformatörlerinde ölçme akım transformatörlerine ek olarak kompozit hata tanımlıdır [2].

Kompozit hata sadece koruma tipi akım transformatörleri için sınır değerleri belirlenmiş olup diğer hata tipleri gibi kararlı hal için geçerlidir. Koruma akım transformatörlerinin; nominal akımının üzerindeki aşırı akımları, harmonikli akımları ve kısa devre akımlarını belirlenen bir değere kadar sekondere ilemesi gerekir. İşte bu iletim sırasında oluşabilecek hata, kompozit hata ile tanımlanır. 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 Eş. 4.4'te verildiği gibi hesaplanır [12].

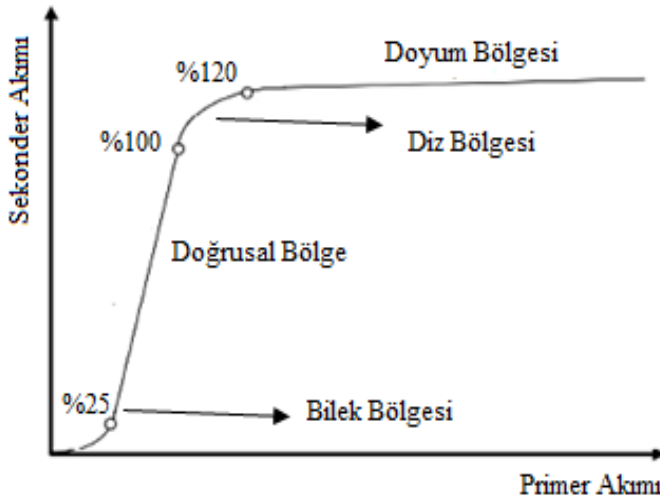
$$\varepsilon_k = \frac{100}{I_P} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_r x_{i_s} - i_p)^2 dt} \quad (4.4)$$

Burada ε_k kompozit hata, I_P primer akım, T periyod, k_r akım dönüştürme oranı, i_s sekonder akımın anlık değeri ve i_p primer akımın anlık değeridir.

Akım hatası efektif değerler dikkate alınarak hesaplandığından nonsinüsoidal şartları yeterince yansıtamazlar. Buna karşın faz hatası ve bileşik hatada anlık akım değerlerinden de yararlanıldığı için hem sinüzoidal hem de nonsinüsoidal şartları (akımın dalga şeklindeki kalıcı değişiklikleri) bir ölçüde yansıtabilirler [2].

Koruma sekonderinin sınıfını ve doyma katsayısını belirlerken röle karakteristiğinin iyice bilinmesi gerekir. Seçim yapmadan önce röle katalogları ve özellikleri özenle incelenmelidir. Koruma sekonderini tanımlamak için doyma noktası, kalıcı manyetik akı ve indüklenen diz gerilimini (knee point) açıklamak gerekir.

Doyma noktası, nüvenin saturasyon öncesi konumundan tam saturasyon konumuna gelmesi sırasında nüvede oluşan akımın tepe değeridir. B/H eğrisinde B'deki %10'luk artışı H'ta %50'lik artışa neden olduğu noktadaki akı değeri olduğu kabul edilir. Kalıcı manyetik akı, akım transformatörünün manyetik devresini doyuma götürebilecek miktarda bir uyarım akımının uygulanmasının ardından bu akımın kesilmesi ile birlikte 3 dakika sonunda halen nüvede bulunan artık manyetik akı miktarını ifade etmektedir. İndüklenen diz gerilimi (knee point), primer terminal açık devre iken sekondere uygulanan şebeke frekanslı gerilim uygulandığında, gerilimdeki %10'luk artışa karşılık mıknatıslanma akımında azami %50 artışı görüldüğü asgari gerilim değerine denir. Koruma transformatörleri bilek bölgesi ile diz noktası arasındaki bölgede çalışırlar.



Şekil 4.5. Sekonder nüvenin doyma eğrisi

Koruma amaçlı kullanılan akım transformatörü sekonder sınıfları ve bunlara ilişkin hata miktarları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği üzere ölçü sekonderlerinden farklı olarak koruma sekonderlerinde hata ölçümü anma akım ve anma yükünde yapılır [12].

Çizelge 4.10. Koruma sekonder sınıfı oran, faz ve kompozit hata sınırları

Doğrulu Sınıfı	Nominal akımda oran hatası $\pm\%$	Nominal akımda faz açısı hatası \pm dakika	Nominal akımda kompozit hata %
5P	1	60	5
10P	3	-	10

Örneğin sınıf 5P20 bir koruma sekonderinin hatası anma akımının 20 katında %5'den küçüktür ve dönüştürme oranını akımın 20 katına kadar sağlar. Bir akım transformatöründen en iyi performansı, anma yükünde çalışırken alınır. Transformatörde doyma katsayısı ve güç çarpımı sabittir. Örneğin 0.5Fs5, 30VA bir sekondere 10VA yük bağlanırsa doyma katsayısı 15'e çıkar. Bu durumda, kısa devre anında ölçü cihazlarına anma akımının 15 katı kadar fazla akım gelecek ve cihazın hasarlanmasına neden olacaktır. Koruma sekonderi için diğer bir örnek verilirse, 5P20, 30VA bir sekondere 10VA bir yük bağlanır ise doyma katsayısı 60'a çıkar. Bu durumda transformatör anma akımının 60 katına kadar ölçüm yapabileceği için gereksiz yere büyük ve maliyetli tasarlanmış olur.

4.1.7. Çevre koşulları

Harici akım transformatörlerinin deniz seviyesinden çalışma yüksekliği (rakım), deprem ve iklim koşulları, istenilen kaçak yolu uzunluğu mutlaka belirtilmelidir. Dahili ve harici transformatörlerin işletmelerde yüzey temizliğine dikkat edilmelidir.



Resim 4.1. Krepaj mesafesinin gösterimi

Kaçak yolu uzunluğu diğer bir ifade ile krepaj mesafesi, akım transformatörünün kafası ile tabanı arasındaki iki iletken arasındaki toplam mesafedir. Özellikle harici akım transformatörleri için çok kritik bir önem taşır. Resim 4.1’de harici akım transformatörü izolatörü üzerinde krepaj mesafesi görülebilir.

Çizelge 4.11. Yüksek gerilim akım transformatörleri standart krepaj mesafeleri

kV	Spesifik krepaj mesafesi (mm/kV)	Toplam krepaj mesafesi (mm)
72,5	16	1160
72,5	20	1450
72,5	25	1813
72,5	31	2248
123	16	1968
123	20	2460
123	25	3075
123	31	3813
145	16	2320
145	20	2900
145	25	3625
145	31	4495
170	16	2720
170	20	3400
170	25	4250
170	31	5270
245	16	3920
245	20	4900
245	25	6125
245	31	7595
300	16	4800
300	20	6000
300	25	7500
300	31	9300
362	16	5792
362	20	7240
362	25	9050
362	31	11222
420	16	6720
420	20	8400
420	25	10500
420	31	13020

Krepaj mesafesi nemlilik, kirlilik, denizellik ve tuzluluk durumuna göre değişebilmektedir. Genellikle çevre kirliliği çok fazla olmayan bölgelerde krepaj mesafesi standart olarak 25 mm/kV olarak talep edilebilir. IEC 61869-2 akım transformatörü standardında da krepaj mesafesi ile ilgili bilgilerde bu detay görülebilir [10-13]. Kirlilik oranı daha yüksek bölgelerde ise genellikle 31 mm/kV standart olarak talep edilebilir. Bunun dışında seçilecek olan akım transformatörü krepaj değeri, izolatör boyutunun artmasına, dolayısıyla boyut ve maliyet yükselmesine neden olur. Çizelge 4.11’de yüksek gerilim akım transformatörleri için standart krepaj mesafesi değerleri hesaplanmıştır.

Bir transformatörün yalıtımı, iç yalıtım ve dış yalıtım olmak üzere iki kısımdan meydana gelir. Yağlı tip akım ve gerilim transformatörleri, hermetik olarak kapalı oldukları için, dış ortamdaki atmosferik şartlar, iç izolasyonu etkilemezler. Bu durum IEC 61869-2, IEC 61869-3 ve IEC 61869-5 de belirtilmiştir [10-13].

Deniz seviyesinden yükseklik 1000 metrenin üzerine çıktığında, basınç azalacağı için yüksek gerilim ile toprak ucu (alçak gerilim) arasındaki yüzeysel atlama, daha kısa mesafelerde meydana gelir. Çünkü deniz seviyesinden yukarılara çıkıldıkça moleküller havada daha serbest bir şekilde hareket ederler ve atlamalar daha kolay meydana gelebilir. Bu nedenle dış izolasyonu oluşturan izolatör boyunun (atlama mesafesi) yüksekliğe bağlı olarak artırılması gerekir. Öncelikli olarak IEC 61869-2 ‘de belirtilen katsayı hesaplanır[12].

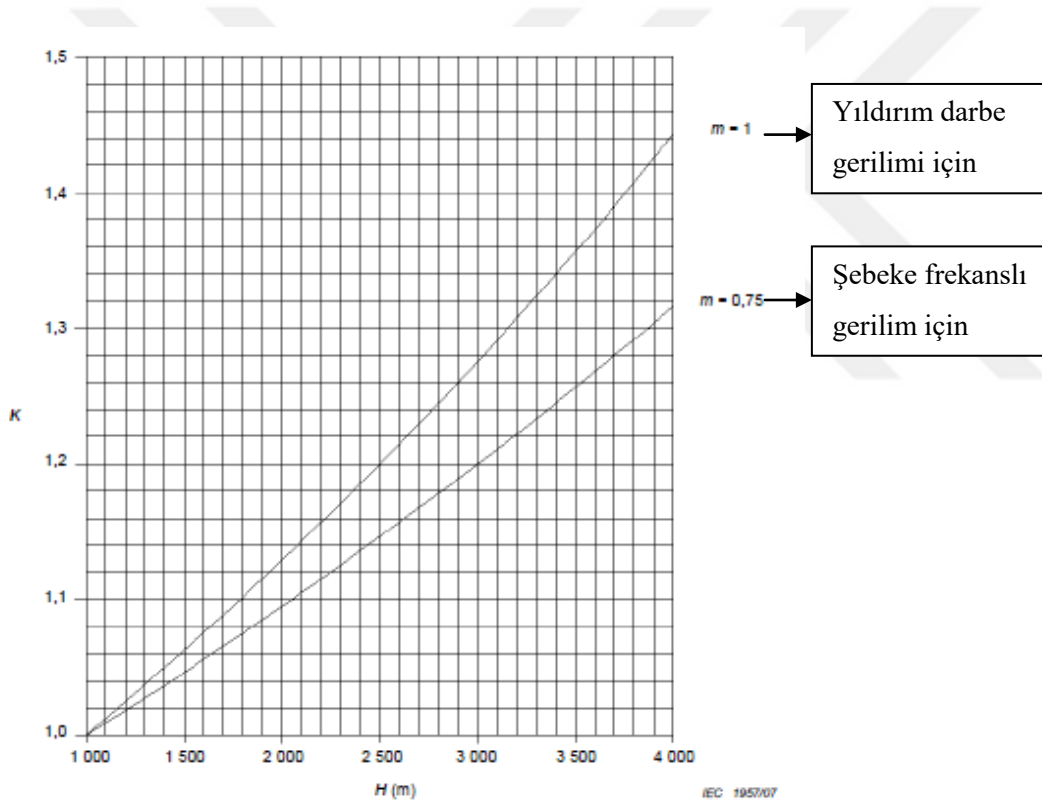
Bu katsayı ile 1000 m seviyede kabul edilen test gerilimleri çarpılarak yeni gerilimler bulunur. Değişik yükseltilerdeki hesaplanmış test gerilimleri Çizelge 4.12’deki gibidir. Bu test gerilimleri 170 kV gerilim seviyesi için hesaplanmıştır. 170 kV izolasyon değerleri 170/325/750 kV olarak alınmıştır.

$$K = e^{m \times (h-1000)/8150} \quad (4.5)$$

Burada K deniz seviyesine bağlı izolasyon katsayısı, h deniz seviyesinden yükseklik, m darbe dayanım gerilimleri için sabit 1 değerindedir. Anahtarlı darbe gerilim değeri için sabit 0,75 değerindedir.

Çizelge 4.12. 170 kV için farklı rakımlarda hesaplanan izolasyon değerleri

Deniz seviyesi yüksekliği	1545 m	1027m	1069	1240 m	1365 m
Hesaplanan Katsayı	1.069	1.0033	1.0085	1.0298	1.0458
Şebeke Frekanslı 1 dakika dayanım gerilimi (kV):	347.47	326	328	334.7	339.88
Yıldırım Darbe dayanım gerilimi (kV):	801.86	752	757	772	784



Şekil 4.6. K katsayısı grafiği

Yeni gelimlere göre kullanılması gereken izolatör boyları aşağıdaki şekilde hesaplanır. 170 / 325 / 750 kV gerilim seviyesinde standart olarak üretilen transformatörlerin izolatör boyları minimum 1618 mm'dir. Bu durumda mm başına düşen gerilim seviyeleri:

Şebeke frekanslı 1 dk test gerilimi için : $325 \text{ kV} / 1618 \text{ mm} = 0,2 \text{ kV/mm}$

Yıldırım darbe test gerilimi için : $750\text{kV} / 1618 \text{ mm} = 0.4635 \text{ kV/mm}$

kV/mm değerlerini sabit tutarak elde edilecek yeni izolatör boyları Çizelge 4.13'deki gibidir.

Çizelge 4.13. 170 kV farklı rakımlarda kullanılması gereken izolatör boyları

Deniz seviyesi yüksekliği (m)	1545	1027	1069	1240	1365
Hesaplanan Minimum izolatör boyu (mm)	1738	1630	1640	1674	1699
Kullanılan İzolatör boyu (mm)	1818 veya 1950	1683	1683	1683	1818 veya 1950

Yükseltilere bağlı olarak değiştirilen izolatör boyları, hesaplanan değerlere ya eşit ya da büyük olmalıdır. Bu şekilde dış izolasyonun yeterli miktarda arttırıldığı teyit edilir. Deniz seviyesinden yükseklik 1000 metrenin üzerine çıktığında transformatörlerin sadece dış izolasyonlarının yükseltiye bağlı olarak arttırılması gerekir. İç izolasyonlarda herhangi bir değişiklik olmaz. Yapı hermetik olduğu için deniz seviyesi ile aynı izolasyonun sağlanması yeterlidir. Bu nedenle işletme etiketi üzerine yazılacak izolasyon seviyesinin standart olarak 170 / 325 / 750 kV olarak yazılması yeterlidir. Aksi takdirde arttırılmış izolasyon gerilimleri ürünün final testlerinde uygulanmak zorunda kalınacak ve iç izolasyon da gereksiz yere yüksek gerilime maruz kalacağı için yaşlanmış olacaktır. İç izolasyon etkilenmediği göz önüne alındığında dış izolasyonun kontrolü için izolatör boyunun ölçülmesi ve yukarıda hesaplanan boylara göre uygun olup olmadığının teyidi yeterlidir.

4.1.8. Kısa devre akımı

Kısa devre akımı transformatörün, kısa devre edilen sekonder sargısıyla, hasar verici etkilere maruz kalmaksızın bir saniye boyunca dayanacağı, primer akımın etken değeri olarak tanımlanır ve I_{th} ile gösterilir. Transformatörün termal dayanımının ölçüldüğü akım değeridir. Bu akım değerinde transformatörün primer ve sekonder iletkenleri ısınıp kavrulmadan dayanabilmelidir. Genellikle 1 saniye veya 3 saniye süreli olarak tanımlanır.

Kısa devre akımı, akım transformatörlerinin etiketlerinde belirtilir. Orta gerilim akım transformatörleri için genellikle 25 kA/1 s olarak talep edilir. Yüksek gerilim 170 kV akım transformatörlerinde genellikle 31,5 kA/1 s, 420 kV izolasyon seviyelerinde ise 50 kA/1 s olarak talep edilir.

Kısa devre akımı,

$$I_{th} = \frac{S_k}{U_n \times \sqrt{3}} [\text{kA}] \quad (4.6)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada S_k transformatörün bağlandığı noktadaki hata anında oluşacak güç miktarı (MVA) ve U_n faz-faz servis gerilimidir.

1 saniyeden farklı olarak tanımlanmış bir kısa devre akımının değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$I_x = \frac{I_t}{\sqrt{x}} [\text{kA}] \quad (4.7)$$

Burada I_x 1 saniyeden farklı tanımlanmış kısa devre akımı, I_t 1 saniyeden farklı tanımlanmış kısa devre akımının 1 saniye süreli karşılığı ve x 1 saniyeden farklı kısa devre akımı süresidir.

Bir akım transformatörünün kısa devre akımı 25 kA/3 s olarak tanımlanmış ise bu akım transformatörünün 1 saniye karşılığı;

$$I_t = 25 \times \sqrt{3} = 43,3 \text{ kA/1 s olarak hesaplanır.}$$

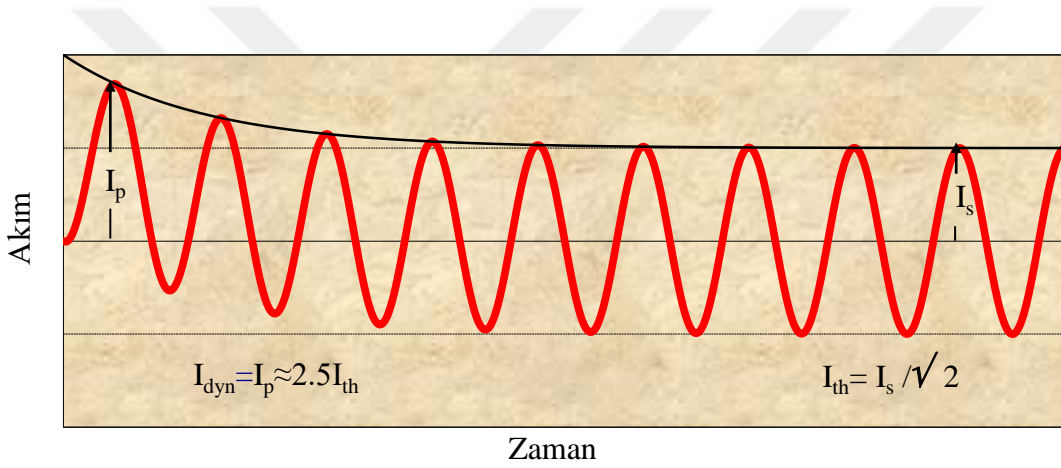
Akım transformatör tasarımı yapılırken kısa devre akımı belirtilmemiş ise standart olarak $100 \times I_n$ kabul edilir. Fakat $100 \times I_n$ gibi tanımlamalar çok oranlı transformatörler göz önüne alındığında tercih edilmezler. Kısa devre akımı transformatörüm 1 saniye boyunca sargılarında bir bozulma olmadan taşıyabileceği en yüksek akım değeridir.

Kısa devre akımının yanında transformatörün, kısa devre edilen sekonder sargısıyla, elektromanyetik kuvvetler tarafından elektriksel ve mekanik olarak zarar görmeksizin

dayanacağı, primer akımın tepe değeri ne dinamik akım denir ve I_{dyn} olarak gösterilir. Kısa süreli dinamik anma akımı, kısa süreli termik anma akımının 2,5 katı olarak dikkate alınır. Kısa süreli dinamik anma akım değeri akım ölçü transformatörünün etiketinde belirtilir. Standart olarak talep edilen kısa devre akımları Çizelge 4.14'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.14. Standart kısa devre akımları

OG seviyesi standart kısa devre akımı değerleri (kA)							YG standart kısa devre akımı değerleri (kA)		
6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50



Resim 4.2. Kısa devre akımının oluşumu

Kısa devre akımının belirlenmesi sırasında iletim hattının karakteristikleri dikkatle çalışılmalıdır. Gereksiz yere fazla seçilen kısa devre akımı transformatörün boyutlarının büyümesine ve maliyetinin artmasına yol açar.

Sürekli çalışma akımında sargılardaki akım yoğunluğu IEC 61869-1 ve IEC 61869-2 standartlarına göre $1,8 \text{ A/mm}^2$, 1 sn süreli kısa devre akımında ise 180 A/mm^2 seçilir. Bu durumda; transformatörün hem çalışma akımındaki, hem de kısa devre akımındaki ısı artışı sınırlandırılmış olur.

Tasarım kriteri olarak Eş. 4.8'de verilen formül kullanılır. alınır. Bu durumda; kısa devre sırasında ortaya çıkacak dinamik kuvvetlerin etkisi sınırlandırılmış olur.

$$I_{th} \times N_p \leq 240 \text{ kAT} \quad (4.8)$$

4.1.9. Sekonder sayısı

Genelde bir adet ölçü ve bir adet koruma sekonderi istenir. Ancak tek ölçü veya tek koruma sekonderi istendiği durumlar da vardır. Her bir sekonder için doğruluk sınıfları ve anma güçleri ayrı ayrı tanımlanmalıdır. Sekonder sayısı arttıkça transformatörün boyutları büyür.

Transformatörün ölçü sekonderlerinden alınacak veriler birden fazla yerde görüntülenmek isteniyorsa veya birden fazla farklı yüklerden ölçüm alınması gerektiği durumlarda ölçü sekonderi sayısı artabilir. Aynı durum koruma sekonderleri içinde geçerlidir. Koruma sekonderleri güç sisteminin sigorta görevini yapar. Herhangi bir ani akım yükselmesinde veya kısa devre hatası oluşması durumunda tek bir sekonderden alınacak veriler güvenilir olmayabilir. Bundan dolayı sistemin güvenliğini garanti altına almak için koruma sekonderi sayısı artırılarak yedekleme yapılabilir.

4.2. Akım Transformatörü Primer Tasarımı

Akım transformatörünün tasarım kriterleri ve bir akım transformatörünün tasarımının doğru yapılabilmesi için gerekli olan değerlendirmeler bir önceki bölümde detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümde akım transformatörünün aktif kısmının tasarımını gerçekleştirilecektir. Transformatörün aktif kısmını primer ve sekonder oluşturur.

Primer kısım, sistemden geçen yüksek akımların taşınacağı iletkenlerden oluşur. Bunun için akım transformatöründe şerit bakırlar ve emaye teller kullanılabilir. Bakır şeritler, piyasada genellikle 10x1 mm veya 15x1 mm boyutlarında standart olarak üretilirler. Emaye teller ise çapı 0,12 mm'den başlayarak 4 mm'ye kadar bulunabilir. Primer iletkenin yüksek akımlar geçeceği için bu kısımda bakır şeritlerin kullanılması üretim açısından daha kullanışlıdır. Bunun yanında bakır şeritler kullanıldığında yüzey alanı artırılarak iletkenin aşırı ısınmasının önüne geçilmiş olunur.



Resim 4.3. Primer tasarımda kullanılan bakır şeritler

4.2.1. Primer sargı diagramı

Primer tasarıma başlanır iken öncelikle akım transformatörünün tek oranlı mı yoksa çok oranlı bir akım transformatörü olduğu önemlidir. Bu detaya göre akım transformatörünün primer sarım diagramı yapılır. Akım transformatörü tek oranlı bir akım transformatörü ise, primer tasarımı tek bir galeteye uygun miktarda tur atılarak yapılabilir. Örneğin akım transformatörü 200/5 A bir dönüştürme oranına sahip tek oranlı bir transformatör ise primerine 3 tur atılarak sargı diagramı oluşturulur.

Primere atılacak tur sayısına karar verirken göz önünde bulundurulacak kriterler, kısa devre akımı ve transformatörün gerilim seviyesidir. Akım transformatörü tasarım kriterlerinde primerin mekanik kuvvetlere dayanıklı olabilmesi için kısa devre akımı ile primere atılacak tur sayısının çarpımını 240 kAT'dan küçük olması gerektiği belirtilmiştir. Tasarımı yapılacak akım transformatörünün kısa devre akımı göz önüne alınarak primere atılabilecek maksimum tur sayısı belirlenebilir.

Primere atılacak tur sayısını belirlerken diğer göz önüne alınacak kriter gerilim seviyesidir. Yüksek gerilim akım transformatörlerinde genellikle 1200 amper-tur seviyesinde çalışılması uygundur. Orta gerilim akım transformatörlerinde ise bu değer 600 amper-tur olarak belirlenmiştir. Bu durumda 200/5 A akım dönüştürme oranlı akım

transformatörünün kısa devre akımı 25 kA/1 s ve orta gerilim bir akım transformatörü ise primere atılacak maksimum tur sayısı Eş 4.8'den bulunur.

$$I_{th} \times N_P \leq 240 \text{ kAT}$$

$$25 \text{ kA} \times N_P \leq 240 \text{ kAT}$$

$$N_P \leq 9,6$$

Orta gerilim bir akım transformatörü olduğu için 600 amper-tur değerinde çalışmak uygun olacağı için primere 3 tur atılması yeterlidir. (Şekil 4.7)



Şekil 4.7. Orta gerilim tek oranlı akım transformatörü için primer sargı diagramı

Aynı akım transformatörü yüksek gerilim bir akım transformatörü ve kısa devre akımı 31,5 kA/1 s olarak talep edilseydi primere atılacak maksimum tur sayısı;

$$I_{th} \times N_P \leq 240 \text{ kAT}$$

$$31,5 \text{ kA} \times N_P \leq 240 \text{ kAT}$$

$$N_P \leq 7,6$$

olarak hesaplanır. Yüksek gerilim bir akım transformatörü olduğu için 1200 amper-tur değerinde çalışmak uygun olacağı için primere 6 tur atılması yeterlidir. (Şekil 4.8)

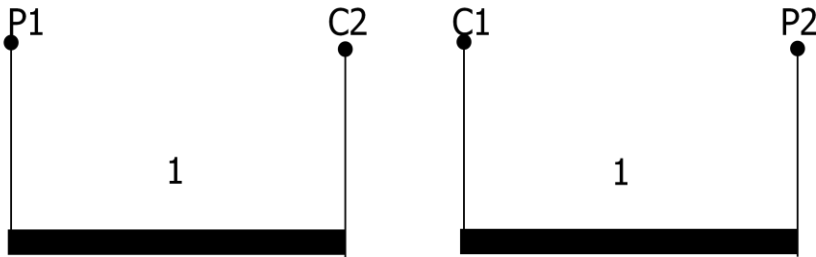


Şekil 4.8. Yüksek gerilim tek oranlı akım transformatörü için primer sargı diagramı

Sargı diagramında yer alan P1 ve P2 numaralandırması akım transformatörü standartları IEC 61869-1 ve IEC 61869-2'de belirtilmiştir. P1 numarası akım transformatörlerinde primer akımın transformatöre girdiği terminalin etiketidir. P2 numarası ise akımın transformatörden çıkıp sistemde devam ettiği terminalin etiketidir. Tek oranlı akım transformatörlerinde numaralandırma bu şekilde yapılır [10-13].

Çok oranlı akım transformatörlerinde akım dönüştürme oranı primer kısımdan sağlanıyor ise, yani transformatör primer tepli ise numaralandırma değişir. Akımın transformatöre girdiği ve çıktığı terminaller yine aynı şekilde numaralandırılır. Fakat arada yer alan sargı uçları için C1,C2,C3... şeklinde devam eden numaralar verilir [10-13].

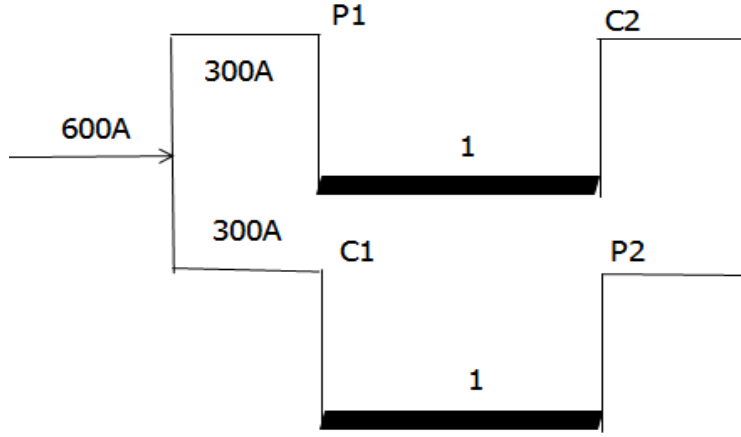
Orta gerilim, 300-600/5 A akım dönüştürme oranına sahip, 25 kA/1 s kısa devre akımı talep edilen bir akım transformatörünün primer sargı diagramı Şekil 4.9'da gösterildiği gibi yapılır.



Şekil 4.9. Orta gerilim çok oranlı akım transformatörü için primer sargı diagramı

Bu bir orta gerilim akım transformatörü olduğu için 600 amper-tur değerinde çalışılacaktır. Bundan dolayı primer terminallerden 600 A geçtiği durumda bu iki primer sargı birbirine paralel olarak bağlanır. P1 ile C1 terminali ve P2 ile C2 terminali birbirlerine bağlanarak

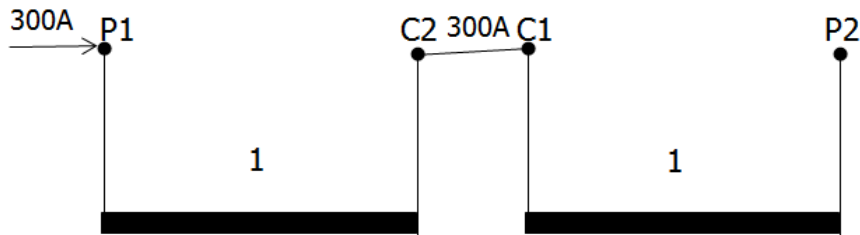
bu işlem gerçekleştirilebilir. Böylece 600A her iki primer sargıya 300A olarak bölünür ve her bir sargıda 300 amper-tur, toplamda ise 600 amper-tur değeri elde edilir. (Şekil 4.10)



Şekil 4.10. Primer sargıların paralel bağlantısı

Primer sargılardan 300 A geçtiği durumda ise bu iki primer sargı birbirine seri olarak bağlanır. C1 ve C2 terminalleri birbirine bağlayarak bu işlem gerçekleştirilebilir. 300 A her iki primer sargıdan da geçer ve toplamda 600 amper-tur değeri elde edilir. (Şekil 4.11)

Bu transformatör yüksek gerilim seviyesinde talep edilseydi bu durumda her bir sargıya 2'şer tur atılması gerekirdi.



Şekil 4.11. Primer sargıların seri bağlantısı

4.2.2 Primer kesit hesabı

Primer bakır kesiti, primer terminallerden geçecek akımın normal çalışma durumunda ve kısa devre hatalarında aşırı ısınmayacak biçimde tasarlanmalıdır. Primer iletkeninde aşırı ısınma oluşması durumunda yağlı akım transformatörlerinde, transformatörün soğutulması

ve yalıtımı için kullanılan yağ aşırı ısınarak genişler. Bu ısınma uzun süre devam eder ve yağ genişmesi kritik bir noktaya ulaşırsa transformatörün patlamasına kadar büyük hasarlar meydana getirebilir. Bunun yanında transformatörün primer izolasyonunda kullanılan dielektrik kağıtlar, bu ısınma sonucu transformatör içerisinde gaz birikmesine neden olur. Bu durumun uzun süre devam etmesi durumunda yine akım transformatöründe büyük hasarlar meydana gelebilir. Bunların önüne geçmek için özellikle yağlı akım transformatörlerinde düzenli aralıklarla yağ numunesi alınarak gaz testine gönderilmesi gerekir.

Kuru tip akım transformatörlerinde ise gereğinden daha küçük kesitlerde primer iletken kullanılması durumunda açığa çıkacak ısı sonucu, transformatör yüzeyinde çatlaklar meydana gelebilir. Aynı zamanda bu ısı süreklilik arz etmesi durumunda kullanılan epoksi reçine içeride kısmı boşalmalara neden olur.

Akım transformatörlerinde primer akıma ve kısa devre akımına göre iki farklı iletken kesiti hesaplanır. Akım transformatörlerinde kullanılan bakırın akım taşıma kapasitesi standarda göre normal çalışma durumunda $1,8 \text{ A/mm}^2$, kısa devre anında ise 180 A/mm^2 olarak belirtilmiştir [12]. Buna göre akım transformatörü kesiti primer akıma ve kısa devre akımına göre Eş. 4.5 ve Eş. 4.6 kullanılarak hesaplanır. Akım transformatörü standartlarına göre primer kesit, normal çalışma durumundayken primer akımın 1,2 katında sürekli çalışacak şekilde tasarlanmalıdır [12]. Bundan dolayı primer akıma göre kesit hesaplanırken primer akım 1,2 sabiti ile çarpılır.

Primer akıma göre primer kesit hesabı;

$$A_{P1} = \frac{1,2 \times I_P}{1,8} [\text{mm}^2] \quad (4.5)$$

Kısa devre akımına göre primer kesit hesabı;

$$A_{P2} = \frac{I_{th}}{180} [\text{mm}^2] \quad (4.6)$$

eşitlikleri kullanılarak yapılır.

Yukarıdaki eşitlikler ile hesaplanan primer kesitlerden hangisi büyük ise akım transformatörü tasarımında o değer kullanılmalıdır. Böylece transformatörün normal çalışma koşullarında ve kısa devre hatası oluşması durumunda primer iletkenlerinde herhangi bir hasar görmeden çalışması garanti altına alınır.

Primer bakır hesabı yapıldıktan sonra belirlenen kesite göre 10x1 mm veya 15x1 mm'lik şerit bakırlardan hangisinden kaç adet kullanılması gerektiğine karar verilir. 10x1 mm'lik bakır iletkenin kesiti 10 mm², 15x1 mm'lik bakır iletkenin kesiti ise 15mm²'dir.

Son aşamada kaç adet iletken kullanılacağına da karar verildikten sonra, bu iletkenlerin yanyana ve üst üste nasıl yerleştirileceğine karar verilir. Primer kesir hesabının daha net anlaşılması için bu aşamaları bir örnek ile açıklansın.

300-600/5 A akım dönüştürme oranı ve 25 kA/1 s kısa devre akımı talep edilen bir akım transformatörünün primer sargı diagramının tasarımını bir önceki bölümde ayrıntılı olarak açıklanarak 2 adet primer sargı ve her bir sargıda 1'er tur atılması gerektiğini belirtmişti.

Primerden 300 A geçtiği durumda sargılar seri bağlanır ve her bir sargıdan 300 A geçer. Primerden 600 A geçtiğinde ise sargılar paralel bağlandığından primer akım her iki sargıya eşit olarak bölünür ve her bir sargıdan yine 300 A geçer. Bundan dolayı primer akımına göre yapılacak hesaplamada 300 A değeri kullanılır.

Primer akıma göre kesit;

$$A_{P1} = \frac{1,2 \times 300}{1,8} \text{ mm}^2$$

$$A_{P1} = 200 \text{ mm}^2 \text{ olarak hesaplanır.}$$

Kısa devre akımına göre kesit;

$$A_{P2} = \frac{25000}{180} = 138,88 \text{ mm}^2$$

olarak hesaplanır.

Bu durumda primerde kullanılacak iletken kesiti 200 mm^2 olarak belirlenir. Örnekte verilen değerlerde, primer kesitin belirlenmesinde primer akımın etkin olduğu görülmektedir. Akım transformatörlerinde kısa devre akımı, primer akımın 120 katından daha büyük olduğu durumlarda kesit belirlenmesinde etkili olur. Bu değer altında bir kısa devre akımı verilen akım transformatörünün primer kesit hesabında kısa devre akımı göz önüne alınmayabilir. Bu örnek için kısa devre akımı 25 kA/1 s yerine 40 kA/1s olarak verilmiş olsaydı kısa devre akımına göre primer kesit;

$$A_{P2} = \frac{40000}{180} = 222,22 \text{ mm}^2$$

olarak hesaplanır. Bu durumda primer kesit $222,22 \text{ mm}^2$ olarak belirlenir.



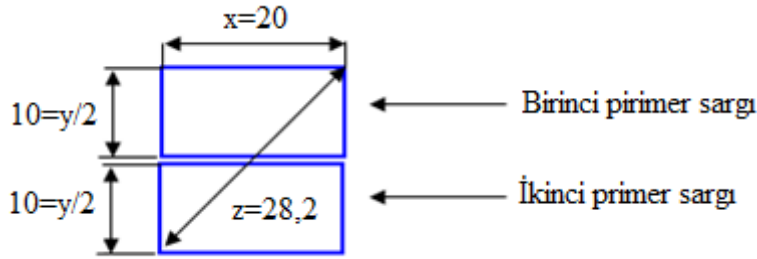
Resim 4.4. Akım transformatörü aktif kısmı

Primerde sargılarda $10 \times 1 \text{ mm}$ veya $15 \times 1 \text{ mm}$ ölçülerindeki primer bakırlardan herhangi biri kullanılabilir. Tasarımda göz önünde bulundurulacak durum kullanılacak primer iletken adetinin tam sayıya yakın olmasıdır. Böylece teorik olarak hesaplanmış primer kesite en yakın kesitte iletken kullanılmış olur. Bu sayede transformatörün maliyeti de

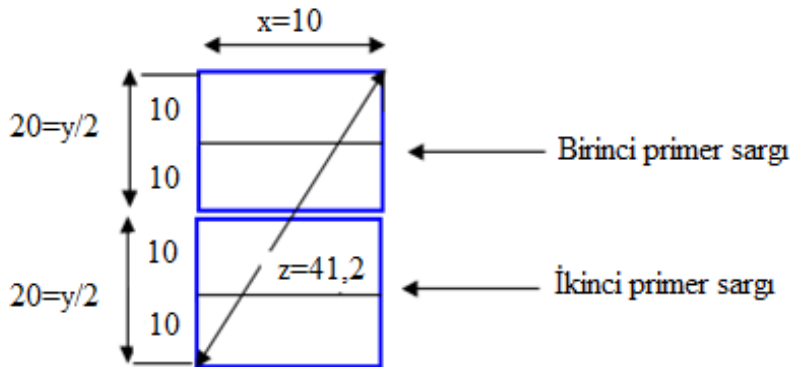
optimum düzeyde tutulabilir. 200mm^2 iletken kesiti hesaplanan bir akım transformatörü primeri için 20 adet 10×1 mm'lik primer ilet kullanılabilir. Böylece tam olarak hesaplanan kesitte iletken kullanılmış olur.

Son olarak hesaplanan bu primer iletkenlerin hangi şekilde dizileceğine karar verilir. Akım transformatöründe primer iletken sekonder sargıların içerisinde geçer. Resim 4.4.'te kağıt izolasyonu yapılmış bir primer ve sekonderi iç içe geçmiş şekilde görülmektedir.

Resim 4.4'te de görüldüğü üzere primer iletkenin sekonder sargıların içerisinde rahat şekilde geçebilmesi için hipotenüsü minimum olacak şekilde tasarlanması gerekir. Bundan dolayı örnekte yer alan iki sargı için primer bakırlar yan yana 20 adet olarak yerleştirilir. Böylece bir sargının boyutu derinlikte 20 mm ve yükseklikte 10 mm olur. İki sargıyı da üst üste koyduğumuzda toplamda primer bakır iletkenin boyutu 20 mm derinlik ve 20 mm yüksekliğe sahip olur. Böylece Şekil 4.12'de görülen en kısa hipotenüs ölçüsü tasarlanır.



Şekil 4.12. Primer bakır dizilişi alternatif - 1



Şekil 4.13. Primer bakır dizilişi alternatif - 2

Bu 20 adet primer bakır yerleşimi, Şekil 4.13'te gösterildiği gibi, bakırların 2 tanesi üst üste ve bu 2 iletken bakırın üzerine 10'ar adet konularak da yapılabilir. Fakat bu durumda primer bakırın izolasyon sonucunda kaplayacağı alan daha büyük olacaktır.

İki farklı primer bakır yerleşiminde, yanlış tasarlanan bir primer dizilişin ne kadar farklı sonuçlara yol açtığı görülmektedir. Optimum primer bakır dizilişi sekonder nüvenin iç çapı da göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Primer tasarım tamamlandıktan sonra sekonder nüvelerin içerisinde geçemeyecek kadar büyük olan bir dizilişin, pratikte hiçbir uygulanabilirliği yoktur.

Akım transformatörü standardında, her bir gerilim seviyesi için tanımlı şebeke frekanslı dayanım gerilimi (PFWV) tanımlanmıştır. Bu gerilime transformatör 1 dakika sürece izolasyonunda herhangi bir bozulma olmadan dayanabilmesi gerekir. Akım transformatörünün primer izolasyonu da bu gerilimlere dayanılacak şekilde belirlenmelidir.

Akım transformatörü üretiminde primer izolasyonda dielektrik kağıtlar kullanılır. Krep kağıdı, kraft kağıdı, karbonlu krep kağıtları bunlara bazı örneklerdir. Bu dielektrik kağıtların izolasyon dayanımları 6 kV/mm ile 10 kV/mm arasında değişiklik gösterir. Yüksek gerilim akım transformatörleri yağ ile doldurulduklarından, dielektrik kağıtlar yağ emdikten sonra delinme gerilimleri artar. Bundan dolayı kullanılan dielektrik kağıdın dayanım gerilimini 7,5 kV/mm olarak belirlenebilir. Bunu referans alarak farklı gerilim seviyeleri için primere atılması gereken izolasyon miktarı Çizelge 4.15'de verilmiştir.

Çizelge 4.15. Farklı gerilim seviyeleri için primer izolasyon miktarları

kV	72,5	125	145	170
PFWV	140	230	275	325
Primer izolasyon kalınlığı (mm)	18	30	35	42

4.3. Akım Transformatörü Sekonder Tasarımı

Akım transformatörünün sekonderi, primerden geçen yüksek akımların akım çevirme oranına uygun olarak ölçülebilir düşük seviyelere dönüştürüldüğü aktif kısımdır. Primerden geçen akım sonucu nüvede oluşan manyetik akıyla birlikte, sekonder

sargılardan dönüştürme oranına bağlı bir akım geçer. Akım transformatörünün sekonder akımı standart değerlere sahiptir. Böylece hem ölçü cihazlarının standartlaşması, hem de akım transformatörü sekonder tasarımında standart iletken çaplarının kullanılması sağlanmış olur. Standart sekonder akım değerleri 1 A, 2 A ve 5 A'dir.

Akım transformatörlerinde tur sayısı ile akım ters orantılıdır. Primerde yüksek akımlar ve az tur sayıları vardır. İletken kesitleri ise yüksek akımlardan dolayı büyüktür. Sekonder de ise düşük akımlar ve daha fazla tur sayısı vardır. İletken kesitleri düşük akımlardan dolayı küçüktür. Akım transformatörü sekonder tasarımında bundan dolayı bakır şeritler yerine emaye teller kullanılır. Sekonder iletken kesiti normal çalışma koşulları altında sekonder akımın 1,2 katında sürekli çalışacak şekilde hesaplanır. 1A için kullanılması gereken tel kesiti ve tel çapı;

$$A_S = \frac{1 \times 1,2}{1,8} = 0,66 \text{ mm}^2$$

$$A_S = \pi r^2$$

$$r = 0,46 \text{ mm}$$

$$R = 0,92 \text{ mm}$$

olarak hesaplanır. Burada A_S hesaplanan sekonder tel kesiti, r hesaplanan sekonder tel yarı çapı ve R hesaplanan sekonder tel çapıdır.

Bu hesaplama sonucu 1 A sekonder akımlı bir akım transformatör tasarımında çapı 1 mm olan bir emaye tel kullanılabilir. Resim 4.5'te sekonder sarım görülmektedir. Benzer hesaplamalar 2 A ve 5 A için yapıldığında standart sekonder akımlar için kullanılması gereken tel çapları Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Farklı sekonder akımlar için hesaplanan sekonder tel çapları

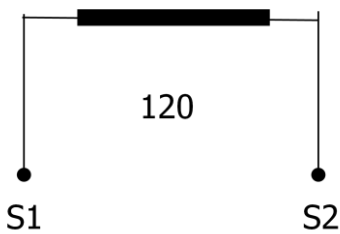
Sekonder Akım (A)	Sekonder tel çapı (mm)
1	1
2	1,4
5	2



Resim 4.5. Otomatik makine ile sekonder sarım

4.3.1. Sekonder sargı diagramı

Akım transformatörü tasarımında primer tur sayısına karar verildikten sonra transformatörün çalışma amper-tur değeri belirlenmiş olur. 300/5 A'lık bir akım transformatörünün primer sargı diagramı, primer sargıya 2 tur atılarak yapıldıysa, transformatörün çalışma amper-tur değeri 600 AT'dir. Bu durumda tasarımı yapılacak akım transformatörünün sekonder akımı 5 A olduğu için sekonder tur sayısı 120 olarak hesaplanır. Böyle bir akım transformatörünün sekonder sargı diagram Şekil 4.14'te gösterildiği gibi yapılır.



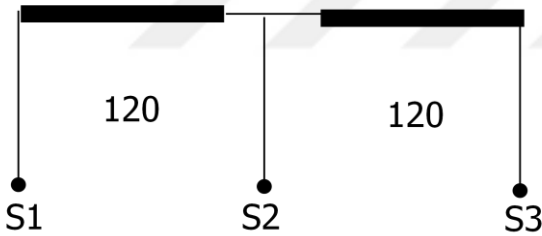
Şekil 4.14. Orta gerilim tek oranlı akım transformatörü için sekonder sargı diagramı

Sargı diagramında yer alan S1 ve S2 numaralandırması akım transformatörü standartları IEC 61869-1 ve IEC 61869-2'de belirtilmiştir. S1 numarası akım transformatörlerinde sekonder akımın transformatöre girdiği terminali etiketler. S2 numarası ise akımın

transformatörden çıkıp sistemde devam ettiği terminali etiketler [10-13]. Tek oranlı akım transformatörlerinde numaralandırma bu şekilde yapılır.

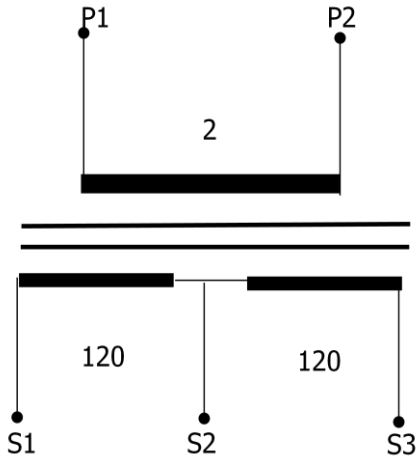
Çok oranlı akım transformatörlerinde akım dönüştürme oranı sekonder kısımdan sağlanıyor ise yani transformatör sekonder tepli ise numaralandırma değişir. Bu durumda sekonder tep sayısına bağlı olarak numaralandırma S1, S2, S3, ... şeklinde devam eder [10-13].

300-600/5 A bir akım transformatörü sekonder tepli olarak tasarlandığında, sekonder sargı diagramında 300 A ve 600 A için ölçüm alabilmek amacıyla iki ayrı sekonder tep yapılır. Primer sargı diagramında bu tasarım için 2 tur atıldığı kabul edilsin. Bu durumda akım transformatöründe 600 A için 1200 amper-tur ve 300 A için 600 AT olmak üzere iki farklı çalışma noktası olur. Dolayısıyla bu iki farklı çalışma noktası için sekonderde iki farklı ölçüm noktası tasarlanmalıdır. Böyle bir akım transformatörünün sekonder sargı diagramı Şekil 4.15'teki gibi yapılır.

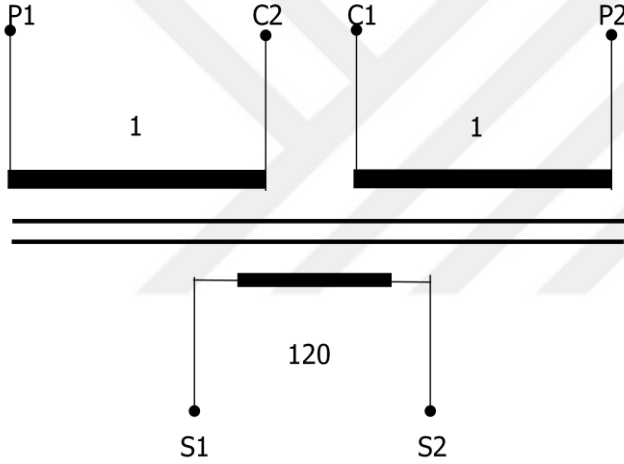


Şekil 4.15. Orta gerilim çok oranlı akım transformatörü için sekonder sargı diagramı

Şekil 4.15'te görüldüğü gibi sekonder akım 5 A olduğundan 600 amper-tur çalışma noktası için (300 A primer akım için) sekonderin S1-S2 terminalleri arasında 120 tur atılmıştır. 1200 amper-tur için (600 A primer akım için) sekonderin S1-S3 çıkışı arasında toplamda 240 tur atılmıştır. İlgili primer akım için sekonder ölçümler rahatlıkla alınabilir.



Şekil 4.16. Orta gerilim 300-600/5 A oranlı sekonder tepli sargı diagramı



Şekil 4.17. Orta gerilim 300-600/5 A oranlı primer tepli sargı diagramı

4.3.2. Sekonder nüve kesit hesabı ve doğruluk sınıfı grafikleri

Manyetik nüve üzerine sarılan bir iletkenin uçları arasında indüklenen gerilim;

$$\Phi = \int B \times dS \quad (4.7)$$

$$\Phi = B \times A_c \times \cos \omega t, \quad \omega = 2\pi f \quad (4.8)$$

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} \times N_s \quad (4.9)$$

$$E = 2\pi f x N_s x B x A_c x \sin wt \quad (4.10)$$

$$E_{\max} = 2\pi f x N_s x B x A_c \quad (4.11)$$

$$E_{\text{rms}} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (4.12)$$

$$E_{\text{rms}} = 4,44 x f x N_s x B x A_c \quad (4.13)$$

Eş.4.13 kullanılarak hesaplanır. Nüve kesiti ise;

$$A_c = \frac{E_{\text{rms}}}{4,44 x f x N_s x B} \quad (4.14)$$

Eş. 4.14 kullanılarak hesaplanır [14]. Burada ϕ manyetik akı, B manyetik akı yoğunluğu, A_c nüve kesit alanı, w açısal hız, f frekans, E gerilim, N_s sekonder tur sayısı, E_{\max} maksimum gerilim ve E_{rms} gerilimin rms değerini ifade eder.

Akım transformatörünün sekonderinde kullanılacak nüvenin kesiti yukarıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir. Akım transformatörü nüve kesit hesabının yapılabilmesi için, her bir sekonderin sınıfı, yükü, akım çevirme oranı, kısa devre akımı, frekansı gibi tasarım kriterlerinin hepsinin eksiksiz olarak belirtilmesi gerekir. Talep edilecek tasarım kriterlerinin eksiksiz ve doğru olarak seçilmesinin ne kadar kritik bir aşama olduğu, tasarım adımlarının her birisinde bu kriterler ile çalışılmasından anlaşılabilir.

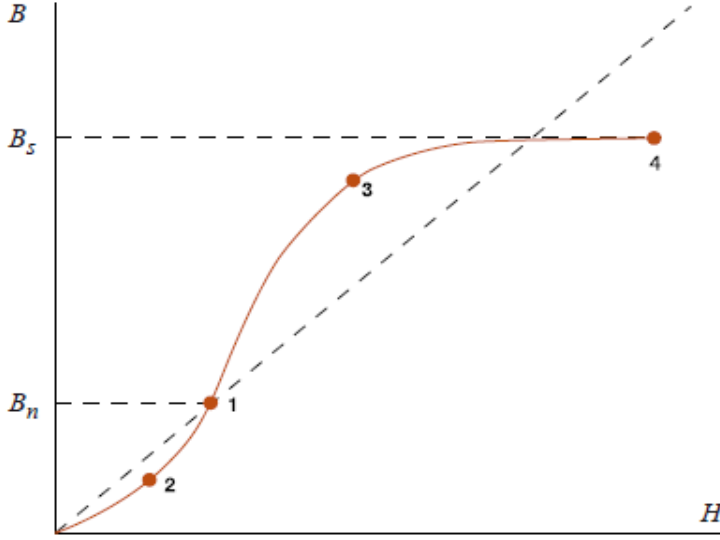
Sekonder nüve olarak kullanılan birden çok malzeme çeşiti mevcuttur. Bu malzemeler;

- M4 & M5
- Mu-metal
- Super Mu-metal
- Nano-crystal

olarak sıralanır [15-21].

Her bir malzemenin kendine özgü B-H karakteristik eğrileri mevcuttur. Manyetik kayıpları arasında farklılıklar vardır. Mu-metal, Super Mu-metal ve Nano-crystal nüveler doyuma

daha çabuk girerler ve manyetik kayıpları en az olan malzemelerdir. Bu özelliklerinden dolayı ölçü sekonderlerinde çoğunlukla kullanılırlar. Maliyetleri yüksektir. Optimum bir akım transformatörü tasarımında öncelikli olarak tercih edilmezler. M4 & M5 nüveler silisli sacdan üretilirler. Nüve çeşitleri içerisinde maliyet performans karşılaştırması en iyi malzemedir. Koruma ve ölçü sekonderlerinin her ikisinde de kullanılabilirler.

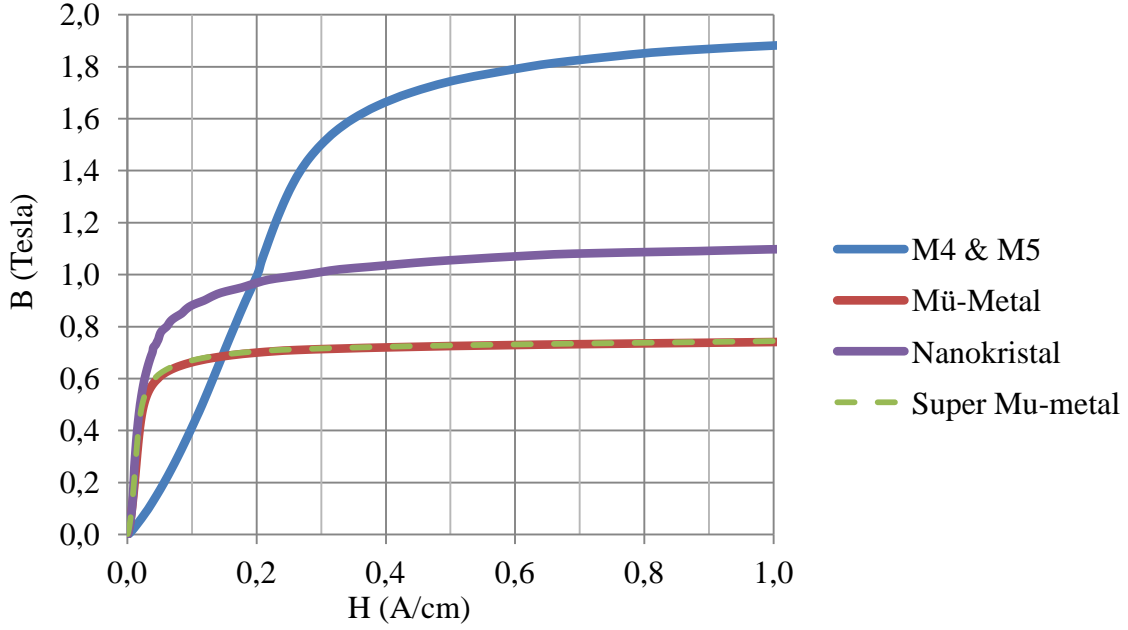


Şekil 4.18. Manyetik bir nüvenin B-H karakteristik eğrisi

Şekil 4.18’de bir manyetik nüvenin B-H karakteristik eğrisi verilmiştir [15]. 3 ile gösterilen nokta nüvenin doyuma girmeye başlağı noktadır. 1 ile gösterilen nokta ise nüvenin lineer bölgeye girmiş olduğı yeri gösterir. Sekonder nüve bu iki çalışma noktası arasında akım çevirme oranını sağlar. 2 ile numaralandırılmış bölge nüvenin kararsız olduğı bölgedir. Bu çalışma noktasında oran ve faz hataları çok yüksek olarak görülür. 4 numaralı bölge ise nüvenin doyum bölgesidir. Bu bölgede transformatör akım dönüştüme oranını yerine getiremez. Böylelikle primerden geçen aşırı yüksek akımları sekonder kısmına iletmez.

Şekil 4.19’da ise akım transformatörlerinin sekonder nüvelerinde kullanılan çeşitli manyetik malzemenin B-H karakteristik eğrileri verilmiştir. Şekilden de görüleceğı üzere, her bir malzemenin doyum noktası ve lineer aralıkları birbirinden farklıdır. Mu-metal ve Super mu-metalden yapılan sekonder nüvelerin manyetik kayıpları oldukça azdır ve

doyum noktaları düşüktür. Bu özelliklerinden ötürü, genellikle doğruluk sınıfı 0.1 ve 0.2 gibi hassas ölçü sekonderlerinde kullanılırlar.



Şekil 4.19. Farklı manyetik malzemelerin B-H grafikleri

Örnek bir akım transformatörü tasarım için nüve kesit hesabı

En yüksek sistem gerilimi : 36 kV

Akım oranı : 300/1-1 A (iki sekonder)

Frekans : 50 Hz

Sekonder sınıf ve yükleri : 0,5FS5 – 15 VA , 5P10 – 30 VA

Standart : IEC 61869-1 ve IEC 61869-2

Kısa devre akımı 25 kA/1 s

Koruma sekonderi için verilen yük değeri 30 VA ve koruma sekonderi sınıfı 5P10'dur. 5P10 sınıfı transformatörün herhangi bir arıza anında primerinden aşırı akım geçtiğinde, nominal primer akımın (300 A) minimum 10 katına kadar akım dönüştürme oranının sağlanması anlamına gelir. Primer akımın 10 katı veya daha fazla (3000 A'den fazla) akım geçtiğinde ise nüvenin doyuma girerek sekondere yüksek akımların geçmesini engellemesi gerekir.

Normal çalışma durumunda,

$$|S| = |Z| |I_S|^2 \quad (4.15)$$

$$|30| = |Z| |1|^2$$

$|Z| = 30$, olarak empedans hesaplanır. Burada $|S|$ görünür güçtür.

Tasarımı yapılan koruma sekonderi primer akımın 10 katına kadar sekonderden çıkış verir. Bu durumda transformatörün primerinden 3000 A geçtiğinde sekonderinden de 10 A akım geçecektir. Primerden 3000 A geçtiği anda;

$$|E| = |I_S| |x| |Z|$$

$$|E| = |10| |x| |30|$$

$$|E| = 300$$

olarak nüvenin doyuma girdiği anda sekonder uçlar arasında oluşacak olan gerilim büyüklüğü hesaplanır.

Bu transformatör 36 kV orta gerilim bir akım transformatörü olduğu için 600 amper-tur değerinde veya buna yakın bir noktada çalışmak uygun olacaktır. Bundan dolayı primer sargıya 2 tur atılır ve sekonder tur sayısında 600 tur olur.

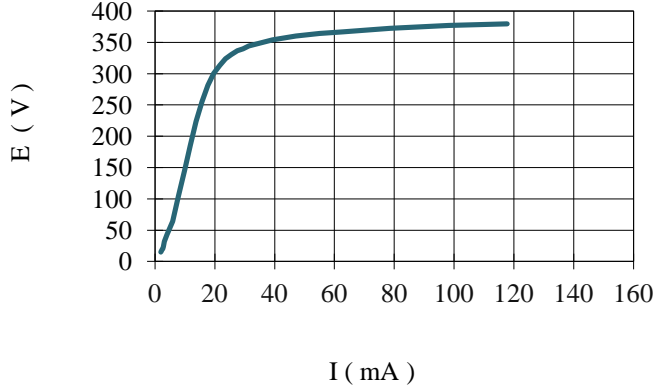
$$E = 4,44 \times f \times N_S \times B \times A_C, \quad B=1.4 \text{ Tesla (M4 \& M5 nüve için)}$$

$$300 = 4,44 \times 50 \times 600 \times 1,4 \times A_C$$

$$A_C = 1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$A_C = 16 \text{ cm}^2$, olarak nüve kesiti bulunur. Nüvenin doyum eğrisi Şekil 4.20'deki grafikte gösterilmiştir.

Aynı akım transformatoründe koruma sekonderi 30 VA yerine 60 VA olarak talep edilir ise, benzer hesaplama yöntemi ile nüve kesiti 32 cm^2 olarak hesaplanır. Buna bağlı olarak sekonder nüve büyüdüğünden, nüve üzerine sarılacak olan tel miktarı da artacağı için akım transformatorünün sekonder maliyeti yaklaşık iki katına kadar çıkacaktır.



Şekil 4.20. Örnek tasarım koruma sekonderi için nüve doyum eğrisi

Çizelge 4.17. Farklı yükler için kullanılan malzeme miktarının karşılaştırılması-1

5P10 – 30 VA Koruma Sekonderi	5P10 – 60 VA Koruma Sekonderi
5,5 kg nüve	10,5 kg nüve
0,9 kg bakır tel	1,2 kg bakır tel

Ölçü sekonderinin yük değeri 15 VA ve ölçü sekonder sınıfı 0.5FS5'dir. 0.5FS5 sınıfı, doyma katsayısından dolayı primer akımın 5 katına kadar akım çevirme oranını sağlar. Bu değerden sonra nüve doyuma girer ve yüksek akımları sekondere yansıtmaz. Böylece ölçü cihazlarının zarar görmesi engellenmiş olur.

Normal çalışma durumunda empedans değerinin hesaplanması sonucu,

$$|S| = |Z|x|I_S^2|$$

$$|15| = |Z|x|1^2|$$

$|Z| = 15$, değeri elde edilir.

Tasarımı yapılan ölçü sekonderi primer akımın maksimum 5 katına kadar sekonderden çıkış verir. Bu durumda transformatörün primerinden 1500 A geçtiğinde sekonderinden de 5 A akım akar. Primerden 1500 A geçtiğinde ölçü sekonderi doyuma girdiği anda üzerindeki gerilim,

$$|E| = |I_s| \times |Z|$$

$$|E| = |5| \times |15|$$

$$|E| = 75$$

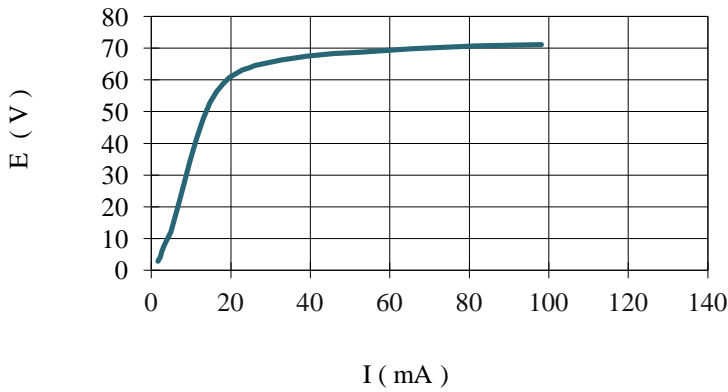
olarak hesaplanır.

$$E = 4,44 \times f \times N_s \times B \times A_C, B=1.4T \text{ (M4 \& M5 nüve için)}$$

$$75 = 4,44 \times 50 \times 600 \times 1,4 \times A_C$$

$$A_C = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_C = 4 \text{ cm}^2$$



Şekil 4.21. Örnek tasarım ölçü sekonderi için nüve doyum eğrisi

Ölçü sekonderi için hesaplanan bu değer maksimum nüve kesiti değeridir. Standart ölçü sekonderi için emniyet katsayısının (örnek için FS5) altında bir noktada sekonderin

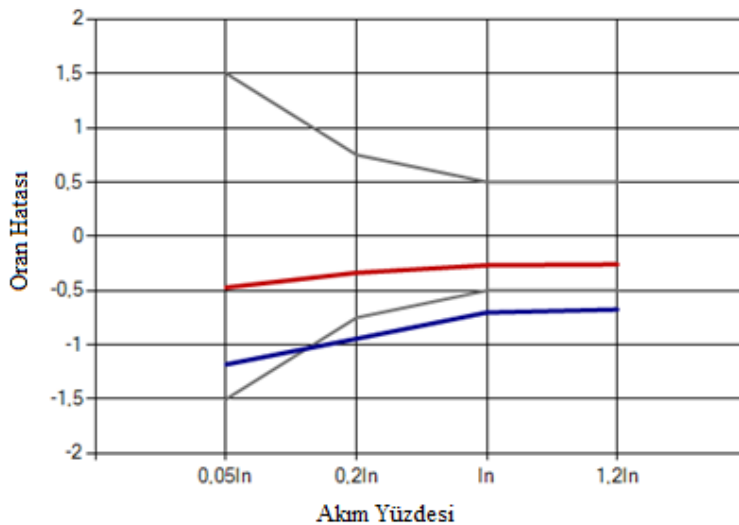
doyma girmesini istediği için bu nüve kesitinin biraz altında bir nüve kullanmak uygun olur. 3 cm²'lik bir nüve kullanıldığında ölçü sekonderi için nüvenin doyma eğrisi Şekil 4.21'de olduğu gibi elde edilir. Şekil 4.21'de görüldüğü gibi nüve 75 V doyma geriliminin altında, yaklaşık 60 V civarında doyma girmiştir.

Aynı akım transformatöründe ölçü sekonderi 15 VA yerine 30 VA olarak talep edilir ise, benzer hesaplama yöntemi ile nüve kesiti 8 cm² olarak hesaplanır. Buna bağlı olarak sekonder nüve büyüdüğünden, nüve üzerine sarılacak olan tel miktarı da artacağı için akım transformatörünün sekonder maliyeti yaklaşık iki katına kadar çıkacaktır.

Çizelge 4.18. Farklı yükler için kullanılan malzeme miktarının karşılaştırılması-2

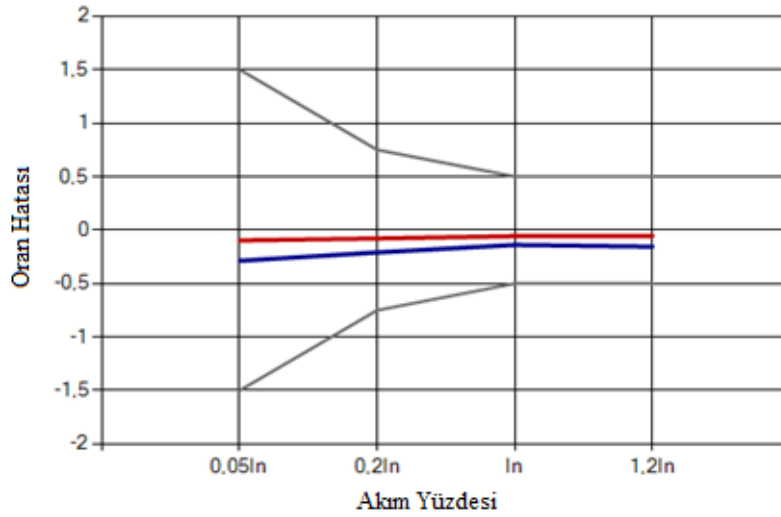
0.5FS5 – 15 VA Ölçü Sekonderi	0.5FS5 – 30 VA Ölçü Sekonderi
0,9 kg nüve	1,75 kg nüve
0,5 kg bakır tel	0,8 kg bakır tel

Ölçü sekonderi için diğer önemli nokta hesaplanan bu nüve kesitinin talep edilen 0,5 sınıfını sağlayıp sağlayamadığıdır. Yapılan nüve kesiti hesaplamaları M4 & M5 nüveye göre hesaplanan kesittir. Sekonder sınıf hesaplaması için transformatör tasarımı ve üretimi yapan şirketler çeşitli programlar kullanmaktadır. Elektra, CT Core Design programları bunlardan bazılarıdır. Emek Elektrik End. A.Ş.'inde kullanılan CT Core Design programına hesaplanan veriler girildiğinde Şekil 4.22'deki sınıf grafiği elde edilmiştir.



Şekil 4.22 M4 & M5 nüve kullanıldığında ve 600 AT'da ölçü sekonderi sınıf grafiği

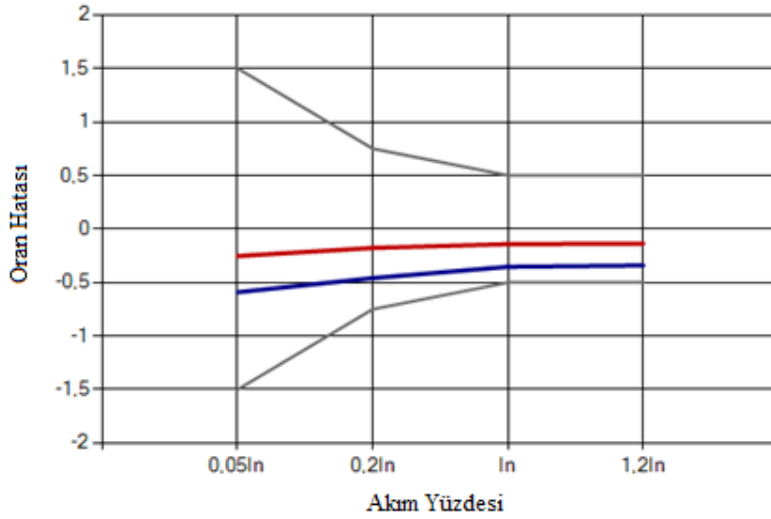
IEC standartlarına göre akım transformatöründe 0,5 ölçü sınıfları için maksimum oran hatası, tam yük ve çeyrek yük için gri aralığın içerisinde olmalıdır. Tasarımda kullanılan M4 & M5 nüve ile tam yük (mavi çizgi) ile çeyrek yük (kırmızı çizgi) arasındaki fark $\pm 0,5$ 'tir, yani 1'den küçüktür, fakat tam olarak istenilen aralığa girmemektedir. Bu durumda ölçü sekonderini istenilen aralık içerisine sokmanın yollarından biri daha az kayıpla çalışan bir nüve kullanmaktır. Mu-metal ve süper mu-metal nüvelerin manyetik kayıpları daha az olduğu için aynı kesitte bir mu-metal kullanıldığında Şekil 4.23'teki sınıf grafiği elde edilir.



Şekil 4.23. Mu-metal nüve kullanıldığında ve 600AT'de ölçü sekonderi sınıf grafiği

Şekil 4.23'te yer alan grafikten görüleceği üzere kullanılan nüve çeşidini değiştirerek daha az manyetik kayıpları olanı kullanıldığında talep edilen sınıf değeri sağlanabilmektedir.

Bir diğer yöntem ise kullanılan nüve çeşidini değiştirmeden sekondere atılan tur sayısını değiştirmektir. Akım transformatörlerinde yüksek amper-tur değerlerinde çalışıldığında talep edilen sınıf değerleri daha kolay şekilde sağlanabilir. Düşük amper tur değerlerinde nüve B-H karakteristik eğrisinin aşağı bölgelerinde çalıştığı için bu bölgelerde daha çok hata oranı vermektedir. Optimum çalışma noktası transformatörün boyut, maliyet gibi sınırları göz önünde bulunarak belirlenmelidir. Sekondere 600 tur yerine 900 tur atıldığında gerekli olan nüve kesiti $2,67 \text{ mm}^2$ olarak hesaplanır. Bu durumda primere de 2 tur yerine 3 tur atılacağını ve transformatör boyutunun artacağı göz ardı edilmemelidir. Bu kesitte bir nüveye 900 tur atıldığında sınıf eğrisi Şekil 4.24'te görüldüğü gibi elde edilir.



Şekil 4.24. M4 & M5 nüve kullanıldığında 900 AT’da ölçü sekonderi sınıf grafiği

Bu durumda daha küçük bir kesitte nüve kullanılıp daha fazla sekonder tur atılarak istenilen sınıfın sağlanabildiği görülmektedir. Akım transformatörlerinde ölçü ve koruma sınıfları için aynı nüve kesit hesaplama yöntemi ile kullanılması gereken minimum veya maksimum nüve kesitleri hesaplanabilir. Kullanılacak nüve kesitini azaltmak için sekondere atılacak olan tur sayısı artırılabilir. Bu durumda kullanılacak bakır tel miktarının artacağını göz ardı etmeden, tasarlanacak olan transformatörün maliyeti de göz önünde bulundurulmalıdır. Koruma sekonderleri için sadece nüvenin doyma noktası önemli iken, ölçü sekonderlerinde nüvenin doyma noktasının yanı sıra talep edilen sınıf aralığını da sağlaması gerekir. Hesaplanan kesitteki nüve çeşidi sınıfı sağlamıyor ise, sekonder tur sayısını değiştirerek veya kullanılacak nüve çeşidini daha az manyetik kayıpları olan nüveler ile değiştirerek talep edilen sınıf sağlanabilir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada akım transformatörleri ve akım transformatörlerinin tasarım kriterleri hakkında bilgi verilerek IEC standartlarına uygun olarak, bu transformatörlerin tasarımı yapılmaya çalışılmıştır. Akım ölçü transformatörleri enerjinin ölçülmesinde ve bunun yanında sistemin güvenliğinin sağlanmasında çok kritik bir öneme sahiptir.

Akım transformatörü tasarımında en önemli kriterler IEC 61869-1 ve IEC 61869-2 ölçü transformatörleri genel ve akım transformatörü standartlarında tanımlanmıştır. Ülkemizde şalt sahalarda, enerji sistemlerinde kullanılan akım ölçü transformatörleri Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi (TEDAŞ) ve Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EUAŞ) gibi kamu kuruluşlarının yanı sıra özel enerji şirketleri tarafından kullanılmaktadır. Akım transformatörlerinin tasarım kriterleri, sadece tasarım yapıp üreten firmalar tarafından değil, öncelikli olarak akım transformatörü talep eden kuruluşlar tarafından ayrıntılı olarak incelenmelidir. İhtiyaçlar gerekli ölçülerde bu kriterler göz önünde bulundurularak belirlenmeli ve en doğru akım transformatörü parametreleri belirlenmelidir. Bu çalışmada akım transformatörü tasarım kriterlerinin, transformatörün tasarımını, maliyetini ve boyutunu nasıl değiştirdiği ayrıntılı olarak incelenmiştir. Gereğinden fazla seçilen yük değerleri akım transformatörünün gerçek verimliliğinde ve doğru şekilde çalışmasını engeller. Standartta akım transformatörünün doğruluk sınıflarının, nominal yükün %25 ve %100'ü arasında sağlanacağı belirtilmiştir. Anma yükünün, gerçek yükün dört katından fazla seçildiği durumlarda akım transformatörünün tamamen yanlış ölçümler yapmakta olduğu gözlemlenmiştir.

Frekans ve en yüksek sistem gerilimi, standartta verilen tablolardan ihtiyaca uygun olarak belirlenmeli ve mümkün olduğunca standartta yer alan değerlerin dışına çıkılmamalıdır. Standart dışı seçilen her değer akım transformatörünün maliyetini ve boyutunu artıracaktır. Ölçü sekonderleri doğruluk sınıfları seçilirken sistem özellikleri ayrıntılı olarak incelenmelidir. Doğru ölçü sınıfının belirlenmesi enerjinin üretimi ve tüketiminin en doğru şekilde ölçülmesine de katkı sağlayacaktır. Koruma sekonderlerinin doğruluk sınıfları belirlenirken röle karakteristikleri çalışmalıdır. Akım transformatörleri enerjinin ölçümünün yanı sıra sistemin güvenliğini de garanti altına almalıdır. Herhangi bir kısa

devre oluşması durumunda, sistemde bulunan diğer cihazların zarar görmesini engellemek ve güvenliğini sağlamak için koruma sekonderleri röleler vasıtası ile kesicilere ve ayırıcılara sinyal göndererek sistemin korunmasını sağlamaktadır.

Akım transformatörünün tasarım kriterleri belirlendikten sonra tasarım aşamasında transformatörün aktif kısmının sargı diagramları ve kesit hesaplamaları yapılmıştır. Tasarımı en kolay ve üretimi en az maliyetli akım transformatörleri tek oranlı akım transformatörleridir. Fakat kullanışlı oluşu ve birden fazla akım oranını aynı anda sağladığı için çok oranlı akım transformatörleri çoğunlukla tercih edilir. Çok oranlı akım transformatörlerinde sargı diagramı mümkünse primer tepli olarak tasarlanmalıdır. Bu şekilde sekonderde yalnızca tek bir amper-turda çalışılır ve sekonder kısımda talep edilen yük ve doğruluk sınıfı yalnızca tek amper-tur için sağlanarak yapılabilir. Aksi durumda sekonderde birden fazla amper-turda çalışılır ve sekonder kısımda talep edilen doğruluk sınıfı ve yük karşılanamayabilir.

Sekonder kısımda doğruluk sınıfı ve yüklerin sağlanabilmesi için birden fazla parametrede değişiklik yapılabilir. En çok kullanılan ve maliyet olarak en ucuz manyetik nüve malzemesi M4 & M5 nüvelerdir. Fakat bu nüveyi kullanarak talep edilen sınıf ve yükler sağlanamayabilir. Bu durumda kullanılan nüve çeşidi, kayıpları daha az olan süper mu-metal, mu-metal veya nanokristal nüveler kullanılarak sağlanabilir. Bir diğer yöntem ise çalışma amper-tur değerini yükseltmektir. Manyetik nüvenin en iyi çalıştığı bölgeler lineer aralıktır. Düşük amper-tur değerlerinde daha az bakır iletken kullanılır, fakat bu durumda lineer aralıktan uzaklaşıldığı için akım çevirme oranında hatalar artar. Çalışma amper-tur değeri artırıldığında da talep edilen sınıf ve yük değerleri sağlanabilir. Amper-tur değeri artırıldığında transformatörün boyutlarının ve maliyetinin artacağı da göz ardı edilmemelidir. Tüm bu tasarım kriterleri ve tasarım yöntemleri göz önünde bulundurularak talep edilen teknik özelliklere uygun en optimum tasarım gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

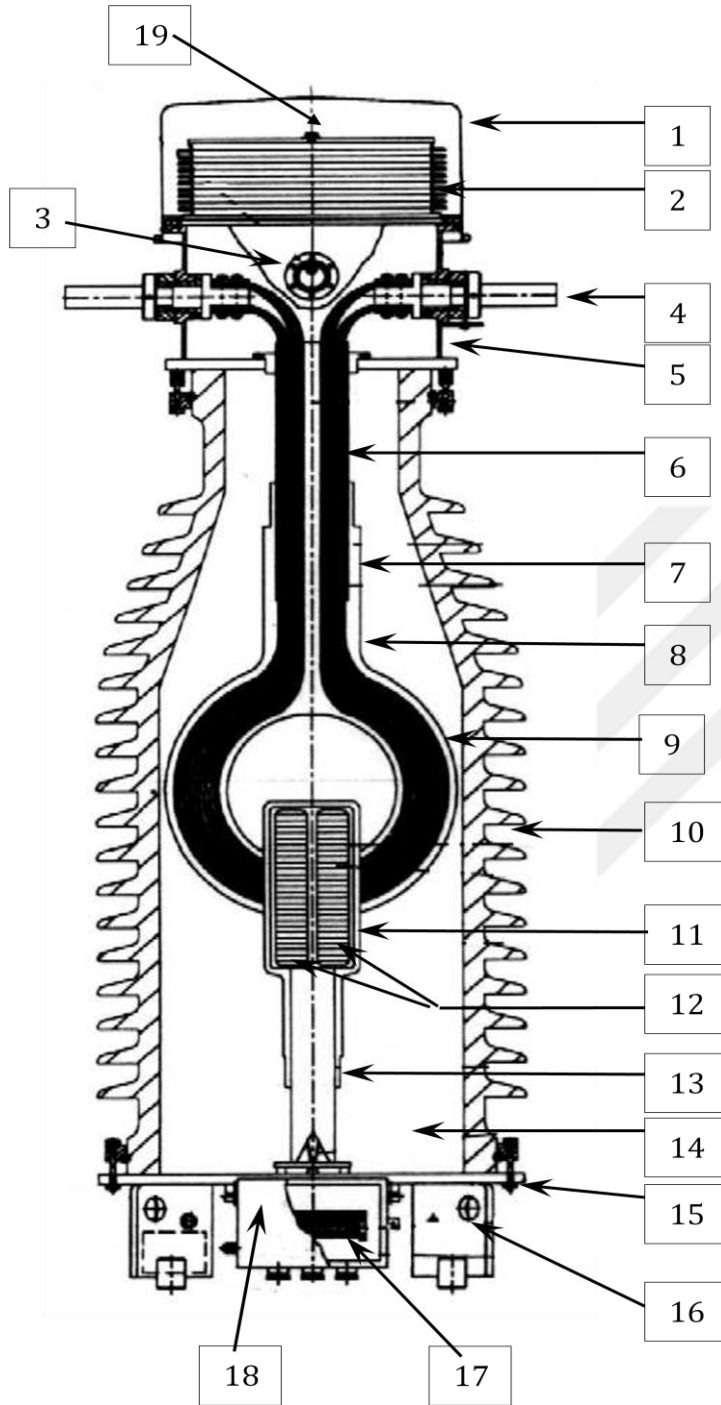
1. Eliş, G. (2012). *Akım ve Gerilim Ölçü Transformatörlerinin Dünya’da ve Türkiye’de Teknolojik ve Ekonomik Yeri*, Dünya Enerji Konseyi-Türk Milli Komitesi 12. Türkiye Enerji Kongresi, Ankara.
2. Yıldırım, A. (2011). *Üç Fazlı Sistemlerde Komşu Faz Akımlarının Akım Ttransformatörlerinde Hata Değerlerine Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
3. Çınar, H. (2016). *Ölçme Esaslı Akım Ttransformatörlerinde Çalışma Bölgesi ve Kararlılık Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
4. Apay, F.T. (2008). *Güç Kalitesi Parametrelerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
5. T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. (2011). *Elektrik-Elektronik Teknolojisi Ölçü Transformatörleri*, Ankara.
6. International Electrotechnical Commission (2007). *Instrument Transformers - Part-1:General Requirements, IEC 61869-1:2007*, Geneva, Switzerland.
7. Elektrik Üretim, İletim Ve Dağıtım Teknik Komitesi (2013). *Ölçü transformatörleri – Bölüm-1:Genel Kurallar, TS EN 61869-1*, Ankara.
8. ABB (2004). *Instrument Transformers Application Guide*, Ludvika, Sweden.
9. ABB (2004). *Instrument Transformers Technical Information and Application Guide*, Ludvika, Sweden.
10. International Electrotechnical Commission (2003). *Instrument transformers- Current transformers, IEC 60044-1:2003*, Geneva, Switzerland.
11. Elektrik İhtisas Grubu (2004). *Ölçü transformatörleri – Bölüm 1:Akım transformatörleri, TS 620 EN 60044-1*, Ankara.
12. International Electrotechnical Commission (2012). *Instrument Transformers - Part-2 : Additional requirements for current transformers, IEC 61869-2:2012*, Geneva, Switzerland.
13. Elektrik Üretim, İletim Ve Dağıtım Teknik Komitesi (2013). *Ölçü transformatörleri - Bölüm 2 : Akım transformatörleri için ek kurallar, TS EN 61869-2*, Ankara.
14. Kim, Y.S. (2015). Electromotive force characteristics of current transformer according to the magnetic properties of ferromagnetic core, *Transactions on Electrical and Electronics Materials*.
15. Aguilera, S., Odier, P. and Ruffieux, R. (2013). *Magnetic materials for current transformers*, International Beam Instrumentation Conference, Oxford, United Kingdom.

16. Olivares-Galvan, J. C., Georgilakis, P. S., Campero-Littlewood, E. and Escarela-Perez, R. (2012). Core lamination selection for distribution transformers based on sensitivity analysis, *Springer-Verlag*.
17. Unser K. (1969). *Beam Current Transformer with DC to 200 MHz Range*, Particle Accelerator Conference, Washington D.C., USA.
18. GE Digital Energy-ITI (2014). *Instrument Transformer Basic Technical Information and Application*, Florida, USA.
19. Artech (2013). *Current Transformers Oil-Paper Insulation Gas Insulation Dry Insulation*, USA.
20. Tören, M. ve Çelebi, M. (2016). *Kuru Tip Transformatörlerde Nüve Materyallerinin Verime Etkisi*, Eleco Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa.
21. Anigi, E., Karacasu, Ö. ve Hocaoglu, M.H. (2012). *Ölçü Akım Transformatörlerinin Doğruluğunun Sinüzoidal Olmayan Şartlar Altında Deneysel İncelenmesi*, Eleco Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa.



EKLER

EK-1. Bushing tipi akım transformatörünün yapısı

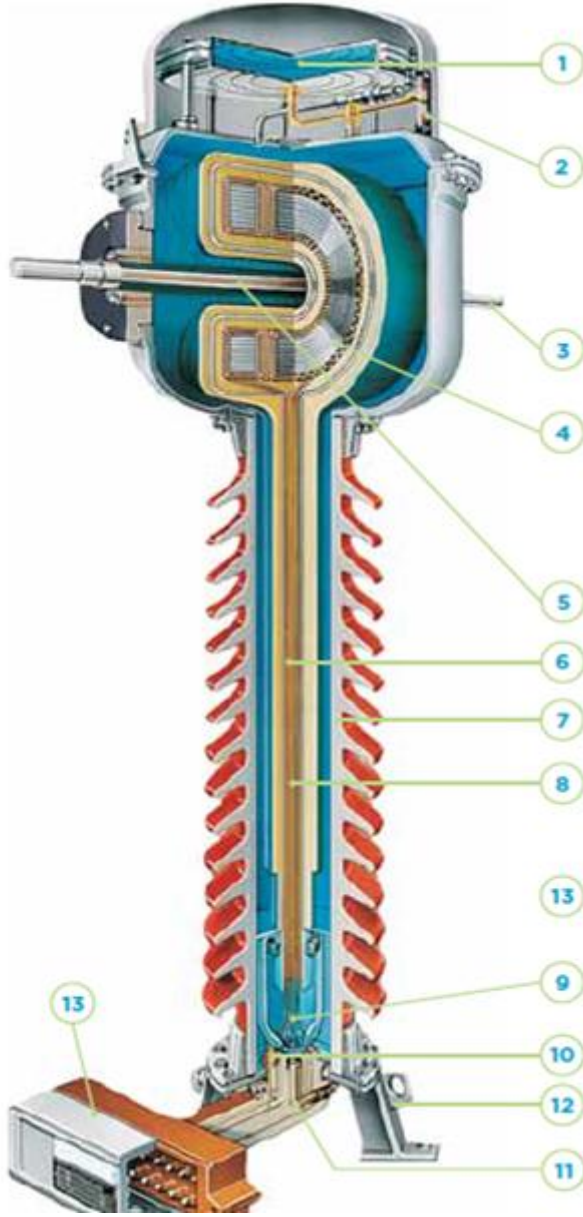


Şekil 1.1. Yüksek gerilim bushing akım transformatörü yapısı

EK-1. (devam) Bushing tipi akım transformatörünün yapısı

1. Yağmur Şapkası
2. Çelik Körük
3. Yağ Gösterge Camı
4. Primer Terminaller
5. Aliminyum Kafa
6. Primer Bakır İletkenler
7. Primer Tüp (Mekanik kuvvetle karşısında koruma için)
8. Primer Kağıt İzolasyon
9. Primer Sargılar
10. Porselen İzolatör
11. Sekonder Kağıt İzolasyon
12. Sekonder Sargılar
13. Sekonder Ayak
14. İzolasyon Yağı
15. Kaide
16. Kaldırma Delikleri (Nakliye için)
17. Sekonder Terminaller
18. Yağ Numunesi Alma Vanası
19. Yağ Doldurma Vanası

EK-2. Kafa tipi akım transformatörünün yapısı

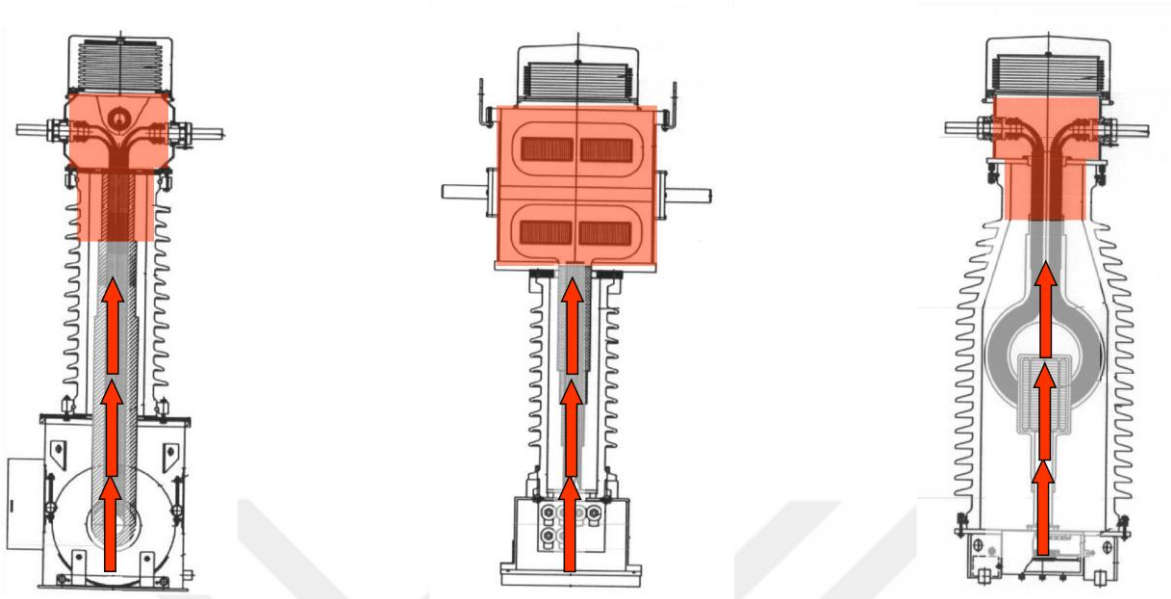


Şekil 2.1. Yüksek gerilim kafa tipi akım transformatörü yapısı

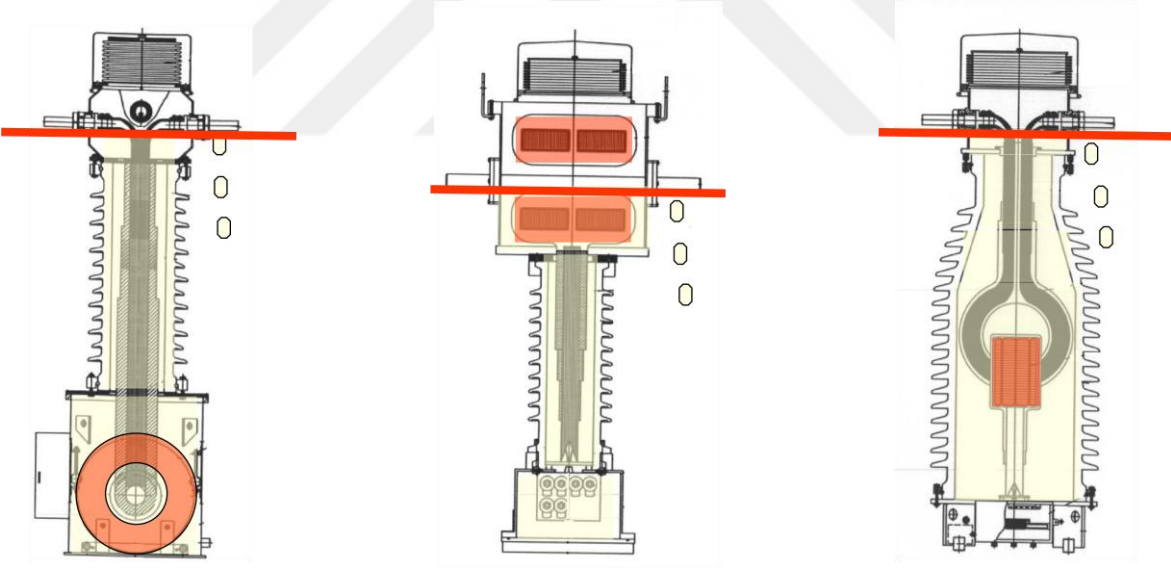
EK-2. (devam) Bushing tipi akım transformatörünün yapısı

1. Çelik Körük
2. Yağmur Şapkası
3. Primer Terminaller
4. Sekonder Sargılar
5. Primer Sargılar
6. Sekonder İletkenler
7. İzolatör
8. Kapasitif Bushing
9. Topraklama Bağlantısı
10. Yağ Numunesi Alma Vanası
11. Tanjant Delta Tepi
12. Topraklama Terminali
13. Sekonder Terminal Kutusu

EK-3. Yüksek gerilim akım transformatörlerinin karşılaştırılması

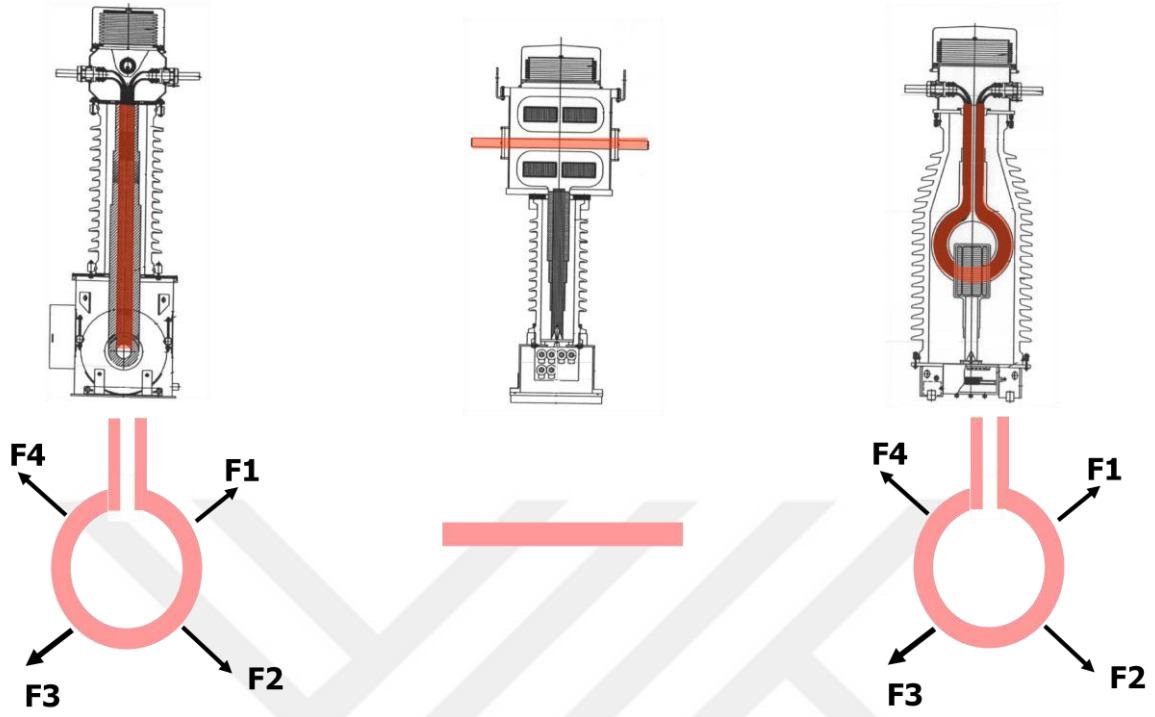


Şekil 3.1. Kazan tipi, kafa tipi ve bushing tipi akım transformatörlerinin sıcak bölgeleri



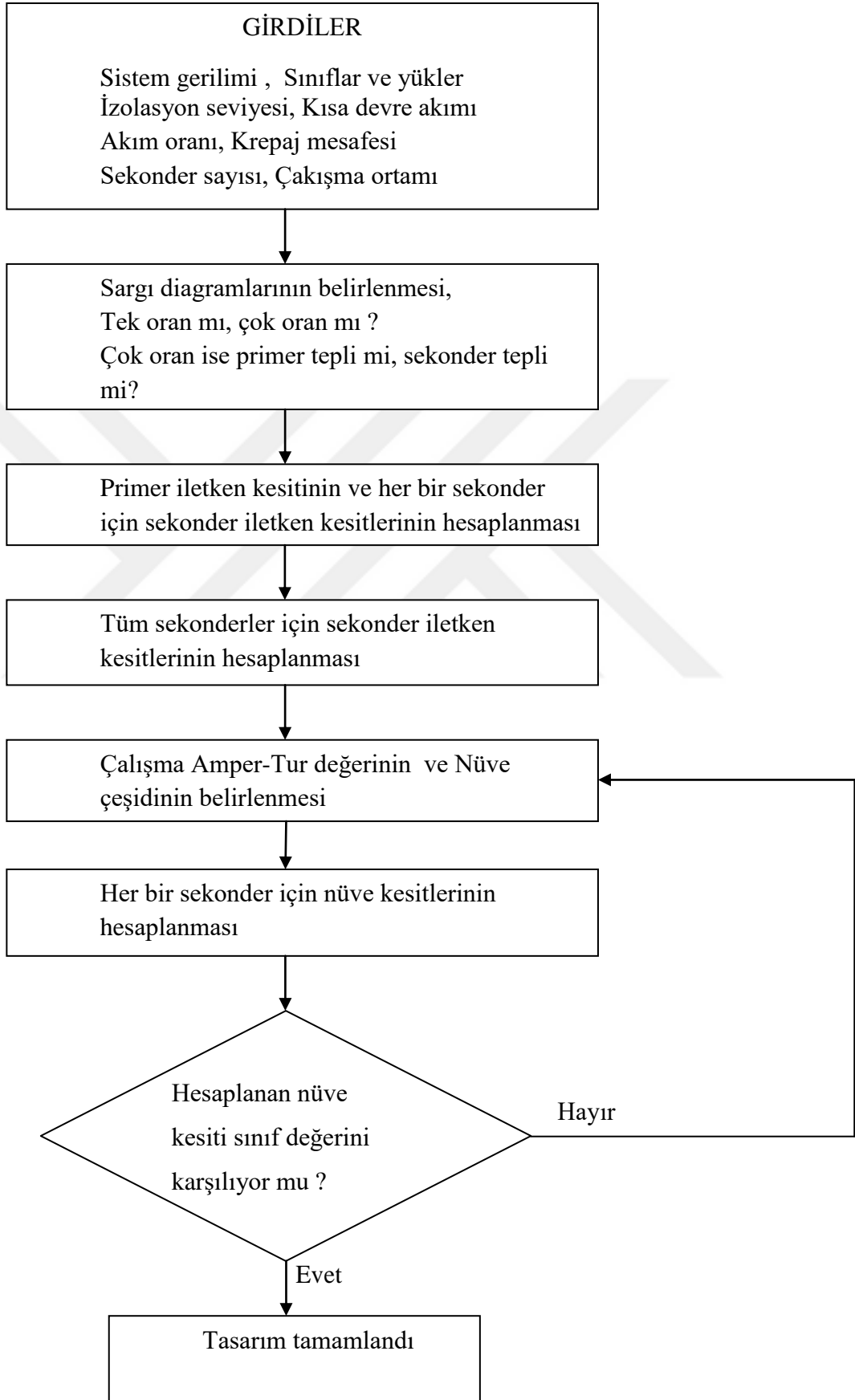
Şekil 3.2. Kazan tipi, kafa tipi ve bushing tipi akım transformatörlerinin yağ kayıp bölgeleri

EK-3.(devam) Yüksek gerilim akım transformatörlerinin karşılaştırılması



Şekil 3.3. Kazan tipi, kafa tipi ve bushing tipi akım transformatörlerine etki eden mekanik kuvvetler

EK-4. Akım transformatörü tasarım akış şeması



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EKİZ, Yusuf Kürşat
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 24.09.1991, Çankırı
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (553) 859 57 10
e-mail : kursatekiz_06@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik Elektronik Müh.	-
Lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik Elektronik Müh.	2014
Lise	Pursaklar Ayyıldız Anadolu Lisesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Devam	Aselsan	Tasarım Mühenssi
2014-2017	Emek Elektrik End. A.Ş.	Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayımlar

-

Hobiler

Yüzme, futbol ve amatör fotoğrafçılık



GAZİ GELECEKTİR..