

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖLÇÜ TRANSFORMATÖRLERİNİN BOYUTLANDIRILMASI
İÇİN YAZILIM ARACI GELİŞTİRİLMESİ

MEHMET GEZER

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖLÇÜ TRANSFORMATÖRLERİNİN BOYUTLANDIRILMASI
İÇİN YAZILIM ARACI GELİŞTİRİLMESİ

MEHMET GEZER

Prof. Dr. Bora ALBOYACI
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Prof.Dr. Nuran YÖRÜKEREN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Gürsu TEKDEMİR
Jüri Üyesi, Bursa Teknik Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.01.2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza

Mehmet GEZER

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

İmza

Mehmet GEZER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, ölçü transformatörlerinin doğru seçimi için uluslararası standartlar çerçevesinde dikkate alınması gereken yönergeler derlenmiştir. Ölçü transformatörlerinin seçim süreçlerini daha standart ve otomatik hale getirmek için bir araç geliştirilmiştir.

Bu tezin hazırlanması süresince yönlendirmelerini esirgemeyen kıymetli hocam Prof. Dr. Bora ALBOYACI'ya teşekkür ederim. Ayrıca her zaman sevgilerini hissettiren ve sabırla destekleyen aileme sonsuz sevgilerimi sunarım.

Ocak-2025

Mehmet GEZER



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖLÇÜ TRANSFORMATÖRLERİ.....	4
2.1. Manyetik Devre.....	5
2.2. Akım Transformatörleri.....	5
2.2.1. Akım Transformatörünün Elektriksel Devresi	6
2.2.2. Kullanım Amacına ve Sınıflarına Göre Akım Transformatörleri.....	7
2.2.2.1. Ölçü Akım Transformatörleri.....	8
2.2.2.2. Koruma Akım Transformatörleri.....	9
2.2.3. Fiziksel Yapısına ve Teknolojisine Göre Akım Transformatörleri	10
2.2.3.1. Rogowski Bobini Akım Transformatörleri	10
2.2.3.2. Fiber Optik Manyetik Akım Sensörleri	11
2.3. Gerilim Transformatörleri	12
2.3.1. Kullanım Amacına ve Sınıflarına Göre Gerilim Transformatörleri.....	12
2.3.1.1. Ölçü Gerilim Transformatörleri.....	13
2.3.1.2. Koruma Gerilim Transformatörleri	13
2.3.2. Fiziksel Yapısına ve Teknolojisine Göre Gerilim Transformatörleri	13
3. ÖLÇÜ TRANSFORMATÖRLERİNİN SEÇİMİ	15
3.1. Ölçü Transformatörünün Tipi	15
3.2. Anma Yalıtım Seviyesi.....	15
3.3. Anma Primer Akımı/Gerilimi.....	16
3.4. Anma Sekonder Akım/Gerilimi	16
3.5. Sürekli Termik Anma Akımı/Anma Gerilim Faktörü	16
3.6. Kısa Süreli Akım(Ith) & Dinamik Akım(Idyn)	17
3.7. Çekirdek Sayısı	17
3.8. Güç(Sn)&Doğruluk Sınıfı	17
3.9. Aşırı Akım Doyma Katsayısı&Ölçü Emniyet Katsayısı (ALF&Fs).....	17
4. AKIM TRANSFORMATÖRLERİNİN SEÇİMİ	19
4.1. Ölçü Sınıfı Akım Transformatörü.....	19
4.2. Koruma Sınıfı Akım Transformatörü.....	20
4.2.1. Aşırı Akım Koruma.....	22
4.2.2. Düşük Empedans Diferansiyel Koruma	24
4.3. Geçici Rejim Analizi ile Akım Transformatörü seçiminin Önemi	26
5. AKIM TRANSFORMATÖRÜ SEÇİMİ ARACI.....	31
5.1. Yazılım Ara Yüzü	31
5.2. Hesaplama Şablonları.....	34
5.3. Python Yazılım Dili Hakkında.....	38
6. BENZER YAZILIMLAR.....	39

7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	40
KAYNAKLAR.....	42
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	44
ÖZGEÇMİŞ.....	45



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Temel manyetik devre	5
Şekil 2.2. Akım transformatörü eşdeğer devresi	6
Şekil 2.3. Testten elde edilen sekonder manyetizasyon karakteristiği eğrisi	7
Şekil 2.4. Manyetizasyon karakteristiği eğrisinden elde edilen uyarma reaktansı	7
Şekil 2.5. Rogowski bobini ve indüktif akım transformatörü doğrusallığı	11
Şekil 2.6. Faraday etkisi	11
Şekil 2.7. Gerilim transformatörü yapısı	12
Şekil 2.8. Kapasitif gerilim transformatörü yapısı	14
Şekil 4.1. Düz zaman karakteristiği	23
Şekil 4.2. Ters zaman karakteristiği	23
Şekil 4.3. Ters ve düz zaman bileşke karakteristiği	23
Şekil 4.4. Geçici rejim analizleri için kullanılan şebeke ve akım transformatörleri	27
Şekil 4.5. Farklı R_w sekonder devre empedanslarına sahip akım transformatörü akımları ve ideal akım($R_{wAT1}=0,5\Omega$, $R_{wAT2}=5\Omega$)	28
Şekil 4.6. Farklı R_w sekonder devre empedanslarına sahip akım transformatörü akımlarının aşırı akım koruma fonksiyonu açma süreleri üzerindeki etkisi($R_{wAT1}=0,5\Omega$, $R_{wAT2}=5\Omega$)	29
Şekil 4.7. Farklı X/R oranları için AT1 ve ideal akım ölçümü arasındaki akım farkı	30
Şekil 5.1. Yazılım arayüzü	31
Şekil 5.2. Yazılım “Dosya” ve “Hakkında” menüsü	32
Şekil 5.3. Yeni proje dosyası oluşturma veya dosya açma	32
Şekil 5.4. Yeni çekirdek ekleme	33
Şekil 5.5. Veri görüntüleme penceresi	34
Şekil 5.6. Ölçme çekirdeği hesaplama şablonu	35
Şekil 5.7. ABB Relion serisi röle aşırı akım koruma hesaplama şablonu	36
Şekil 5.8. ABB Relion serisi röle trafo diferansiyel koruma hesaplama şablonu	37

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. IEC 61869 standart dizisi	4
Tablo 2.2. Ölçü sınıfı akım trafoları için oran hatası sınırları	8
Tablo 2.3. Koruma sınıfı akım trafoları grupları	9
Tablo 2.4. Koruma sınıfı akım trafoları için hatası sınırları.....	10
Tablo 2.5. Ölçü sınıfı gerilim trafoları için hatası sınırları	13
Tablo 2.6. Koruma sınıfı gerilim trafoları için hatası sınırları	13
Tablo 3.1. Ölçü transformatörleri için anma yalıtım seviyeleri	16
Tablo 4.1. Uygulama önerileri.....	20



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ALF	: Doğruluk sınır faktörü
ALF'	: Düzeltilmiş sınır faktörü
E_k	: AT diz gerilim seviyesi(Volt)
F_s	: Anma ölçü emniyet katsayısı
F_s'	: Düzeltilmiş ölçü emniyet katsayısı
I_a	: Arıza akımı(Amper)
I_{dyn}	: Akım transformatörü dinamik akımı (Amper)
I_E	: Uyarma akımı (Amper)
I_P	: Primer akımı (Amper)
I_S	: Sekonder akımı (Amper)
I_{ST}	: Sekonder toplam akımı (Amper)
I_{th}	: Akım transformatörü anma kısa süre akımı (Amper)
K_{td}	: Geçici rejim(Transient) boyutlandırma faktörü
N_2/N_1	: Dönüştürme oranı
R_E	: Uyarma direnci (Ω)
$R_{yük}/R_w$	: Ölçü devresi direnci(Ω)
S_{at}	: Akım transformatörü iç kaybı (Voltamper)
S_F	: Güvenlik faktörü
S_n	: Ölçü transformatörü gücü (Voltamper)
$S_{yük}$	: Ölçü devresi yükü (Voltamper)
V_b	: Sekonder terminal gerilimi (Volt)
V_s	: Sekonder uyarma gerilimi (Volt)
Z_B	: Yük empedansı (Ω)
X_s	: Sızıntı reaktansı (Henry)
μ_r	: Manyetik geçirgenliği

Kısaltmalar

AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
AT	: Akım Transformatörü
CVT	: Capacitive Voltage Trasformer(Kapasitif Gerilim Transformatörü)
DC/DA	: Direct Current (Doğru Akım)
GT	: Gerilim Transformatörü
Hz	: Hertz
IEC	: Iternational Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
GIS	: Gas Insulated System(Gaz İzoleli Sistem)

ÖLÇÜ TRANSFORMATÖRLERİNİN BOYUTLANDIRILMASI İÇİN YAZILIM ARACI GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Ölçü transformatörleri, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımında temel bir rol oynamaktadır. Geleneksel yöntemlerde kullanılan akım ve gerilim ölçme transformatörleri, IEC standartlarına uygun olarak seçilmelidir. Bu standartlar, ölçü ve koruma fonksiyonları için farklı doğruluk sınıflarını ve performans gereksinimlerini tanımlar. Seçimde dikkate alınması gereken faktörler arasında ölçü transformatörünün tipi, anma yalıtım seviyesi, anma primer akımı/gerilimi, anma sekonder akımı/gerilimi, sürekli termik anma akımı, anma kısa süre akımı, çekirdek sayısı, güç/doğruluk sınıfı ve aşırı akım doyma katsayısı/ölçü emniyet katsayısı bulunmaktadır. Ayrıca, farklı koruma fonksiyonları için özel gereksinimler belirlenmiş ve bu fonksiyonlara uygun olarak akım transformatörleri seçilmelidir. Bu bağlamda, akım transformatörlerinin doğru seçimi, elektrik sistemlerinin güvenilirliği ve verimliliği için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, IEC standartlarına göre ölçü transformatörlerinin seçimi hakkında temel kriterlere ve önerilere yer verilmiş ve bu kriterlere göre ölçü transformatörünün seçimi için bir araç geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akım Transformatörlerinde Doyma, Akım Transformatörü Seçimi, IEC 61869, Ölçme ve Koruma Sistemleri, Ölçü Transformatörleri.

DEVELOPMENT A SOFTWARE TOOL FOR DIMENSIONING INSTRUMENT TRANSFORMERS

ABSTRACT

Instrument transformers play a fundamental role in the transmission and distribution of electrical energy. Current and voltage transformers used in conventional methods must be selected in compliance with IEC standards, which define various accuracy classes and performance requirements for both measurement and protection functions. Key factors to consider during the selection process include the type of instrument transformer, rated insulation level, rated primary current/voltage, rated secondary current/voltage, continuous thermal current rating, rated short-time current, number of cores, power/accuracy class, and saturation factor/measurement safety factor. Additionally, specific requirements are established for different protection functions, and current transformers should be selected accordingly. In this context, the proper selection of current transformers is critical for ensuring the reliability and efficiency of electrical systems.

In this study, fundamental criteria and recommendations for the selection of measurement transformers based on IEC standards have been outlined, and a tool has been developed for selecting measurement transformers according to these criteria.

Keywords: Current Transformer Saturation, Current Transformer Sizing, IEC 61869, Measurement and Protection Systems, Instrument Transformers.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımı için birçok ölçme, kontrol ve koruma sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemlerin çalışması için temel elektrik parametreleri olan akım ve gerilim bilgilerinin ölçümü her daim gerekli olmuştur. Gerilim seviyesine bağlı olarak bazı ölçme, kontrol ve koruma cihazları doğrudan ölçüm yapabildiği gibi birçok noktada akım ve gerilim ölçü transformatörleri aracılığı ile dolaylı ölçüm devreleri de kullanılmaktadır. Bu dolaylı ölçme sistemlerinde ölçü transformatörleri, akım, gerilim, güç ve enerji gibi elektriksel parametrelerin ölçme zincirinin ilk halkasını oluşturmaktadır.(Draxler ve Styblikova, 2007)

Ölçü transformatörlerinin gelişiminin erken aşamalarında, ölçüm doğruluğu, yalıtım ve geçici rejim olaylarındaki doğru ölçüm önemi pek dikkate alınmamıştı. Ancak, 1900'lerin başında ölçü trafosu teorisini, performansını ve gereksinimlerini araştırmacılar tarafından ele alınmıştır. Şu anda, ölçü transformatörü için standartlar IEC tarafından sistematik olarak güncellenmektedir. 1996'da ölçü transformatörleri için uluslararası standart IEC 60044 serisiydi ve 2007'den bu yana IEC 61869-1 ile değiştirilmiştir. (Kim ve diğ., 2024)

Özellikle koruma sınıfı akım transformatörlerinde, IEC 61869 standardına göre birçok farklı sınıf tanımlanmıştır. Bu sınıflar, kullanılan koruma fonksiyonuna bağlı olarak zaman için gereklilik olarak ortaya çıkmıştır. Örnek olarak, klasik aşırı akım koruma fonksiyonları için “P” sınıfı akım transformatörleri yeterli iken, hızlanan röleler ve koruma fonksiyonları nedeniyle arızanın ilk anlarını doğru ölçmeyi amaçlayan “TP” sınıfı akım transformatörleri ortaya çıkmıştır. Tekrar kapama fonksiyonlarının ortaya çıkması ile, artık mıknatıslanma etkisini en aza indirecek “anti-remenance” sınıfı akım transformatörleri ihtiyaç olmuştur. Bu gibi sebeplerle IEC 61869 standardı farklı koruma sınıfı akım transformatörleri tanımlamıştır.

IEC 61869 yalnızca koruma sınıfı akım transformatörlerinde değil ayrıca ölçme sınıfı akım transformatörlerinde ve gerilim transformatörlerinde de benzer sınıf çeşitlendirmeleri yapmıştır ancak bunlardaki çeşitlendirme daha çok ölçme hatasının miktarı bazında olmuştur.

IEC 61869 standardı tarafından tanımlanan bu sınıflarının her birinin bir ölçme hata sınırı ve ideal çalışma şartları tanımı vardır. Koruma mühendisleri, kullandıkları akım transformatörlerinin bu standartta verilen çalışma şartlarına uyumlu olup olmadığına göre ölçme transformatörlerinin uygunluğunu kontrol etmektedir.

Geleneksel akım ve gerilim ölçme transformatörleri primer devresinden ölçü ve koruma cihazlarının bağlı bulunduğu sekonder devresine güç iletmek için bir manyetik çekirdeğe ihtiyaç duyarlar. Ancak manyetik devreler doyuma ulaşarak sekonder devrede birincil sargıdan akan akımdan veya bulunan gerilimden çok daha farklı bir dalga şekli ve değerine neden olabilir (Bertrand ve diğ., 2009). İşte ölçü transformatörlerinin primer ve sekonder sargıları arasındaki bu farka IEC 61869 standardına göre “oran hatası” ve “açı hatası” denilmektedir. Normal şartlar altında bir ölçü transformatörünün “oran hatası” ve “açı hatası” IEC 61869 standardında belirlenmiştir ve ölçü transformatörünün sınıfına göre farklıdır. Daha doğru ölçüm istenilmesi durumunda daha hassas ölçü transformatörü sınıfları tercih edilebilir. Ancak her elektriksel olan ekipmanda olduğu gibi ölçü transformatörlerinin de uygulandığı noktaya ve şebekeye uygun olarak bir seçim sürecinden geçmesi gerekir. Bu süreç, ölçü transformatörünün sınıfına göre tanımlanan sınırlar içerisinde bir hata ile uygulandığı noktada çalışacağını garanti altına almak içindir. Bu yüzden hem IEC 61869 standart ailesi hem de özel markalar kullanılacak ölçü transformatörlerinin seçimi için bazı yönergeler hazırlamıştır. Bu tez kapsamında IEC standartlarının ve markaların, akım ve gerilim ölçme transformatörlerinin doğru seçimi hakkındaki teknik notları derlenmiştir ve bu notlara göre ölçü transformatörünün seçimi için bir yazılım aracı geliştirilmiştir. Bu araç, ölçü transformatörünün seçimi sürecini standartlaştırması ve kolaylaştırması amacıyla oluşturulmuştur.

Bu tez kapsamında yalnızca, manyetik çekirdekli akım ve gerilim ölçme transformatörleri incelenmiştir. Rogowski bobini ve dijital ölçü transformatörleri bu tez kapsamında incelenmemiştir.

Bu tez kapsamında yalnızca IEC 61869 Avrupa standardı ailesi dikkate alınmıştır. IEEE C57.13 gibi diğer standartlar bu tez kapsamında incelenmemiştir.

Yazılım, Python dilinde yazılmıştır. Yazılım bir kullanıcı arayüzü ile, öncelikle gerekli verileri talep etmekte ve sonrasında akım transformatörü seçimi için gerekli hesapların ve kıyaslamaların yapıldığı hazır excel sayfalarına göndermektedir. Hazır excel sayfaları yine bu tez kapsamında IEC 61869 standardı ve kullanılan koruma rölesi modeline bağlı olarak markaların akım transformatörü seçim şartlarına göre hazırlanmıştır.



2. ÖLÇÜ TRANSFORMATÖRLERİ

Ölçü transformatörlerine dair standartların hazırlanmasında IEC Teknik Komite 38 sorumludur ve 1996'dan beri ölçü transformatörlerine dair standartlar önce IEC 60044 daha sonra IEC 61869 serisinde toplanmaktadır. Bu serideki standartlar dizisine genel bir bakış aşağıdaki Tablo 2.1'de verilmiştir. (Bertrand ve diğ., 2009)

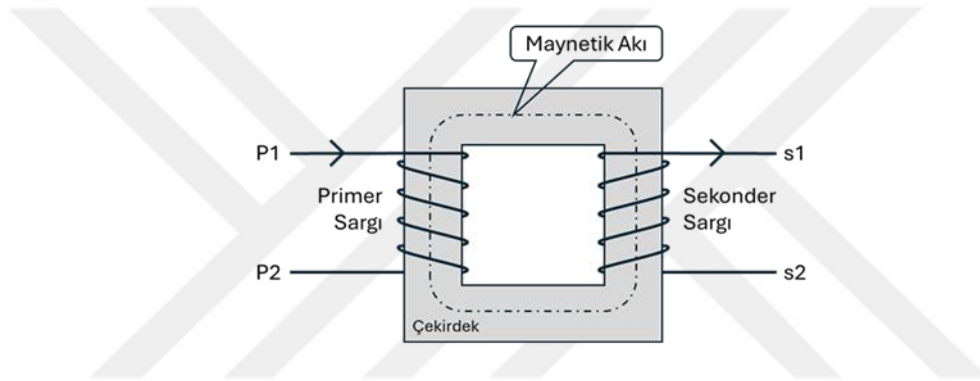
IEC 61869 standardında ölçü transformatörleri için farklı doğruluk sınıfları tanımlanmaktadır. Bu doğruluk sınıfları ölçü ve koruma olmak üzere iki ana fonksiyona ayrılmaktadır. Ölçü sınıfları, primer akım veya gerilimin sınırlı bir değişim aralığı için yüksek doğruluk gereksinimini tanımlar iken, koruma sınıfları ise primer akım veya gerilimdeki büyük değişikliklere yönelik gerekli doğruluğu tanımlamaktadır. Akım ve gerilim transformatörlerinin klasik teknolojisinin sınırlamaları nedeniyle, aynı manyetik çekirdekle her iki doğruluk gereksinimini de karşılamak genel olarak mümkün değildir. Sonuç olarak, farklı türdeki işlevleri gerçekleştirmek için sıklıkla farklı çekirdeklere ihtiyaç duyulmaktadır. (Bertrand ve diğ., 2009)

Tablo 2.1. IEC 61869 standart dizisi

Standart Ailesi	Standart Numarası	Başlık
IEC 61869-1:2023 Ölçü transformatörleri - Bölüm 1: Genel kurallar	61869-2	Akım transformatörleri için ilave kurallar
	61869-3	Endüktif gerilim transformatörleri için ilave kurallar
	61869-4	Birleştirilmiş transformatörler için ilave kurallar
	61869-5	Kondansatörlü gerilim transformatörleri için ilave kurallar
	61869-9	Ölçü transformatörleri için dijital arayüz
	61869-10	Düşük güçlü pasif akım transformatörleri için ilave gereklilikler
	61869-11	Düşük güçlü pasif gerilim transformatörleri için ilave gereklilikler
	61869-13	Bağımsız birleştirme birimi
	61869-14	DA Uygulamalarında kullanılan akım transformatörleri için ilave gereklilikler
	61869-15	DA Uygulamalarında kullanılan gerilim transformatörleri için ilave gereklilikler
	61869-100	Akım transformatörlerinin güç sistemi korumasında uygulanmasına ilişkin kılavuz

2.1. Manyetik Devre

Ölçü transformatörleri temel manyetik bir devre ile basitleştirilebilir. Şekil 2.1, ideal bir ölçü transformatörünün en temel manyetik devresini göstermektedir (URL-1). Akım birincil sargıdan geçerken veya gerilim birincil sargıya uygulandığında çekirdekte manyetik bir akıya neden olur. Akı çekirdekten akar ve ikinci sargıda birincil sargının ikincil sargıya oranıyla çevrilen bir akım veya gerilim indüklenir. Ölçü transformatörleri kusursuz cihazlar değildir ve bakır sargının ve çekirdeğin direncinden ve kaçak endüktanstan dolayı kayıplar meydana gelir. En büyük iki kayıp, akımı taşıyan bakır sargılardan ve akıyı taşıyan manyetik çekirdekten kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.1. Temel manyetik devre

2.2. Akım Transformatörleri

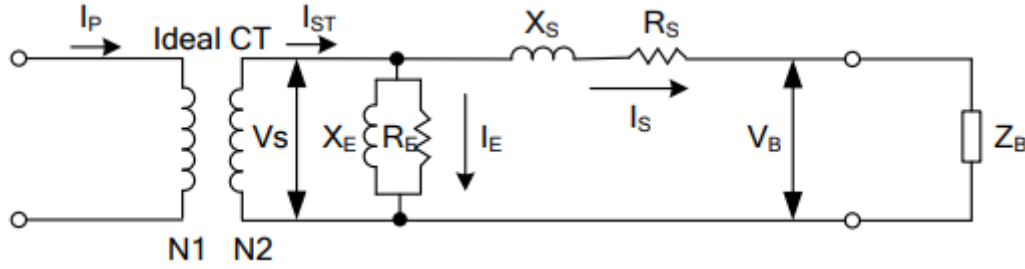
IEC 61869-2 standardına göre akım transformatörü “Normal çalışma koşullarında, sekonder sargısındaki akım, primer sargısındaki akımla doğru orantılı olan ve bağlantıların uygun şekilde yapılması durumunda birbirlerine göre neredeyse sıfır faz açısına sahip olan bir tür elektriksel ölçüm cihazıdır” olarak tanımlanmaktadır.

Akım transformatörü, primer sargısından geçen akımı, koruma ve kontrol amaçları için belirli bir sekonder akımına dönüştürmesi için tasarlanmış bir transformatördür. Açıkça görülebilir ki, akım transformatörü manyetik bir çekirdek üzerinden birbirine bağlı iki sargı içeren klasik bir transformatöre benzemektedir.

Akım transformatöründeki bakır kayıpları, çekirdek kayıpları, girdap akımı kayıpları ve kaçak akı kayıpları nedeniyle, bir akım transformatörü primer akımını ideal bir şekilde sekonder tarafa çeviremez ve büyüklük ve faz açısı farkı oluşturur (Xu ve diğ., 2015).

2.2.1. Akım Transformatörünün Elektriksel Devresi

Bir akım transformatörünün gerçek performansını analiz etmek amacıyla kullanılan eşdeğer devre modeli, Şekil 2.2'de gösterildiği gibidir ve herhangi bir transformatör ile aynıdır (Xu ve diğ., 2015).

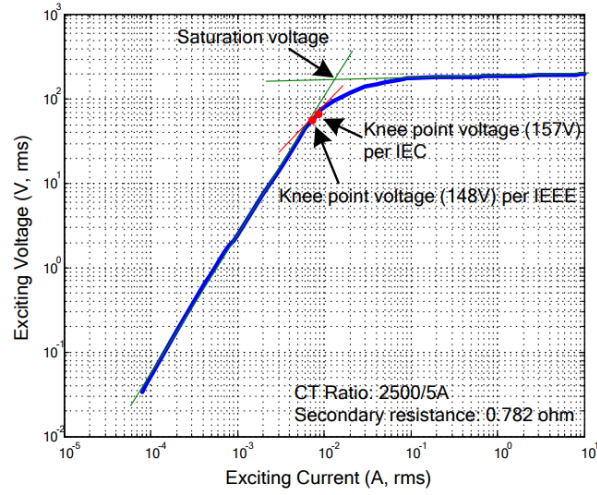


Şekil 2.2. Akım transformatörü eşdeğer devresi

Şekil 2.2'de, V_S sekonder uyarma gerilimi, V_B sekonder yük boyunca akım transformatörü terminal gerilimi, I_P primer akımı, I_{ST} sekonder toplam akımı, I_S yük üzerindeki sekonder akımı, I_E uyarma akımı, R_E uyarma direnci, X_E uyarma reaktansı, R_S akım transformatörü direnci, X_S sızıntı reaktansı, Z_B yük empedansı ve N_2/N_1 ise akım transformatörü dönüştürme oranıdır.

Akım transformatörü sekonder manyetizasyon karakteristiği eğrisi, normalde üreticiler tarafından sağlanan ve saha testleri sırasında kolayca doğrulanabilen akım transformatörünün sabit durum performansını temsil etmenin daha pratik bir yoludur. Manyetizasyon karakteristiği eğrisi, sekonder uyarma geriliminin (V_S)(rms) değeri ile sekonder uyarma akımının (I_E)(rms) değeri arasındaki ilişkiyi haritalamaktadır. Şekil 2.3, bir saha testi sırasında elde edilen 2500:5A AT uyarmı karakteristiğini gösterilmektedir (Xu ve diğ., 2015).

IEEE C37.110-2007 standardında, diz noktası gerilimi, eğriye çizilen teğetin, apsis(yatay eksen) ile 45 derecelik bir açı yaptığı nokta olarak tanımlanır (IEEE Std C37.110, 2023). Diz noktası doyma noktası değildir. Doyma gerilimi, manyetizasyon karakteristiği eğrisinden grafikteki doğrusal bölgelerin kesişme noktası olarak konumlandırılmaktadır (Xu ve diğ., 2015).



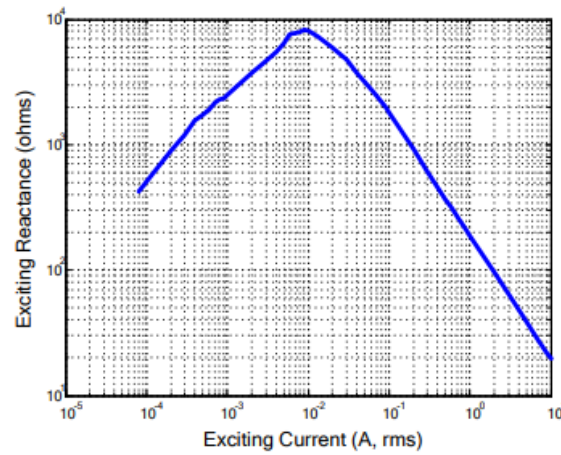
Şekil 2.3. Testten elde edilen sekonder manyetizasyon karakteristiği eğrisi

IEC 61869-2 standardında, diz noktası gerilimi, transformatörün sekonder terminallerine uygulanan ve %10 artırıldığında, uyarma akımının rms değerinin %50 artmasına neden olan gerilim olarak tanımlanır (IEC 61869-2, 2012).

Uyarma reaktansı (X_E) manyetizasyon karakteristiği eğrisinden hesaplanabilir ve doğrusal olmayan yapısı Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Xu ve diğ., 2015).

2.2.2. Kullanım Amacına ve Sınıflarına Göre Akım Transformatörleri

Akım transformatörleri kullanılma amacına, fiziksel yapısına, teknolojisine ve IEC 61869-2 standardında verilen sınıflara göre çeşitlilik göstermektedir.



Şekil 2.4. Manyetizasyon karakteristiği eğrisinden elde edilen uyarma reaktansı

IEC 61869-2 standardına göre, ölçüm aletlerine ve sayaçlara bir bilgi sinyali iletmek için tasarlanmış akım transformatörüne “ölçü akım transformatörü” denilmektedir.

Koruyucu ve kontrol cihazlarına bir bilgi sinyali iletmek için tasarlanmış bir akım transformatörüne ise “koruma akım transformatörü” denilmektedir.

Ölçü sınıfları, primer akım sınırlı bir değişim aralığı için yüksek doğruluk gereksinimini tanımlar iken, koruma sınıfları ise primer akım veya gerilimdeki büyük değişikliklere yönelik gerekli doğruluğu tanımlamaktadır.

2.2.2.1. Ölçü Akım Transformatörleri

Bir ölçü akım transformatörü nominal akım değeri civarında iyi bir doğruluk gerektirir ancak çok yüksek akımlarda doğru ölçmesi beklenmez. Ölçü akım transformatörlerine bağlı ölçüm aletlerinin koruma röleleri kadar yüksek akımlara dayanması gerekmediği için, ölçü akım transformatörleri daha erken değerlerde doyması ve bağlı aletlerin aşırı akımdan korunması gerekir. Bu sebeple ölçü akım transformatörleri mümkün olan en düşük Güvenlik Faktörüne (S_F) sahiptir.

IEC 61869’a göre akım transformatörlerinin doğruluk sınıfı, nominal primer akım ve nominal çıkış gücünde meydana gelen oran hatasının(ϵ) izin verilen en yüksek değeri ile belirlenmektedir.

Ölçü akım transformatörleri için standart doğruluk sınıfları şunlardır: 0,1 – 0,2 – 0,2S – 0,5 – 0,5S – 1 – 3 – 5

Bu sınıflar için izin verilen oran hata sınırları Tablo 2.2’de verilmiştir (IEC 61869-2, 2012).

Tablo 2.2. Ölçü sınıfı akım trafoları için oran hatası sınırları

Sınıf	Oran Hata Sınırı $\pm$ %			
	Anma Akımında (%)			
	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5
1	3	1,5	1	1

Tablo 2.2. (Devam) Ölçü sınıfı akım trafoları için oran hatası sınırları

Sınıf	Oran Hata Sınırı $\pm$ % Anma Akımında (%)			
	5	20	100	120
0,2S	0,35	0,2	0,2	0,2
0,5S	0,75	0,5	0,5	0,5
3	-	-	-	3
5	-	-	-	5

2.2.2.2. Koruma Akım Transformatörleri

Koruma akım transformatörleri, çalışma eşiği çok yüksek olabilen arıza akımlarını nispeten doğru bir şekilde ölçülmesine izin verecek kadar yüksek bir doyma seviyesine sahip olmalıdır. Bu nedenle koruma akım transformatörleri genellikle oldukça yüksek Doğruluk Sınır Faktörüne (ALF) sahip olması beklenir.

IEC 61869-2 standardı koruma akım transformatörlerini tanımlamak için ise üç farklı alt grup belirlenmiştir (bkz. Tablo 2.3).

Tablo 2.3. Koruma sınıfı akım trafoları grupları

Sınıf	Artık Akı Limiti	Açıklama
P	Hayır	Simetrik kararlı durum koşulları altında kısa devre akımının bileşik hata gereksinimlerini karşılamak için gerekli akım transformatörünü tanımlar
PR	Evet	
PX	Hayır	Akım transformatörünün mıknatıslanma özelliğini belirterek tanımlanır
PXR	Evet	
TPX	Hayır	Asimetrik kısa devre akımı koşulları altında geçici durum hata gereksinimlerini karşılamak için gerekli akım transformatörünü tanımlar
TPY	Evet	
TPZ	Evet	

Tablo 2.4'te belirtilen sınır değerler çerçevesinde, bu koruma amaçlı kullanılan akım transformatörlerinin nominal frekansta ve nominal yük altında çalışırken göstermesi gereken performans belirli kriterlere tabi tutulmuştur. Bu bağlamda, söz konusu transformatörlerin oran hatası, faz kayması ve bileşik hata değerleri, uluslararası standartlara uygunluk açısından IEC 61869-2 standardında belirtilen tolerans değerlerini aşmamalıdır. Bu standart, koruma akım transformatörlerinin güvenilir ve hassas bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla, belirli elektriksel ve manyetik özellikleri içeren

sınırlamaları ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, koruma sistemlerinin doğru çalışması ve güç sistemlerinde güvenliğin sağlanabilmesi için bu transformatörlerin belirtilen hata değerleri içinde kalması kritik bir öneme sahiptir (IEC 61869-2, 2012).

Tablo 2.4. Koruma sınıfı akım trafoları için hatası sınırları

Sınıf	Anma Akımında Oran	Anma Akımında Faz Kayması Sınırı	
	Hata Sınırı $\pm \%$	Dakika	Derece
5P ve 5PR	1	± 60	$\pm 1,8$
10P ve 10PR	3	-	-
PX	0,25	-	-
PXR	1	-	-
TPX	0,5	± 30	$\pm 0,9$
TPY	1	± 60	$\pm 1,8$
TPZ	1	180 ± 18	$5,3 \pm 0,6$

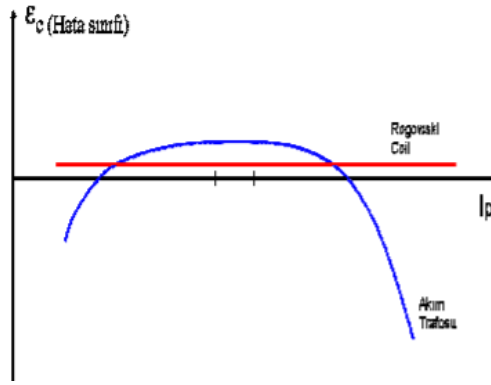
2.2.3. Fiziksel Yapısına ve Teknolojisine Göre Akım Transformatörleri

2.2.3.1. Rogowski Bobini Akım Transformatörleri

Rogowski bobini ilk 1912 yılında teorik olarak ortaya çıkmıştır ancak sahip olduğu dezavantajlar nedeniyle uygulanması ve yaygınlaşması daha geç olmuştur. Rogowski bobini, manyetik olmayan dolayısıyla havaya eşdeğer bir manyetik geçirgenliği ($\mu_r=1$) olan çekirdek üzerine sarılmış sargılardan oluşan bir akım transformatörüdür.

Üzerinden akım geçen bir iletkenin çevresinde oluşturduğu akım yönüne dik bir manyetik alan içinde bulunan bir sargı uçlarında bir gerilim endüklenir. Endüklenen bu gerilim, analog-dijital dönüştürücüler sayesinde kullanılabilir hale getirilir. Gerilim asıl sinyale göre 90 derece faz farkı olması ve harmonik bileşenleri içeriyor olması analog-dijital dönüştürücülerin kullanımını gerekli kılmıştır.

Endüktif akım transformatörlerinden ayıran en önemli özelliği boyutlarının küçük olması ve geniş bir akım aralığında tek bir doğrulukta olmasıdır. Rogowski bobinleri IEC 61869-10 standardına göre üretilmektedir. Rogowski bobini akım sensörlerinin konvansiyonel akım transformatörleri ile karşılaştırıldığında en önemli özelliği, doğrusallığıdır ve bu karşılaştırma Şekil 2.5 üzerine verilmiştir. Demir bir nüve bulunmadığından, doyma durumu mevcut değildir ve çok yüksek akımlarda dahi doğru ölçüm gerçekleştirebilir (Üzel, 2009).



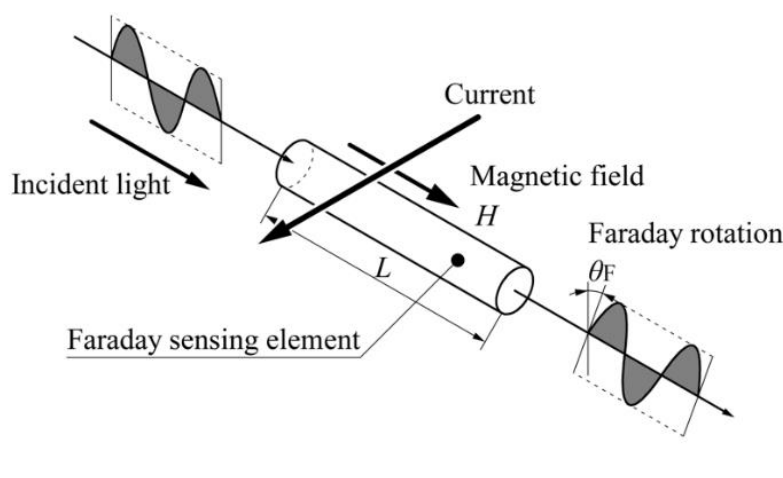
Şekil 2.5. Rogowski bobini ve indüktif akım transformatörü doğrusallığı

2.2.3.2. Fiber Optik Manyetik Akım Sensörleri

Fiber optik manyetik akım sensörleri manyetostriksiyon tabanlı ve Faraday tabanlı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Manyetostriksiyon sensörlerde, bir dış manyetik alandan dolayı malzemede meydana gelen uzunluk değişimini ölçen bir interferometre kullanılmaktadır. Uzunluk değişimi, fiber içindeki ışığın faz açısında bir kaymaya neden olmaktadır (Aydoğan ve Aras, 2013).

Faraday tabanlı sensörlerde, ışık, manyetik alana tabi tutulan şeffaf bir nesneden geçtiğinde, polarizasyon düzlemi döner. Bu etki Faraday etkisi olarak bilinir ve optik fiber akım sensörü teknolojisinin temelidir (bkz. Şekil 2.6) (URL-2).



Şekil 2.6. Faraday etkisi

Fiber optik akım sensörleri, geleneksel akım trafolarına göre dikkate değer avantajlara sahiptir. Fiber optik akım sensörü, yüksek arıza akımlarının ve hızlı geçişlerin ölçülmesine olanak tanıyan manyetik doyma sorununa sahip değildir. Devre kesicilere entegre edilebilir, böylece yerden tasarruf edilir ve trafo merkezinin kapladığı alan azaltılır.

2.3. Gerilim Transformatörleri

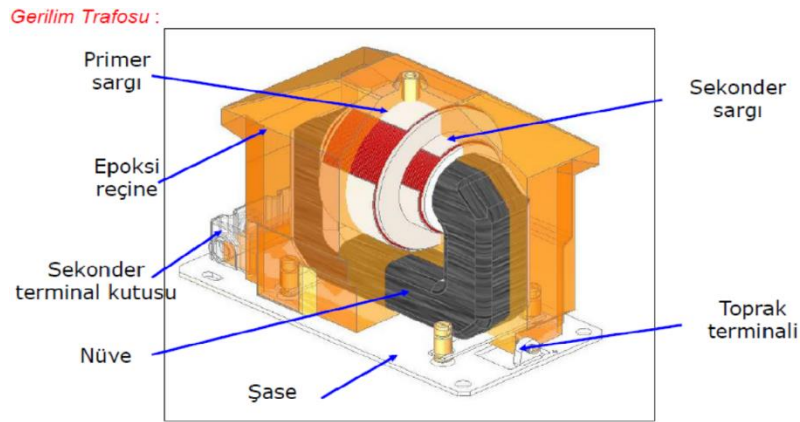
IEC 61869-3 standardına göre gerilim transformatörü “Normal çalışma koşullarında, sekonder sargısındaki gerilim, primer sargısındaki gerilim doğru orantılı olan ve bağlantıların uygun şekilde yapılması durumunda birbirlerine göre neredeyse sıfır faz açısına sahip olan bir tür elektriksel ölçüm cihazıdır” olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.7 üzerinde gerilim transformatörünün iç yapısı verilmiştir (URL-3).

2.3.1. Kullanım Amacına ve Sınıflarına Göre Gerilim Transformatörleri

Gerilim transformatörleri kullanılma amacına, teknolojisine ve IEC 61869-3 standardında verilen sınıflara göre çeşitlilik göstermektedir.

IEC 61869-3 standardına göre, ölçüm aletlerine ve sayaçlara bir bilgi sinyali iletmek için tasarlanmış gerilim transformatörüne “ölçü gerilim transformatörü” denilmektedir (IEC 61869-3, 2011).

Koruyucu ve kontrol cihazlarına bir bilgi sinyali iletmek için tasarlanmış bir gerilim transformatörüne ise “koruma gerilim transformatörü” denilmektedir.



Şekil 2.7. Gerilim transformatörü yapısı

2.3.1.1. Ölçü Gerilim Transformatörleri

Ölçü sınıfı gerilim transformatörleri için ise standart doğruluk sınıfları şunlardır: 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3. Bu sınıflar için izin verilen oran hata sınırları Tablo 2.5’te verilmiştir (IEC 61869-3, 2011).

Tablo 2.5. Ölçü sınıfı gerilim trafoları için hatası sınırları

Sınıf	Oran Hata Sınırı $\pm \%$	Faz Kayması Sınırı	
		Dakika	Derece
0,1	0,1	± 5	$\pm 0,15$
0,2	0,2	± 10	$\pm 0,3$
0,5	0,5	± 20	$\pm 0,6$
1	1	± 40	$\pm 1,2$
3	3	Tanımlanmamış	$\pm 0,9$

2.3.1.2. Koruma Gerilim Transformatörleri

Koruma sınıfı gerilim transformatörleri, nominal gerilim seviyesinin %5’inden, nominal gerilime kadar olan aralıkta uygulanacak herhangi bir gerilimde belirli bir hata sınırına sahip olmalıdır. Öyle ki bu hata sınırı sınıf isimlendirmesine dahil edilmiştir. İzin verilen hata sınırından sonra gelen “P” harfi ile hem hata sınırı hem de koruma sınıfı olduğu belirtilmektedir. (bkz. Tablo 2.6) (IEC 61869-3, 2011).

Tablo 2.6. Koruma sınıfı gerilim trafoları için hatası sınırları

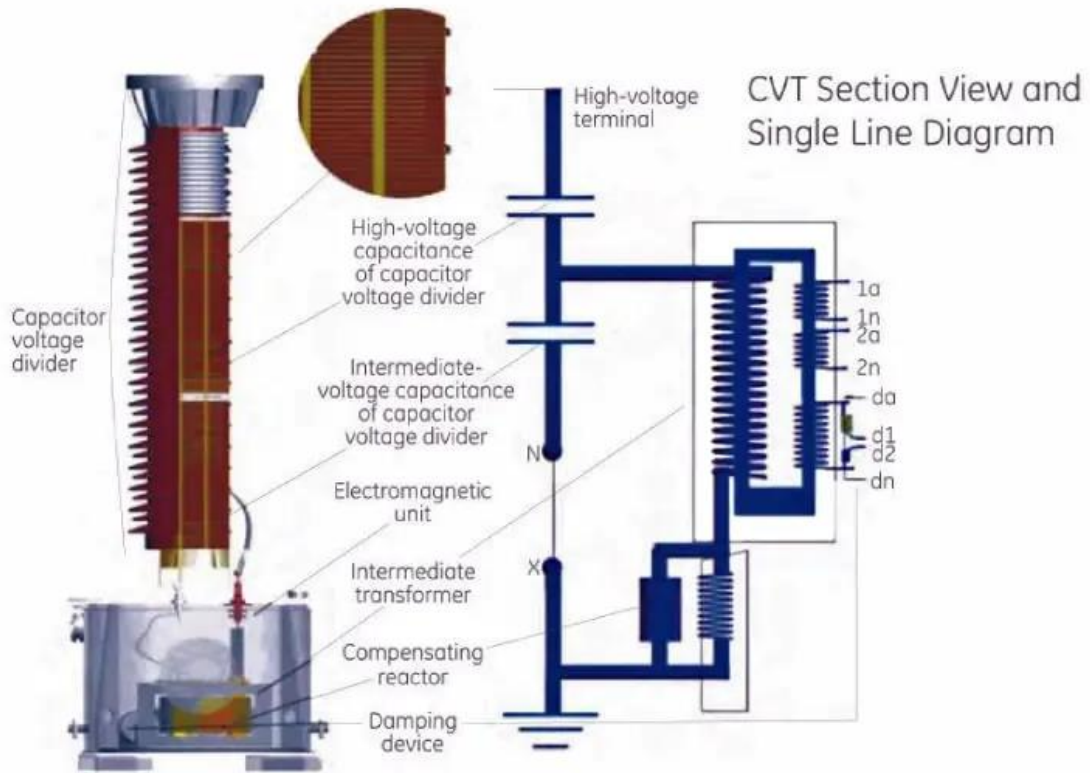
Sınıf	Oran Hata Sınırı $\pm \%$	Faz Kayması Sınırı	
		Dakika	Derece
3P	3	± 120	$\pm 3,5$
6P	6	± 240	± 7

Gerilim transformatörlerinin iki ana tipi vardır: Endüktif gerilim trafosu ve kapasitif gerilim trafosu veya kapasitör gerilim trafosu.

2.3.2. Fiziksel Yapısına ve Teknolojisine Göre Gerilim Transformatörleri

Gerilim ölçü transformatörleri esas olarak endüktif ve kapasitif olmak üzere iki tiptir. Kapasitif gerilim ölçü transformatörleri genellikle yüksek gerilim seviyesi (100 kV ve üstü) için kullanılmaktadır. Endüktif bir gerilim transformatörü, normal bir transformatörle aynı mıknatıslanma prensibine göre çalışmaktadır, ancak kapasitif

gerilim ölçü transformatörleri gerilim bölücü görevi gören kapasitör setleriyle yapılmaktadır. Kapasitif gerilim ölçü transformatörleri, kendisi de nispeten küçük ve hafif olan gerilim bölücü kapasitörler sayesinde, indüktif ölçü transformatörünün demir nüve boyutunun çok daha küçük ve dolayısıyla daha ekonomik olması avantajını sunmaktadır. Şekil 2.8 üzerinde kapasitif gerilim transformatörünün iç yapısı verilmiştir (URL-4).



Şekil 2.8. Kapasitif gerilim transformatörü yapısı

3. ÖLÇÜ TRANSFORMATÖRLERİNİN SEÇİMİ

Ölçü transformatörlerinin seçimi için dikkate alınması gereken ana faktörler şunlardır:

1. Ölçü transformatörünün tipi
2. Anma yalıtım seviyesi
3. Anma primer akımı/gerilimi
4. Anma sekonder akımı/gerilimi
5. Sürekli termik anma akımı/anma gerilim faktörü
6. Anma kısa süre akımı (I_{th}) & dinamik akımı (I_{dyn})
7. Çekirdek sayısı
8. Güç&doğruluk sınıfı
9. Aşırı akım doyma katsayısı&ölçü emniyet katsayısı ($ALF&Fs$)

3.1. Ölçü Transformatörünün Tipi

Gerilim ölçü transformatörleri esas olarak endüktif ve kapasitif olmak üzere iki tiptir. Kapasitif gerilim ölçü transformatörleri genellikle yüksek gerilim seviyesi (100 kV ve üstü) için kullanılmaktadır. Endüktif bir gerilim transformatörü, normal bir transformatörle aynı mıknatıslanma prensibine göre çalışmaktadır, ancak kapasitif gerilim ölçü transformatörleri gerilim bölücü görevi gören kapasitör setleriyle yapılmaktadır. Kapasitif gerilim ölçü transformatörleri, kendisi de nispeten küçük ve hafif olan gerilim bölücü kapasitörler sayesinde, indüktif ölçü transformatörünün demir nüve boyutunun çok daha küçük ve dolayısıyla daha ekonomik olması avantajını sunmaktadır.

Geleneksel tüm akım transformatörleri ise indüksiyon prensibine göre çalışmaktadır ve tek tipi endüktiftir. Ancak akım transformatörlerinin fiziksel olarak tipi değişkenlik göstermektedir. Mesnet tipi, kablo tipi, geçit tipi gibi farklı amaçlarda kullanılan fiziksel yapıları mevcuttur.

3.2. Anma Yalıtım Seviyesi

Ölçü transformatörlerinin, sistemin çalışma gerilimlerinde ve aşırı gerilimlerde sorunsuz çalışması beklenmektedir. Bu sebeple IEC 61869-1 standardında yalıtım seviyesi

kontrolü için test gerilimleri sistem gerilimine göre belirtilmektedir. (bkz.Tablo 3.1) (IEC 61869-1, 2023).

Tablo 3.1. Ölçü transformatörleri için anma yalıtım seviyeleri

En Yüksek Şebeke Gerilimi (kV)	Şebeke Frekanslı Dayanım Gerilimi (kV)	Yıldırım Darbe Dayanım Gerilimi(Tepe) (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	95
		125
36	70	145
		170

3.3. Anma Primer Akımı/Gerilimi

Akım ölçü transformatörleri için anma primer akımı, beklenen maksimum çalışma akımından %10 ila 40 daha yüksek belirlenmesi normal bir uygulamadır. Üreticinin sunduğu en yakın üst standart değerler seçilebilir.

Endüktif veya kapasitif gerilim ölçü transformatörleri için ise, bağlı bulunacakları sistem işletme gerilimine göre anma primer gerilim değeri belirlenir.

3.4. Anma Sekonder Akım/Gerilimi

Akım ölçü transformatörleri için standart sekonder akımı 5A veya 1 A'dır. Sekonder devre yükü akımın karesine göre değiştiği için, fazla güç gereksinimi olan durumlarda 1A sekonder akımı tercih edilebilir. Gerilim ölçü transformatörleri için ise sekonder gerilimler $100/\sqrt{3}$ veya $110/\sqrt{3}$ 'tür.

3.5. Sürekli Termik Anma Akımı/Anma Gerilim Faktörü

Akım ölçü transformatörünün sürekli termik akımı, standartlarda öngörülen sıcaklık artış limitlerini aşmadan primerde sürekli olarak akışına izin verilebilecek akım

miktardır. Aksi belirtilmediği sürece, nominal primer akımına eşittir veya derecelendirme faktörü 1'dir. Bir gerilim ölçü transformatörü için gerilim faktörü manyetik nüvenin doygunluğuna neden olmadan uygulanabilecek gerilim derecesini tanımlamaktadır.

3.6. Kısa Süreli Akım(Ith) & Dinamik Akım(Idyn)

Kısa süreli akım, akım ölçü transformatörünün izolasyonuna zarar verebilecek bir sıcaklık seviyesine ulaşmadan 1 saniye boyunca dayanabileceği akımdır. Dinamik akım IEC 61869'a göre 50Hz'lik bir sistem için nominal kısa süreli akımın 2,5 katı olmalıdır.

3.7. Çekirdek Sayısı

Ölçü transformatörleri, ölçme ve koruma amaçlarıyla kullanılmak üzere farklı çekirdeklerin bir arada olduğu yapılarda üretilebilmektedir. Bu sebeple gerekli olan çekirdek tipleri ve sayısı belirtilmelidir. Bazı koruma fonksiyonları, örneğin yüksek empedans diferansiyel koruma gibi, hususi bir ölçü çekirdeği istediğinden bazı durumlarda aynı ölçü transformatörü içinde birden fazla çekirdek kullanılması gerekebilmektedir.

3.8. Güç(Sn)&Doğruluk Sınıfı

Akım ve gerilim ölçü transformatörlerinin gücü sekonder devresine bağlanacak yük miktarına göre doğru şekilde belirlenmelidir. Çünkü akım ve gerilim transformatörlerinin ölçebileceği aralık ve doğru ölçme kabiliyetleri sekonder devre yüküne ve transformatörün nominal gücüne bağlıdır.

Doğruluk sınıfı ise yapılacak uygulama veya koruma fonksiyonuma göre belirlenmelidir.

3.9. Aşırı Akım Doyma Katsayısı&Ölçü Emniyet Katsayısı (ALF&Fs)

Ölçme akım transformatöründe doyma katsayısı, ölçü emniyet katsayısı(Fs) olarak adlandırılır ve bağlanacak ölçme cihazının akım devresi dayanımına göre seçilmelidir.

Koruma sınıfı akım transformatöründe aşırı akım doyma katsayısı olarak adlandırılır ve “ALF” olarak gösterilir. Bu doyma katsayısı etikette “P” harfinden sonra yazılır ve koruma yapılacak ekipmana ve maksimum kısa devre seviyesine göre belirlenmektedir.



4. AKIM TRANSFORMATÖRLERİNİN SEÇİMİ

4.1. Ölçü Sınıfı Akım Transformatörü

IEC 61869-2 standardına göre, ölçü sınıfı akım transformatörlerinin belirlenen hata standartlarını sağlayabilmesi için ideal çalışma aralığı anma gücüne göre belirlenmiştir. Buna göre, Sınıf 0,1-0,2-0,5, 1, 0,2s ve 0,5s akım ölçü transformatörleri için yükün, nominal çıkışın %25 ila %100'ü arasında herhangi bir değer alabileceği belirtilmiştir. Sınıf 3 ve 5 için ise %50 ila %100'ü arasında herhangi bir değer alabileceği belirtilmiştir. Buna göre ölçme devresine bağlı ekipmanların ve iletkendeki toplam güç tüketimi dikkate alınarak akım transformatörünün anma gücü belirlenmelidir. (IEC 61869-2, 2012).

Diğer bir kriter ise ölçü akım transformatörünün doyma seviyesidir. Akım transformatörü sekonder cihazları koruması için aşırı akım seviyelerini sekondere yansıtmamalıdır. Bunun için akım transformatörünün düzeltilmiş ölçü emniyet katsayısı ve sekonder akımının çarpımı bağlı cihazın termik akım dayanım seviyesinden küçük olması gerekmektedir.

Düzeltilmiş ölçü emniyet katsayısı, anma ölçü emniyet katsayısının akım transformatörünün gücüne, iç direncine ve sekonder devreye bağlı toplam yüke bağlı olarak aşağıdaki denklem 4.1'de verildiği gibi hesaplanmaktadır:

$$F_{S'} = \frac{S_n + S_{at}}{S_{at} + S_{yük}} \times F_S \quad (4.1)$$

Burada;

F_S : anma ölçü emniyet katsayısı

$F_{S'}$: düzeltilmiş ölçü emniyet katsayısı

S_n : akım transformatörü anma gücü

S_{at} : akım transformatörü iç direncine bağlı kaybı

$S_{yük}$: Sekonder akım devresine bağlı toplam yük(iletken kaybı ve cihazların güç tüketimleri vs.)

4.2. Koruma Sınıfı Akım Transformatörü

Tablo 4.1’de IEC 61869-100’e göre koruma fonksiyonlarına için tavsiye edilen akım transformatörü sınıfı ve gereksinimleri verilmiştir. (IEC 61869-100, 2017).

Tablo 4.1. Uygulama önerileri

Koruma Fonksiyonu	Tavsiye edilen AT sınıfı
Aşırı akım, faz/toprak -yönsüz(50/51(N)) -yönlü(67/67N)	10P 5P
Mesafe(21/21N)	5P, PX
Hassas toprak hata koruması	Pencere tipi akım trafosu
Diferansiyel -transformatörü(87T) -generatör&transformatör (87G) -bara(87B) -hat(87L) - ΔI - $\Delta \phi$ -yüksek empedans(87Z)	5PR,TPY,TPZ,PXR 5P PX

Geçmişte (20 ila 40 yıldan daha önce), şebekeler genellikle daha düşük zaman sabitlerine sahipti ve elektromekanik koruma cihazları daha yüksek yüklere (10 VA veya üzeri) sahipti. Elektromekanik koruma cihazlarının çalışması için mekanik bir torka ihtiyaç duyması nedeniyle, akım trafolarının 5 A'lık sekonder anma akımı uygun bir değerdi. Bu nedenle, yük değerinin akımının karesiyle çarpılarak hesaplanması, 30 VA gibi yüksek akım trafosu güçlerine yol açmaktaydı.

Daha uzun çalışma sürelerine sahip olmaları nedeniyle, DC bileşen önemli derecede azaldığından, yalnızca kısa devre akımının simetrik AC bileşeni başlatma için önemliydi. Çekirdek doygunluğu bilinen bir olguydu ancak çoğu durumda önemli bir sorun olarak kabul edilmiyordu.

Günümüzde daha yüksek gerilim seviyeleri kullanılması, generatörlerin daha yüksek güçlerde inşa ediliyor olması ve kayıplardaki minimizasyon zaman sabitini arttırmıştır

ve. bu çekirdek doygunluğu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu durum, modern koruma cihazlarının seçiciliğini bozabilir. Modern röleler bir periyot veya daha kısa sürede ölçüm yaparlar ve çalışırlar. Fonksiyona ve koruma rölesinin yaşına bağlı olarak, Ktd faktörü DC bileşeni nedeniyle çekirdek doygunluğu önlemektedir (IEC 61869-100, 2017).

Yüksek geçici rejim faktörü Ktd ile çekirdekler daha büyük hale gelmektedir. Günümüzde, gaz yalıtımlı ekipman (GIS) yalnızca sınırlı bir alan sahiptir. Elektronik koruma cihazları (elektromekanik olanlardan sonraki nesil) akım trafosu sekonder akımını sadece bir sinyal olarak ölçtüğü ve artık herhangi bir torka ihtiyaç duymadığı için yükleri çok daha düşüktür ve rezistiftir. Bu nedenle $[\Omega]$ ($\cos\phi = 1$) cinsinden dirençli bir yük için TPX, TPY, TPZ sınıfları belirtilmiştir. Tork gerekli olmadığından, 1 A'lık nominal akım yeterlidir ve hatta 0,1 A değeri bile artık tartışılmaktadır ve özel uygulamalarda kullanılmaktadır (IEC 61869-100, 2017).

TPX, TPY, TPZ sınıfı akım transformatörleri için tipik bir gereklilik denklem 4.2'deki gibidir:

$$E_{al} \geq K_{td} \times \frac{I_a}{I_p} \times I_s (R_{at} + R_{yük}) \quad (4.2)$$

Burada;

Ek: Anma e.m.f

Ktd: Transient boyutlandırma faktörü

Ia: Arıza akımı

Ip: Akım transformatörü primer akımı

Is: Akım transformatörü sekonder akımı

Rat: Akım trafosu direnci

Ryük: Yük direnci

5P ve 10P sınıfları geçmişten beri iyi bilindiğinden, çoğu uygulamada hala kullanılmaktadır. Bu sınıflar, yüksek yükleri taşıyan elektromekanik röleler ve sadece AC bileşenini dikkate alan aşırı akım faktörü (ALF) ile geleneksel rölelerde yaygın olarak kullanılır.

Birçok uygulamada, yüksek nominal güç, düşük ALF'yi telafi etmektedir. Bu durumda ortaya çıkan Eal) aşağı yukarı aynı kalır. Yüzeysel olarak bu yaklaşımın değişmesi gerekmediği düşünülse de, yüksek nominal güç kapasitesine sahip akım trafoları ciddi şekilde "az yüklenmiş" durumdaysa, hassasiyet, nominal yüke daha yakın bir işletim yükü ile çalışan AT çekirdeklerine göre daha kötü olabilir. Bu durum, özellikle diferansiyel koruma kullanıldığında önemlidir ve yüksek güç kapasiteli eski rölelerin dijital rölelerle değiştirilmesi sırasında dikkate alınmalıdır.

4.2.1. Aşırı Akım Koruma

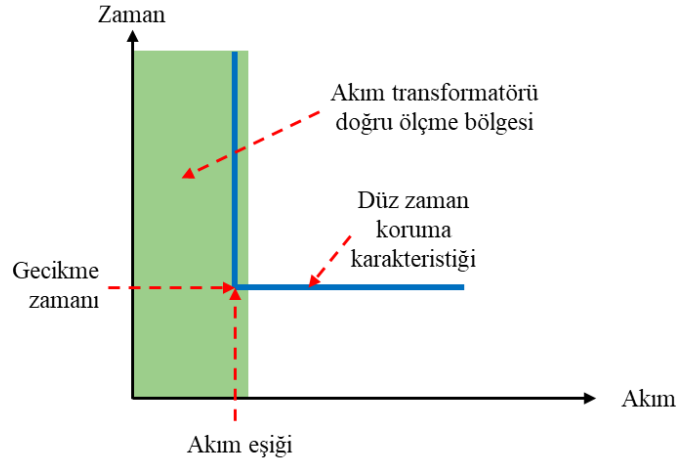
Aşırı akım koruma fonksiyonu, akım bazlı koruma fonksiyonları arasında en basit koruma fonksiyonudur. Bu fonksiyon, ölçülen akım rölede ayarlanan akım eşiğinden aştığında çalışır. Farklı zaman-akım karakteristikleri mevcuttur: düz zaman karakteristiği ve ters zaman karakteristiği.

Düz zaman karakteristiği, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi ölçülen akımın ayarlanan eşiği geçmesi durumunda, ayarlanan sabit bir süre sonunda arızayı temizlemesidir. Bu karakteristikte, akımın ayarlanan eşiği ne kadar aştığı önemli değildir. Açma süresi de akımın seviyesine bağlı değildir. Bu sebeple kullanılan akım transformatörünün, en az düz zaman karakteristiği akım eşiğine kadar doğru ölçmesi beklenir.

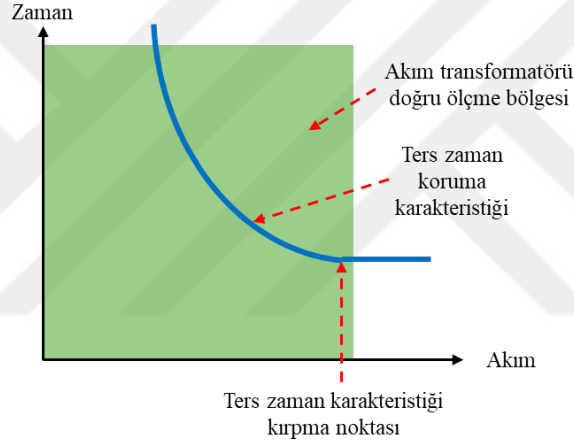
Ters zaman karakteristiğinde ise, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi rölenin açma süresi ölçülen akıma bağlıdır. Bu sebeple akımın doğru ölçümü çok daha önemlidir. Ancak rölelerde ters zaman karakteristiklerinde de bir kırpma noktası mevcuttur ve röleler bu kırpma noktasından sonra açma süresini sabit olarak ele almaktadır. Bu sebeple yalnızca ters zaman karakteristiğinin kullanıldığı noktalarda, akım transformatörünün, en az kırpma noktasına kadar doğru ölçmesi beklenir.

Ters ve düz zaman karakteristiğinin birlikte kullanıldığı uygulamalarda ise, Şekil 4.3te gösterildiği gibi bileşke karakteristikte, açma süresinin sabitlendiği noktaya kadar akım transformatörünün doğru ölçmesi beklenir.

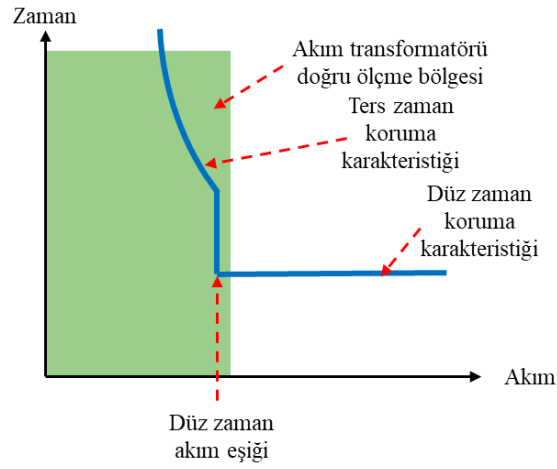
Aşırı akım koruması için tipik olarak düzeltilmiş doyma katsayısı(ALF') ≥ 20 şartı önerilebilir. Bu değer, genellikle zaman gecikmeli aşırı akım korumada kullanılan, ters zaman eğrisinin tipik maksimum akımını temsil eder.



Şekil 4.1. Düz zaman karakteristiği



Şekil 4.2. Ters zaman karakteristiği



Şekil 4.3. Ters ve düz zaman bileşke karakteristiği

Bunun yanı sıra, ALF' değeri, aşırı akım koruması için kullanılan maksimum muhtemel ve uygulanabilir koruma ayarından daha yüksek olmalıdır.

Düzeltilmiş doyma katsayısı, anma doyma katsayısının akım transformatörünün gücüne, iç direncine ve sekonder devreye bağlı toplam yüke bağlı olarak aşağıdaki denklem 4.3'te verildiği gibi hesaplanmaktadır:

$$ALF' = \frac{S_n + S_{at}}{S_{at} + S_{yük}} \times ALF \quad (4.3)$$

Burada;

ALF: anma doyma katsayısı

ALF': düzeltilmiş doyma katsayısı

S_n: akım transformatörü anma gücü

S_{at}: akım transformatörü iç direncine bağlı kaybı

S_{yük}: Sekonder akım devresine bağlı toplam yük(iletken kaybı ve röle güç tüketimleri)

4.2.2. Düşük Empedans Diferansiyel Koruma

Kirchhoff yasasına göre diferansiyel koruma, korunan bölgedeki tüm giren ve çıkan akımları karşılaştırır. Normal veya arıza koşulları altında, giren tüm akımların vektörel toplamı ideal olarak sıfır olmalıdır. Uygulamada, belirli olaylar yanlış bir diferansiyel akıma neden olur ve sağlıklı koşullarda toplam akım sıfıra denk değildir. Koruma bölgesi içindeki arıza durumunda akım toplamı arıza noktasındaki kısa devre akımına neredeyse eşittir. Bu durumda diferansiyel röle, görünür diferansiyel akımı, dâhili bir arızanın kesin bir göstergesi olarak kullanır.

Akım trafolarının davranışı diferansiyel korumada önemli bir rol oynar. Normalde dâhili arızalar her türlü diferansiyel röle tarafından tanınmalıdır. Buradaki asıl mesele, yüksek arıza akımlarına sahip harici arızalarda stabil kalabilmektir.

Bu uygulamada hem iç hem de dış arızaların dikkate alınması gerekmektedir. Yukarıda açıklandığı gibi, her türlü dış arıza için, özellikle uzun arıza temizleme süreleri için, korumanın hatalı çalışmasına karşı kararlılık sağlanmalıdır.

Dâhili arızalar da en kötü durumda akım transformatörünün doymasına neden olabilir. En kritik durum bir transformatörün yüksek gerilim tarafında bir arızadır. Düşük kaynak empedansları için kısa devre akımları çok yüksek olabilir. Öte yandan akım trafosu nominal primer akımı I_p değerinin transformatörün nominal akımına uyarlanması gerektiğinden nispeten düşüktür.

IEC 61869-100'e göre Diferansiyel koruma için akım transformatörü seçiminde genel tavsiye şunlardır; (IEC 61869-100, 2017)

- Hem iç hem de dış arızalar dikkate alınmalıdır.
- Akım transformatörü oranları güç transformatörünün nominal akımına uyarlanmalıdır.
- Artık mıknatıslanmayı önleyen AT tipi/sınıfı: 5PR, TPY, TPZ, PXR kullanılmalıdır.

AT'larının nominal primer akımları, nominal akımın en az %120'si olacak şekilde seçilmelidir.

Diferansiyel koruma için seçilecek akım transformatörünün iç ve dış arızalarda denklem 4.4'ü sağlıyor olması gerekmektedir;

$$E_k \geq K_{td} \times \frac{I_a}{I_p} \times (R_{at} + R_{yük}) \quad (4.4)$$

Burada;

E_k : AT diz gerilim seviyesi

K_{td} : Transient boyutlandırma faktörü

I_a : Arıza akımı

I_p : Akım transformatörü primer akımı

R_{at} : Akım trafosu direnci

$R_{yük}$: Yük direnci

İç arızalar (seçici bölge içindeki arızalar) doğru ve hızlı bir şekilde temizlenmelidir, bu nedenle transient boyutlandırma faktörü en az 0,5'ten büyük olmalıdır.

Dış arızalar için, arıza diğer koruma röleleri tarafından giderilene kadar diferansiyel koruma tetiklenmemelidir. Gerekli transient boyutlandırma faktörü Ktd en az 3'ten büyük olmalıdır.

Diferansiyel koruma fonksiyonu için farklı röle üreticilerinin farklı gereklilikleri olabilmektedir. Bunlardan birkaç tanesi bu bölümde örneklenmiştir.

Örneğin ABB Relion 615, 620 ve 630 Serisi röleler için denklem 4.5 verilmiştir (URL-5);

$$ALF' \geq K_{td} \times K_{rem} \times \frac{I_a}{I_p} \quad (4.5)$$

Burada;

ALF': Gerçek doyma katsayısı

Ktd: Transient boyutlandırma faktörü

Krem: Artık mıknatıslanma boyutlandırma faktörü

Ia: Arıza akımı

Ip: Akım transformatörü primer akımı

Benzer şekilde, SIEMENS SIPROTEC 4 serisi röleler için denklem 4.6 verilmiştir (URL-6);

$$ALF' \geq K_{td} \times \frac{I_a}{I_p} \quad (4.6)$$

Burada;

ALF': Gerçek doyma katsayısı

Ktd: Transient boyutlandırma faktörü

Ia: Arıza akımı

Ip: Akım transformatörü primer akımı

4.3. Geçici Rejim Analizi ile Akım Transformatörü seçiminin Önemi

Bu bölümde bir akım transformatörünün PSCAD geçici rejim analiz programı ile performansının koruma röleleri üzerindeki etkisi simüle edilmiştir. Akım transformatörünün doğru boyutlandırılmaması, kullanılan koruma fonksiyonuna bağlı

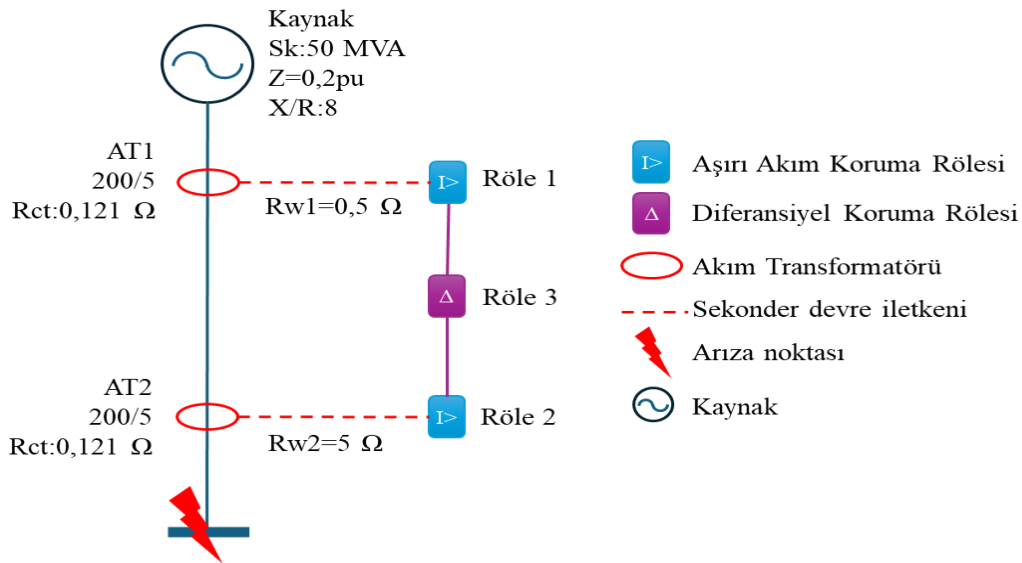
olarak tümüyle yanlış veya kısmen yanlış operasyonların gerçekleşmesine neden olabilir.

Şekil 4.4'te verilen şebeke ve akım transformatörleri ile akım transformatörünün sekonder devresinde bağlı bulunan yüklerin ve sistemin X/R oranının koruma fonksiyonları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Şekil 4.4'te görülen şebekede, "AT1" ve "AT2" olarak iki özdeş akım transformatörü bulunmakta ve bu akım transformatörlerine "Röle1" ve "Röle2" olarak isimlendirilen aşırı akım koruma röleleri ve "Röle3" olarak isimlendirilen diferansiyel koruma rölesi bağlanmaktadır.

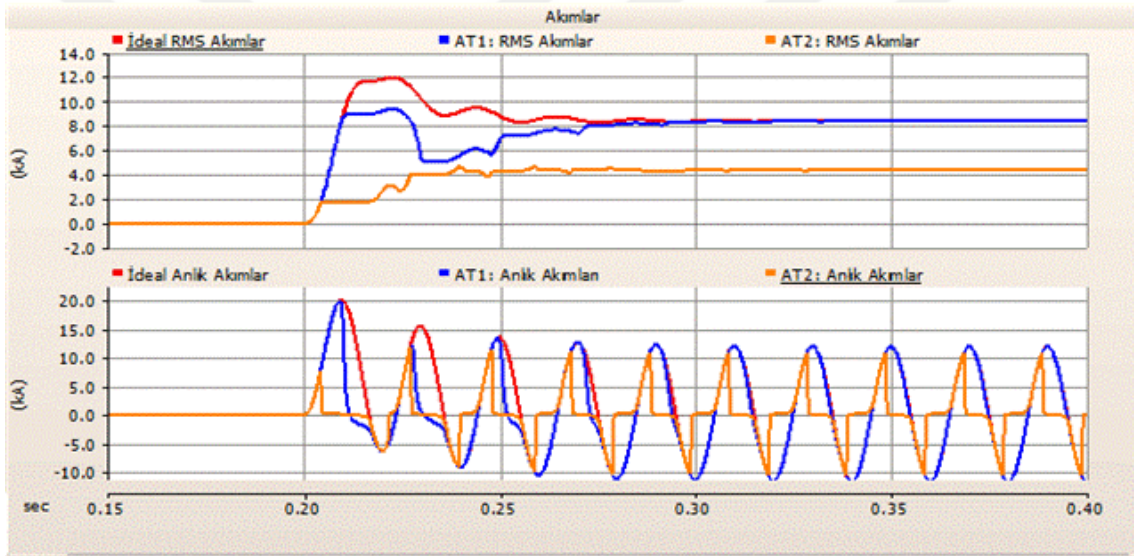
Öncelikle akım transformatörünün sekonder devrede bulunan toplam empedansın koruma fonksiyonlarına ve akım transformatörünün hata oranı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

Her iki akım transformatörünün arasındaki temel fark "Rw" sekonder devre empedansı olarak bulunmaktadır. Sekonder devre empedansı, akım transformatörlerinin daha erken doyması veya daha geç doyması üzerinde etkisi vardır. Sekonder devre empedansı iletken ve bağlanan cihazların empedanslarının toplamından oluşmaktadır ve arttıkça akım transformatörünü daha erken doymasına neden olmaktadır.



Şekil 4.4. Geçici rejim analizleri için kullanılan şebeke ve akım transformatörleri

Şekil 4.5'te verilen grafikte, $R_{wAT1}=0,5\Omega$ ve $R_{wAT2}=5\Omega$ iki farklı sekonder devre empedansı için akım transformatörlerinin ölçme performansları ideal akım değeri ile karşılaştırılmıştır. Bu grafikte, üzerlerinden ideal şartlarda sürekli 8,36 kA RMS kısa devre akımı akan AT1 ve AT2 akım transformatörlerinin sırası ile 8,35 kA ve 4,38 kA olarak ölçtüğü görülebilir. Akım transformatörleri arasındaki bu ölçüm farkı sekonder devre empedanslarındaki farktan kaynaklanmaktadır ve yüksek sekonder devre empedansı olan akım transformatörü daha düşük seviyede doymuştur. $R_{wAT1}=0,5\Omega$ sekonder devre empedansına sahip AT1 akım transformatörü neredeyse ideal bir ölçüm yaparken, $R_{wAT2}=5\Omega$ sekonder devre empedansına sahip AT2 akım transformatörü neredeyse %50 hatalı ölçüm yapmaktadır.



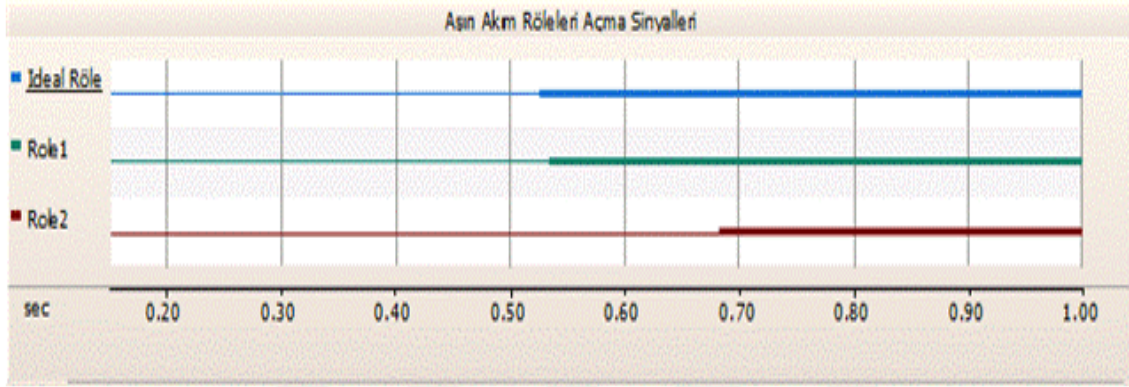
Şekil 4.5. Farklı R_w sekonder devre empedanslarına sahip akım transformatörü akımları ve ideal akım ($R_{wAT1}=0,5\Omega$, $R_{wAT2}=5\Omega$)

AT1 ve AT2 tarafından ölçülen bu akımlar, eşit ayarlara sahip iki aşırı akım rölesi tarafından kullanılması durumunda ise, rölelerin açma süreleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Aynı arıza akımını ölçmeleri gereken bu iki röle, bağlı bulundukları akım transformatörlerinin hatalı ölçmesi nedeniyle yanlış veya geç açma yapabilirler.

Örneğin bu analizde, Röle 1 olarak isimlendirilen röle daha doğru ölçüm yapan AT1 akım transformatörüne bağlı iken, Röle 2 olarak isimlendirilen röle daha yanlış ölçüm yapan AT2 akım transformatörüne bağlıdır. Her iki röle de eşit koruma ayarlarını sahip olmasına rağmen, AT2 akım transformatörünün hatalı ölçümü nedeniyle Röle 2, Röle

1'e göre yaklaşık 225 ms daha geç açmaktadır. Bu gecikme veya hata koordineli şekilde çalışması gereken koruma rölelerinin işlevini yitirmesine neden olabilir.

Şekil 4.6'da ideal akım ölçümü yapan bir röle ile Röle 1 arasındaki küçük zaman farkını dikkate aldığımızda, AT1 akım transformatörü özelliklerinin aşırı akım koruma fonksiyonu için yeterli olduğu söylenebilir. Ancak diferansiyel gibi farklı koruma fonksiyonları çok daha doğru akım ölçümleri gerektirebilir.



Şekil 4.6. Farklı R_w sekonder devre empedanslarına sahip akım transformatörü akımlarının aşırı akım koruma fonksiyonu açma süreleri üzerindeki etkisi($R_{wAT1}=0,5\Omega$, $R_{wAT2}=5\Omega$)

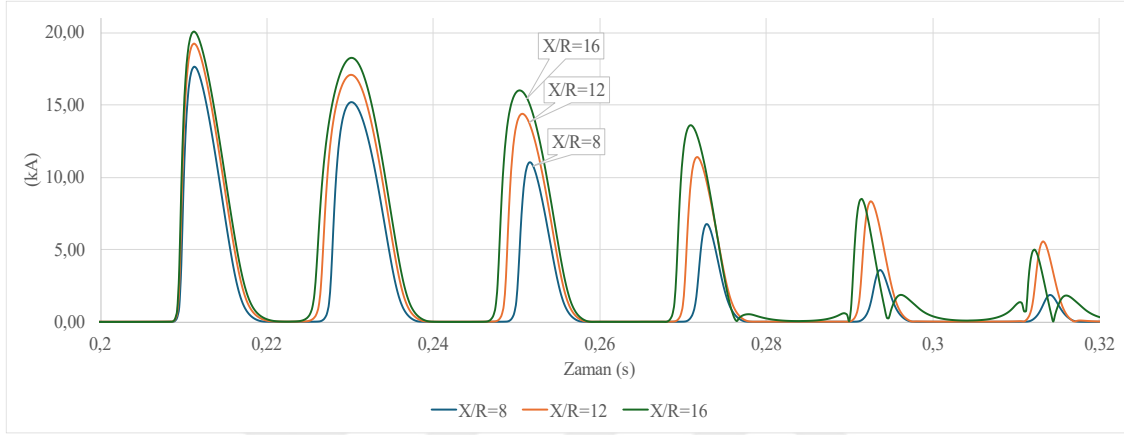
Şekil 4.5'te verilen grafikte, anlık akım ve RMS akım eğrilerine baktığımızda, AT1 akım transformatörünün arızanın başlangıcı sonrası birkaç periyotluk kısımda hatalı ölçüm yaptığı görülebilir. Bu birkaç periyotluk zaman dilimi, diferansiyel koruma gibi hızlı çalışan bir koruma fonksiyonunun hatalı çalışması için yeterli olabilir. Bu sebeple diferansiyel koruma için akım transformatörü seçiminin daha önemli olduğu söylenebilir.

Diferansiyel koruma için akım transformatörünün seçiminde diğer bir etken faktör ise "Ktd: Transient boyutlandırma faktörü"dür. Ktd, herhangi bir arıza esnasında, akımın ilk periyodundaki geçici darbe akımı seviyesinin akım transformatörü seçimine etkisini temsil etmektedir.

Geçici darbe akımı, sistemin "X/R" oranı ile orantılıdır. Sistem "X/R" oranı arttıkça geçici darbe akımı seviyesi artacaktır. Geçici darbe akımı arttıkça da, akım transformatörünün bu geçici akımı ölçebilmesi için gereksinimleri de artacaktır. Bu

sebeple akım transformatörü seçiminde “Ktd: Transient boyutlandırma faktörü” dikkate alınır.

Şekil 4.7’de, sistem “X/R” oranının, yukarıda verilen AT1 akım transformatörünün ölçümü üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Bu şekilde, Sistemin “X/R” oranı arttıkça, AT1 akım transformatörünün ölçme hatasının arttığı görülebilir.



Şekil 4.7. Farklı X/R oranları için AT1 ve ideal akım ölçümü arasındaki akım farkı

5. AKIM TRANSFORMATÖRÜ SEÇİMİ ARACI

Bu tezin amacı, akım trafosu hesaplama sürecini bir araç yani yazılım üzerine aktararak daha kolay hale getirmektir. Bu araç için Python yazılım dili ve Microsoft Excel kullanılmıştır. Araçta, kullanıcının akım trafosunun ve diğer ilgili verilerin tüm gerekli değerlerini girdiği bir giriş sayfası mevcuttur. Hesaplamalar, girilen verilere göre, ilgili Microsoft Excel şablonuna otomatik aktarılarak sağlanmaktadır. Şablonlar, ölçü akım transformatörü, aşırı akım koruma fonksiyonu için geliştirilmiştir. Veriler giriş sayfasına girildikten sonra; tüm gerekli hesaplamalar müşterilere gönderilebilecek bir formatta yazdırılmaya hazır hale getirilmektedir.

5.1. Yazılım Ara Yüzü

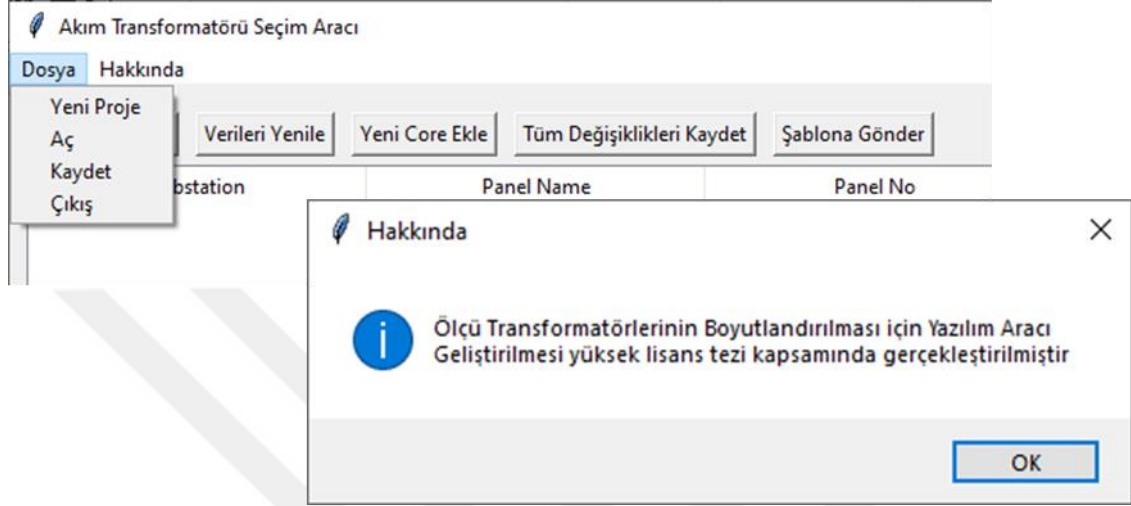
Yazılım arayüzü Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Bu arayüzde, “Menüler” ve “Fonksiyonlar” butonları aracılığı ile alt pencerelere erişilebilmektedir.



Şekil 5.1. Yazılım arayüzü

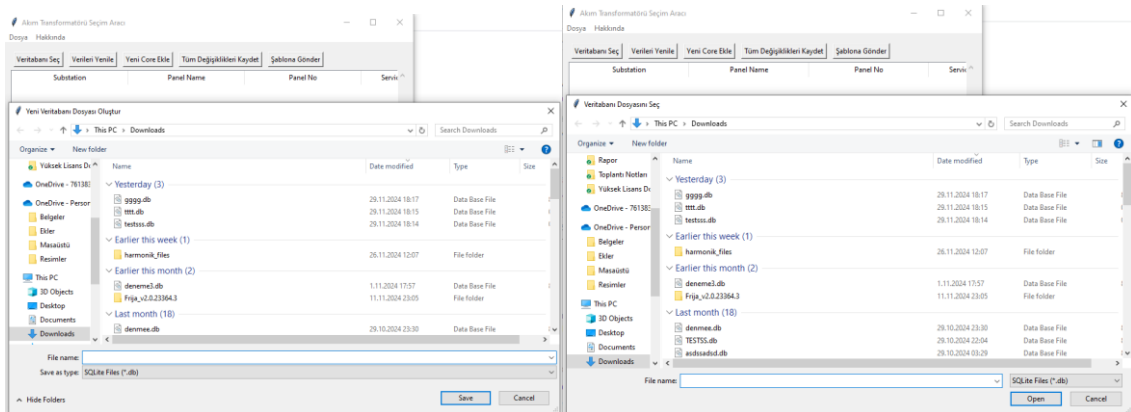
Şekil 5.2’de gösterilen “Dosya” menüsü ile, yeni bir projeyi oluşturma, mevcut bir projeyi açma, değişiklikleri kaydetme ve programdan çıkış yapmak gibi işlemler gerçekleştirilmektedir.

“Hakkında” menüsü ile de yazılıma dair bilgiye erişilmektedir.



Şekil 5.2. Yazılım “Dosya” ve “Hakkında” menüsü

Proje dosyası “.db” uzantılı “sqlite” veritabanı dosyası olarak saklanmaktadır. Proje dosyası herhangi bir dizine kaydedilebileceği gibi istenilen dizindeki proje dosyaları da düzenlenebilir. Şekil 5.3’te proje dosyası oluşturma için dizin seçimi ekranları gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Yeni proje dosyası oluşturma veya dosya açma

Yeni bir proje oluşturduktan veya mevcut bir projeyi açtıktan sonra, “Yeni Core Ekle” butonu ile yeni akım transformatörü çekirdeği eklemek için gerekli olan menüler açılmaktadır. Şekil 5.4’te gösterilen bu menülerde, “genel bilgiler”, “akım transformatörü bilgileri”, “Transformatör bilgileri” ve “cihaz bilgileri” yer almaktadır.

The figure displays four screenshots of the 'Core Düzenle' (Edit Core) dialog box, arranged in a 2x2 grid. Each screenshot shows a different tab of the dialog box.

- Top Left Screenshot (General Info tab):**
 - Substation: Test İstasyonu
 - Panel Name: Test Fideri
 - Panel No: H01
 - Service Voltage Level[kV]: 34,5
 - SC Withstand[kA]: 16.0
 - Buttons: Kaydet
- Top Right Screenshot (CT Spec. tab):**
 - CT Type: 5P
 - CT Primary Current[A]: 600
 - CT Secondary Current[A]: 5
 - CT Rated Power[VA]: 20.0
 - CT Accuracy Limit Factor[ALF]: 20
 - CT Security Limit Factor[Fs]:
 - CT Secondary Resistance[Rct]: 2
 - CT Excitation Current [Ie]:
 - Buttons: Kaydet
- Bottom Left Screenshot (Transformer Info tab):**
 - Transformer Power[kVA]: 30000
 - Primary Voltage[kV]: 34,5
 - Secondary Voltage[kV]: 6,3
 - SC Impedance[%]: 10.0
 - R/X[pu]: 0,01
 - Buttons: Kaydet
- Bottom Right Screenshot (Devices tab):**
 - Device Name: REF615
 - Current Input Impedance[ohm]: 0,02
 - Current Input Withstand[A]: 500.0
 - OC Primary Setting[A]: 6000.0
 - Buttons: Kaydet

Şekil 5.4. Yeni çekirdek ekleme

Eklenen akım transformatörü çekirdekleri, Şekil 5.5’te gösterilen “Veri Görüntüleme” pencresinde görülebilir ve istenirse ilgili satıra tıklanarak düzenlenebilir. Düzenlendikten sonra “Tüm değişiklikleri kaydet” butonu ile proje dosyası güncellenir.

Substation	Panel Name	Panel No	Service Voltage Level[kV]	SC Withstand[kA]	CT Type	CT Primary Current[A]
Test İstasyonu	Test Fideri	H01	34,5	16,0	0,5	600
Test İstasyonu	Test Fideri	H01	34,5	16,0	SP	600

Veri
Görüntüleme
Penceresi

Şekil 5.5. Veri görüntüleme penceresi

5.2. Hesaplama Şablonları

Geliştirilen seçim aracı ile oluşturulan akım transformatörü özellikleri, değerlendirilmek üzere hazırlanan hesaplama şablonlarına gönderilmektedir. Hesaplama şablonları, kolay kullanımı ve genel bilinirliği sebebiyle excel ortamında hazırlanmıştır. Şablonlar akım transformatörünün tipine ve koruma fonksiyonuna göre özelleştirilmiştir.

Şekil 5.6'da ölçme tipi akım transformatörünün seçiminde kullanılan hesaplama şablonu detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Bu şablon, akım transformatörünün belirlenen teknik gereksinimlere uygun olarak seçilmesine yardımcı olmak amacıyla hazırlanmıştır. Şablonda, akım transformatörünün seçilen gücü ve düzeltilmiş güvenlik faktörü, uluslararası standartlardan biri olan IEC 61869-2'ye uygunluğu açısından değerlendirilmekte ve bağlanacak ölçme cihazının teknik özellikleri doğrultusunda kontrol edilmektedir. Bu sayede, ölçüm sisteminin doğruluğunu koruyacak şekilde, hem transformatörün nominal değerleri hem de ölçme cihazı ile uyumluluğu sağlanarak optimal bir seçim yapılabilir. Bununla birlikte, hesaplama sürecinde transformatörün yüklenme durumu, empedans değerleri ve diğer elektriksel

parametreler de göz önünde bulundurulmakta, böylece ölçme sisteminin güvenilirliği artırılmaktadır.

GENERAL SYSTEM AND SUBSTATION DATA:			
Nominal voltage	:		33,6 kV
Nominal frequency	:		50 Hz
Rated short-circuit current of station	:		13,0 kA

DATA OF MEASURING CT (Core) ACCORDING TO IEC:			
Core	:	Core 1	
CT type	:	Moreover, in order to assure the measuring accuracy, the total effective connected burden has to be between %25 and 100% of rated output of the current transformer. For CTs that have extended burden effective connected burden has to be 1 VA and 100% of rated output of the current transformer	
Transformation ratio	:		
Instrument security factor FS	:		
Rated output S_r	:	$\%25 \times S_r$ (1 VA for Ext. Burden CTs) $\leq S_{total} \leq S_r$ (Requirement 2)	
Secondary wiring resistance R_{ct}	:	where	
Extended Burden	:	Stotal	: Total effective connected burden
	:	Sr	: Rated output

METER DATA:			
Manufacturer	:		
Type	:		
Rated Current	:		
Rated short-time thermal current I_{max}	:		
Meter burden for rated current	:		

MEASUREMENT CT REQUIREMENTS:			
In general, the rated burden of the measuring instrument shall be able to withstand the total instrument security factor (FS').			
In order to protect the connected metering instrument shall be able to withstand the total instrument security factor (FS').			
$I_{max} \geq I_{sr} \times FS'$	with	$FS' \geq FS \times$	The cable burden is calculated by the single effective factor for the wire length. This factor
where	:	Operating instrument security factor	
FS'	:	Instrument security factor	
Sr	:	Rated output	
Sct	:	Secondary winding resistance	
Stotal	:	Total effective connected burden	
I _{max}	:	Rated short-time thermal current	
I _{sr}	:	Nominal secondary current	

CHECK OF CT REQUIREMENTS:			
Operating instrument security factor FS'			
The CT behaviour acc. to IEC will be described by the operating instrument security factor FS'. It depends on the instrument security factor FS, the rated output S_r , the secondary winding resistance R_{ct} and the total effective connected burden S_{total} .			
$FS' \geq FS \times \frac{S_r + S_{ct}}{S_{total} + S_{ct}}$	=	9,9	
where	:	Instrument security factor	= 5
Sr	:	Rated output	= 10 VA
S _{ct}	:	Secondary winding resistance burden	= 9,000 VA
S _{total}	:	Total effective connected burden	= 0,578 VA
Total connected burdens:			
The total effective connected burden has to be between %25 and 100% of the rated output of the current transformer. For CTs that have extended burden, total effective connected burden has to be 100% of rated output of the current transformer			
$\%25 \times S_r$ (1 VA for Ext. Burden CTs) $\leq S_{total} \leq S_r$			
where	:	Total effective connected burden	= 0,578 VA
S _r	:	Rated output	= 10 VA
CT-DIMENSIONING CHECK:			
$I_{max} \geq I_{sr} \times FS'$			(Requirement 1)
where	:		
I _{max}	=	300 A	
I _{sr} * FS'	=	9,919 A	
300 A	≥	9,919 A	Meet requirement
$\%25 \times S_r$ (1 VA for Ext. Burden CTs) $\leq S_{total} \leq S_r$ (Requirement 2)			
where	:		
S _{total}	=	0,578 VA	
S _r	=	10 VA	
2,500 VA	≤	0,58 VA	≤ 10 VA
Not meet requirement			
The metering core is not correctly dimensioned!			

Şekil 5.6. Ölçme çekirdeği hesaplama şablonu

Şekil 5.7'de ABB Relion serisi koruma rölelerinin aşırı akım koruma fonksiyonu için gerekli hesaplama şablonu verilmiştir. Hesaplama sürecinde, akım transformatörünün, koruma ayarına veya maksimum kısa devre akımına göre belirlenmesi sağlanırken, aynı

zamanda rölenin maksimum akım girişi dayanımı da kontrol edilmektedir. Böylece, hem transformatör hem de röle arasında optimum uyum sağlanarak aşırı akım koruma fonksiyonunun etkinliği artırılmaktadır. Bu sayede, aşırı akım koruma fonksiyonunun hem güvenli hem de etkili bir şekilde uygulanması mümkün hale gelmektedir.

GENERAL SYSTEM AND SUBSTATION DATA:			
Nominal voltage	:		33,6 kV
Nominal frequency	:		50 Hz
Rated short-circuit current of station	:		13,0 kA
Max. Sym. SC current for external faults	:		0,00 kA
RELEVANT DATA FOR CT DIMENSIONING (ANSI 50/51):			
Maximum primary short-circuit current considered	=		13,0 kA
High-set stage (>>ANSI 50-2) pickup setting considered	=		n/a
DATA OF CT ACCORDING TO IEC-P:			
Core			
CT type			
Transformation ratio			
Rated accuracy limiting factor ALF			
Rated accuracy burden S_r			
Secondary wiring resistance R_{ct}			
RELAY DATA:			
Manufacturer			
Type			
Rated Current			
Relay burden at rated current			
Relay thermal and dynamic rating cap.			
ANSI 50/51(N) PROTEC. CT REQUIREMENT			
(ABB Relion Series Relay Technical Manual)			
Non-directional overcurrent protection			
lass or on the actual accuracy limit factor			
with ALF of at least 20.			
For overcurrent protection, it is expected			
maximum short circuit current or over			
not affect the sensitivity of the protection			
following condition;			
$ALF' \geq 2 \times \frac{I_{sc}}{I_{pr}} \text{ or } \geq \frac{I_{scmax}}{I_{pr}}$			
where			
ALF'	:	Operating accuracy	
I_{sc}	:	Set or settleable maximum	
I_{scmax}	:	Maximum primary	
I_{pr}	:	rated primary CT	
CALCULATION OF CT ACTUAL CONDITIONS AND CT DIMENSIONING CHECK			
For each considered CT, the dimensioning check is carried out by comparison of the CT actual operating conditions against the relay actual requirements.			
For overcurrent protection, it is expected that the current transformer will not saturate at the maximum short circuit current or overcurrent setting level. So that the current transformer does not affect the sensitivity of the protection function. For this reason, the ALF' must satisfy the following condition;			
the actual CT ALF	=	$ALF' = ALF \times \frac{S_r + S_{ct}}{S_{total} + S_{ct}}$	= 26,12
where:			
ALF	:	rated accuracy limiting factor	= 10
S_r	:	rated accuracy burden	= 15,00 VA
S_{ct}	:	internal CT burden	= 9,000 VA
S_{total}	:	total effective connected burden	= 0,188 VA
In order to check whether CT fulfills the relay requirements, the actual CT ALF' is compared to the required ALF that is calculated using relevant input data for the requirement:			
the actual CT ALF'	$\geq$	I_{sc} or I_{scmax}	
26,12	$\geq$	20,00	
RELAY INPUT CAPABILITY CHECK			
For each considered CT, the relay input prospective secondary circuit current dynamical rating capacity.			
As the relay input shall be capable to close-in faults the following steady-state			
where			
$I_{relay,max,th}$	:	maximum thermal withstand	
$I_{max,CT}$	:	maximum possible rms current	
RELAY CAPABILITY CHECK FOR CT:			
The maximum prospective $I_{max,CT}$ is calculated:			
$I_{max,CT} = ALF' \times I_{sr} =$			
where:			
ALF'	:	real accuracy limit	
I_{sr}	:	rated secondary CT	
Therefore for CT Core:			
Requirement			
$I_{relay,max,th} = 500 \text{ A}$			
The CT			
CALCULATION OF TOTAL CONNECTED BURDEN TO THE CT:			
The performance of the CT depends on the total connected burden at the secondary terminals. The total burden includes the relay burden, the additional burdens of other devices connected to the CT incl. the burden of matching transformers (when used), and the burden of secondary wiring.			
Relay Burden (S_{relay})			
		Device Name	Burden
		REF615_1A	0,02 VA
Sum of add. relay burdens (S_{add})			0,00 VA
The cable burden is calculated by the single length, the cross section, the specific resistivity and an effective factor for the wire length. This factor k_{wire} is 2 if the return wire is to be considered.			
Cable burden:			
Length (l_{wire})		=	10,00 m
Cross section (a_{wire})		=	2,50 mm ²
Spec. Resistivity (ρ)		=	0,021 Ω mm ² /m (Cu at 75 °C)
where $\rho = \rho_0 [1 + \alpha_{20}(\theta - 20)]$		(ref. IEC60287)	
ρ	:	Resistivity for copper @75°C op. temperature	= 2,0968E-08 Ω m
ρ_0	:	Resistivity for copper @20°C (ref. IEC60287)	= 1,7241E-08 Ω m
α_{20}	:	Temperature coefficient for copper (ref. IEC60287)	= 3,93E-03
θ	:	Maximum operating temperature	= 75°C
Sec. wire current ($I_{w,wire}$)		=	1,00 A
Eff. wire length in p.u. (k_{wire})		=	2
$S_{wire} = \frac{k_{wire} \times \rho \times l_{wire}}{a_{wire}} \times (I_{sr,wire})^2$		=	0,168 VA
The total effective resistance is given by the sum of all connected resistances. All the resistance values are based on the rated current of the current transformer secondary side			
Total burden		$S_{total} = S_{relay} + S_{add} + S_{wire}$	= 0,188 VA

Şekil 5.7. ABB Relion serisi röle aşırı akım koruma hesaplama şablonu

GENERAL SYSTEM AND SUBSTATION DATA:			
Nominal voltage	:		33,6kV
Nominal frequency	:		50 Hz
Rated short-circuit current of station	:		12,3 kA
Max. Sym. short-circuit current for external faults	:		0,43 kA
DATA OF CT (Core) ACCORDING TO IEC-PX:			
Core			
CT type			
Transformation ratio			
Rated knee point voltage U_{kn}			
Exciting current I_e at U_{kn}			
Secondary wiring resistance R_d			
RELAY DATA:			
Manufacturer			
Type			
Rated Current			
Relay burden at rated current			
CT REQUIREMENTS FOR (87T TR2PTDF):			
For reliable and correct operation of the relay, it has to be chosen correctly. The designer must ensure the stability and/or operation under fault conditions, enables fast and reliable protection current magnitudes, DC component in low-impedance differential protection similar CTs at both ends of the protected zone to match CT performance so that the protection does not operate earlier than required, avoiding saturation, especially with high fault currents. The following CT requirements are valid for all CT types (stabilized differential protection, MPDIF: Stabilized differential protection, etc.). In these functions, allowed time-to-saturate is given.			
In 615, 620 and 630 series protection relays, the limit factor is given. Here we make the calculation as follows:			
$ALF_{actual} \geq \frac{I_{kmax}}{I_{pr}} \times K_{td} \times K_{rem}$			
where			
I_{kmax}	:	the highest through-fault current, i.e. DC component	
I_{pr}	:	CT rated primary current	
K_{td}	:	the transient dimensioning factor*	
K_{rem}	:	the remanence dimensioning factor**	
The transient dimensioning factor depends on the X/R ratio and can be read either from the figure 1.			
Class X defines CT knee-point voltage as sinusoidal (primary open), which when increased by 10 % causes 50% accuracy limit error. The relationship between actual accuracy limit error and resistive burden, is given by the equation below:			
$U_{kn} \approx 0,9 \times ALF_{actual} \times I_{pr} \times (R_{CT} + R_{wire} + R_{relay})$			
If we put the ALF _{actual} equation into this equation; The minimum required knee voltage of relay to ensure stability on external faults:			
$U_{kn} \geq 0,9 \times \frac{I_{kmax}}{I_{pr}} \times K_{td} \times K_{rem} \times I_{pr} \times (R_{CT} + R_{wire} + R_{relay})$			
Where			
I_{pr}	:	CT rated secondary current	
R_{CT}	:	CT secondary winding resistance	
R_{wires}	:	Resistance of the connection wires	
R_{relay}	:	Impedance of the relay current input	
The factor 0.9 is used because knee-point voltage is same point in the CT magnetizing curve. Actual value of			
I_{kmax}	:	the highest through-fault current in primary amps.	
I_{pr}	:	CT rated primary current	
K_{td}	:	the transient dimensioning factor*	
K_{rem}	:	the remanence dimensioning factor**	
*Worst case condition **Typical value			
The minimum knee point voltage of the CTs must be higher than the required knee point voltage:			
$U_{kn} \geq U_{krequired}$ (Requirement)			
75,0V	≥	36,4 V	Meet requirement
The CT core is correctly dimensioned!			

5.3. Python Yazılım Dili Hakkında

Python, 1991 yılında Guido van Rossum tarafından geliştirilen açık kaynaklı ve yüksek seviyeli bir programlama dilidir. Adını İngiliz komedi grubu Monty Python'dan alan bu dil, basit ve okunabilir bir sözdizimine sahip olmasıyla öne çıkar. Python'un tasarımındaki temel hedef, programcılara daha az kod yazarak daha fazla iş yapabilmeye imkânı sunmaktır. Bu nedenle, hem yeni başlayanlar hem de deneyimli yazılımcılar tarafından tercih edilmektedir.

Python, çok yönlü bir dil olmasıyla dikkat çekmektedir. Veri analitiği, yapay zekâ, makine öğrenimi, web geliştirme, oyun programlama, bilimsel hesaplamalar ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle zengin standart kütüphaneleri ve üçüncü taraf modülleri sayesinde, kullanıcıların karmaşık işlemleri hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirmelerine olanak tanımaktadır.

Python'un platform bağımsız yapısı, aynı kodun farklı işletim sistemlerinde çalışmasını sağlar. Bu özellik, yazılım geliştirme süreçlerini hem kolaylaştırır hem de hızlandırır. Ayrıca, açık kaynaklı bir dil olması sayesinde dünya çapında geniş bir kullanıcı topluluğuna sahiptir. Bu topluluk, dilin sürekli gelişimini destekler ve yeni başlayanlar için eğitim materyalleri, dokümantasyon ve yardım forumları sunmaktadır.

Basitliği, esnekliği ve geniş kullanım alanı sayesinde Python, günümüz teknolojinin vazgeçilmez araçlarından biri hâline gelmiştir. Özellikle veri bilimi ve yapay zekâ gibi geleceğin teknolojilerinde önemli bir rol oynayan bu dil, yazılım dünyasına adım atmak isteyenler için ideal bir başlangıç noktasıdır. (URL-7.)

Bu tez kapsamında geliştirilen araçta Python yazılım dilinin Tkinter kütüphanesi kullanılmıştır. Tkinter, Python için standart GUI(Graphical User Interface – Grafiksel Kullanıcı Arayüzü) kütüphanesidir. Python, Tkinter ile birlikte kullanıldığında GUI uygulamaları hızlı ve kolay bir şekilde oluşturulur. Tkinter, Tk GUI araç setine güçlü bir nesne yönelimli arayüz sağlar. Python2'de “Tkinter”, Python3'te “tkinter” modülü ile temsil edilmektedir (URL-8).

6. BENZER YAZILIMLAR

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilen araca benzer olarak hali hazırda mevcut olan yazılımlar incelenmiştir.

Buna göre ilk olarak SIEMENS markasının CTDim isimli yazılımı belirlenmiştir. CTDim, akım trafosu ve gerilim trafo seçimi ve boyutlandırması için geliştirilmiş bir araçtır. Güç sistemi koruması ve/veya ölçümüne ilişkin teknik gereksinimlere göre akım veya gerilim ölçü transformatörlerinin verilerinin seçiminin optimize edilmesiyle, teknik mükemmellik korunurken mühendislik ve üretim maliyetleri önemli ölçüde azaltılması amaçlanmıştır. CTDim, Aşırı akım korumasını, mesafe korumasını, hat diferansiyel korumasını, trafo korumasını, jeneratör korumasını, motor korumasını, bara korumasını ve ayrıca çok çeşitli yüksek empedans koruma düzenlerini desteklemektedir. Hem boşluksuz hem de hava boşluklu (artık mıknatıslanma olmayan) akım trafo çekirdeklerini desteklemektedir (URL-9).

Akım transformatörü seçimi ile ilgili diğer bir yazılım da, ETAP güç sistemleri analiz yazılımıdır. Bu yazılımın “Current Transformer Sizing and Saturation” isimli modülü akım transformatörü seçimi için kullanılabilir. Akım trafosunun doyumluk seviyesini ve diğer ekipmanlar üzerindeki potansiyel etkisini değerlendirmektedir. Bu araç, kullanıcının Kullanıcı Tanımlı arıza akımları veya ETAP hesaplamalarından elde edilen gerçek sonuçlar içeren senaryoları analiz etmesine olanak tanıyacak kadar esnektir. Ayrıca, bir arıza olayı durumunda doyumluğun etkisi göz önünde bulundurularak kullanıcıya CT boyutlandırma uyarıları sağlamaktadır (URL-10).

Belirlenen yazılımların, bu tezde hazırlanan yazılım aracına göre benzer özelliklere sahip olsa da, özellikle transient analiz ve boyutlandırma, güç sistemleri analizi programları ile entegrasyon ve değerlendirme şablonlarının artırılması konularında geliştirilecek alanların olduğunu göstermiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, IEC 61869 standartlarına göre ölçü transformatörlerinin doğru seçimi hakkındaki kurallar derlenmiş ve seçim işlemini kolaylaştırmak için bir yazılım aracı geliştirilmiştir. Geleneksel akım ve gerilim ölçme transformatörlerinin çalışma prensipleri, manyetik devre ve temelleri ele alınmıştır.

IEC 61869 standardı, ölçü transformatörlerinin farklı doğruluk sınıflarını ve koruma fonksiyonlarına göre gereksinimlerini belirlemektedir. Bu doğruluk sınıfları, ölçme ve koruma fonksiyonları için farklı gereksinimleri karşılamaktadır. Akım ve gerilim transformatörlerinin doğru seçimi, uygulanacakları ortama ve fonksiyonlarına bağlı olarak önemlidir.

Akım transformatörlerinin seçiminde, anma yalıtım seviyesi, anma primer akımı, anma sekonder akımı ve sürekli termik anma akımı gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Ayrıca, çekirdek sayısı, güç ve doğruluk sınıfı gibi önemli unsurlar da seçim sürecinde göz önünde bulundurulmalıdır.

Öte yandan, gerilim transformatörlerinin seçiminde, anma yalıtım seviyesi, anma primer gerilim ve sekonder gerilim gibi faktörler belirleyicidir. Doğruluk sınıfı ve koruma sınıfı da gerilim transformatörlerinin seçiminde önemli bir rol oynamaktadır.

Ayrıca analizler ile akım transformatörünün seçimine etki eden bazı değişkenlerin sonuçları gösterilmiştir. Simülasyonlar ile, akım transformatörü seçiminde, sekonder devre yükünün, sistem “X/R” oranının akım transformatörü performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sekonder devre yükü arttıkça, akım transformatörünün daha erken doyuma ulaştığı simülasyon ile de gösterilmiştir. Benzer şekilde, sistem “X/R” oranının özellikle diferansiyel koruma röleleri için kullanılacak akım transformatörlerinin seçiminde önemli olduğu analiz edilerek tespit edilmiştir.

Bu tezde akım transformatörlerinin seçimi için, tespit edilen kurallar ve üreticiler tarafından tanımlanan şartlar dikkate alınarak bir yazılım aracı geliştirilmiştir. Bu araçta, akım transformatörlerine dair giriş verileri kaydedilip daha sonrasında oluşturulan hesaplama şablonlarına gönderilerek değerlendirme yapılmaktadır. Ölçme,

aşırı akım ve diferansiyel koruma fonksiyonu için akım transformatörü seçimi şablonları oluşturulmuştur.

Geliştirilen araca benzer mevcut yazılımlar incelendiğinde, bu tezde geliştirilen araçla benzerlikler taşısalar da, özellikle transient analiz, güç sistemi analizi entegrasyonu ve değerlendirme şablonlarının genişletilmesi konularında geliştirme alanları olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, akım ve gerilim ölçme transformatörlerinin doğru seçimi, elektrik enerjisi iletimi ve dağıtımında güvenilirlik ve verimlilik sağlamak için hayati öneme sahiptir. IEC standartlarına ve üreticilerin şartlarına uygun olarak yapılan seçimler, elektrik sistemlerinin güvenliğini ve performansını artırabilir ve uygun koruma sağlayabilir. Bu nedenle, endüstrideki profesyonellerin bu standartlara uygun olarak transformatör seçimini yapmaları kritik öneme sahiptir.

KAYNAKLAR

- Aydoğan, H., Aras, F. (2013). Fiber Optik Akım Sensörünün Modellenmesi ve Simülasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(4).
- Bertrand, P., Mendik, M., Hazel, T., Tantin, P. (2009). CT Saturation Calculations - Are They Applicable in The Modern World? - Part IV: CT Sizing as per IEC Standards and The Benefits of Non Conventional Instrument Transformers. *2009 Record of Conference Papers - Industry Applications Society 56th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, Anaheim, CA, USA, 14-16 Eylül 2009.
- Draxler, K., Styblikova, R. (2007). Influence of Instrument Transformers on Quality of Electrical Power and Energy Measurement. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo, İspanya, 04-07 Haziran 2007.
- IEC. (2011). *Instrument Transformers - Part 3: Additional Requirements for Inductive Voltage Transformers* (IEC 61869-3).
- IEC. (2012). *Instrument Transformers – Part 2: Additional Requirements for Current Transformers* (IEC 61869-2).
- IEC. (2017). *Instrument Transformers - Part 100: Guidance for Application of Current Transformers in Power System* (IEC 61869-100).
- IEC. (2023). *Instrument transformers - Part 1: General Requirements* (IEC 61869-1).
- IEEE. (2023). *IEEE Guide for The Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes* (IEEE Std C37.110). USA.
- Kim, D.-E., Lee, G.-Y., Kil, G.-S., Kim, S.-W. (2024). Trends in Measuring Instrument Transformers for Gas-Insulated Switchgears: A Review. *Energies*, 17(8), 1846.
- URL-1: <https://www.gevernova.com/grid-solutions/products/manuals/ititechinfo.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 01 Ocak 2025).
- URL-2: https://orbray.com/magazine_en/archives/2322, (Ziyaret Tarihi: 01 Ocak 2025).
- URL-3: <https://mekatronikdersi.blogspot.com>, (Ziyaret Tarihi: 01 Ocak 2025).
- URL-4: <https://studyelectrical.com/2014/03/capacitor-voltage-transformer.html>, (Ziyaret Tarihi: 01 Ocak 2025).
- URL-5: <https://library.e.abb.com/public/eb71e99b34df40fac2256f230034b639/applicationCTreqENa.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 01 Ocak 2025).
- URL-6: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109802608/IC1000-K4400-A101-A8-7600_SIP4_E8_8.1_en.pdf, (Ziyaret Tarihi: 01 Ocak 2025).

URL-7: <https://www.python.org>, (Ziyaret Tarihi: 01 Ocak 2025).

URL-8: <https://erdincuzun.com>, (Ziyaret Tarihi: 01 Ocak 2025).

URL-9: <https://www.siemens.com/CTDim>, (Ziyaret Tarihi: 01 Ocak 2025).

URL-10: <https://etap.com>, (Ziyaret Tarihi: 01 Ocak 2025).

Üzel, S. (2009). Rogowski Bobini Akım Sensörleri. *EMO Yüksek Gerilim Çalıştayı*, 2009.

Xu, Z., Proctor, M., Voloh, I., Lara, M. (2015). CT Saturation Tolerance for 87L Applications. *2015 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, TX, USA, 30 Mart-02 Nisan 2015.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Alboyacı, B., **Gezer, M.** (2024). Technical Considerations and Key Criteria for the Selection of Instrument Transformers, *1.Kocaeli Uluslararası Mühendislik-Doğa Bilimleri ve Sağlık Teknolojileri Konferansı*, Kocaeli, 11-13 Ekim 2024.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Denizli’de tamamladı. 2008 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden 2012 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 2012 yılından beri GENETEK Güç Enerji Elektrik Sistemleri Özel Eğitim ve Danışmanlık şirketinde çalışma hayatına devam etmektedir.

